

Escuela Superior Politécnica del Litoral

Facultad de Ingeniería Eléctrica y Computación

Estudios de carga, cortocircuito y protecciones para las estaciones de bombeo de la
planta “La Toma”

Proyecto Integrador

Previo la obtención del Título de:

Ingeniero Eléctrico

Presentado por:

Joseph Santiago Erazo Santillán

Francisco Alejandro Muñoz García

Guayaquil - Ecuador

Año: 2023

Dedicatoria

El presente proyecto se encuentra dedicado a mis queridos padres, quienes han ejercido un papel fundamental al ser mi constante apoyo y guía a lo largo de este recorrido universitario. Su inquebrantable respaldo ha sido la fuerza motriz que me impulsó a seguir adelante incluso en los momentos más desafiantes.

Francisco Muñoz

Dedicatoria

Este proyecto de tesis se lo dedico a mis padres, que han sido un pilar fundamental en mi vida personal y académica otorgándome todo su apoyo y cariño en los momentos más complicados e impulsándome siempre a ser mejor.

A mi familia que me han ayudado a seguir adelante sin importar los obstáculos y que me han enseñado a siempre dar lo mejor de mí.

A mis amigos y compañeros que me han acompañado durante toda mi vida académica y que me han compartido todos sus conocimientos, alegrías y apoyo lo cual me ha fortalecido en este camino.

Joseph Erazo

Agradecimientos

Mi más sincero agradecimiento a los ingenieros Fernando Vaca y Henry Carbo cuya invaluable colaboración resultó fundamental en la concreción del proyecto propuesto. Su disposición para resolver cualquier pregunta o duda que surgiera fue de gran importancia y se convirtió en un recurso invaluable a lo largo de todo el proceso.

Francisco Muñoz

Agradecimientos

Agradezco a Dios por ayudarme a cumplir mis sueños y aspiraciones, por darme la oportunidad de convertirme en quien soy ahora.

A la Espol por abrirme las puertas otorgándome grandes conocimientos y poder conocer a excelentes personas.

A Interagua y a los operarios de la planta “La Toma”, en especial al ingeniero Henry Carbo quien siempre nos proporcionó su ayuda y conocimiento para llevar a cabo este proyecto.

A nuestro tutor y profesor de carrera Fernando Vaca y David Endara quienes nos apoyaron y guiaron con todos sus conocimientos lo que fue fundamental para el desarrollo de esta tesis.

Joseph Erazo

Declaración Expresa

“Los derechos de titularidad y explotación, nos corresponde conforme al reglamento de propiedad intelectual de la institución; Joseph Santiago Erazo Santillan y Francisco Alejandro Muñoz García y damos nuestro consentimiento para que la ESPOI realice la comunicación pública de la obra por cualquier medio con el fin de promover la consulta, difusión y uso público de la producción intelectual”

Joseph Santiago Erazo
Santillán

Francisco Alejandro
Muñoz García

Evaluadores

MSc. Endara Vélez Iván David

Profesor de Materia

MSc. Vaca Urbano Fernando Arturo

Tutor de proyecto

Resumen

El presente estudio planea realizar un análisis de cortocircuito y coordinación de protecciones a las estaciones de bombeo 2 y 3 de la planta “La Toma”, ubicado en el Km. 26.5 Vía Daule. Esta planta de bombeo perteneciente a Interagua y gestionada por Veolia, es una de las principales fuentes de suministro de agua potable de la ciudad de Guayaquil con un total de 20 bombas de tipo verticales y horizontales.

Para el análisis del proyecto, se planea realizar un levantamiento de carga actual de la planta de agua “La Toma” con el fin de conocer los equipos y capacidades eléctricas de operación, observar los cambios realizados en los últimos años, obtener un diagrama unifilar del sistema y adquirir datos referentes a la red actual como pueden ser el circuito equivalente del sistema, potencias de cortocircuito en el punto de entrega de la energía, entre otras. Además, se propone modelar la red mediante el software DigSilent Power Factory que realizara los estudios de cortocircuitos para conocer las condiciones de trabajo del sistema ante el estímulo de perturbaciones eléctricas.

Por último, utilizando las mediciones proporcionadas por el software, se planea coordinar y ajustar algunas funciones de protección en los relés de protecciones de motores de las estaciones de bombeo 2 y 3 para que estos operen con obediencia, fiabilidad y seguridad considerando los estándares y normativas a nivel mundial. Adicionalmente, se obtendrán las curvas de corriente vs tiempo de los relés donde se podrán observar los tiempos de interrupción de las protecciones antes distintos eventos de fallas que servirán para confirmar el adecuado funcionamiento del sistema de protecciones.

Abstract

The present study aims to conduct a short-circuit analysis and protection coordination for pumping stations 2 and 3 of the "La Toma" plant, located at Km. 26.5 Via Daule. This pumping plant, belonging to Interagua and managed by Veolia, is one of the main sources of drinking water supply for the city of Guayaquil, with a total of 20 vertical and horizontal pump units.

For the project analysis, a load survey of the "La Toma" water plant is planned in order to understand the equipment and electrical operating capacities, observe changes made in recent years, obtain a one-line diagram of the system, and gather data related to the current network, such as the equivalent circuit of the system, short-circuit power at the point of energy delivery, among others. Additionally, the network will be modeled using the DigSilent Power Factory software, which will perform short-circuit studies to understand the system's behavior under electrical disturbances.

Finally, using the measurements provided by the software, the plan is to coordinate and adjust certain protection functions in the motor protection relays of pumping stations 2 and 3, ensuring they operate obediently, reliably, and safely in accordance with global standards and regulations. Furthermore, current vs. time curves of the relays will be obtained where the interruption times of protections can be observed during various fault events, confirming the proper functioning of the protection system.

Índice General

Resumen	I
Abstract	II
Abreviaturas.....	V
Simbología.....	VI
Capítulo 1	1
1. Introducción.....	2
1.1. Descripción del problema	3
1.2. Justificación	4
1.3. Objetivos.....	4
1.3.1. Objetivo General	4
1.3.2. Objetivos específicos.....	5
1.4. Marco Teórico.....	5
1.4.1. Análisis de cortocircuito	5
1.4.2. Corriente de falla.....	6
1.4.3. Fallas eléctricas en una red.....	9
1.4.4. Requerimientos para un análisis de cortocircuito.....	11
1.4.5. Metodología de solución para análisis de cortocircuito.....	13
1.4.6. Criterios para la selección de protecciones.....	14
1.4.7. Tecnología de Relés	15
1.4.8. Protecciones eléctricas en distribución.....	17
Capítulo 2	21
2. Metodología.....	22
2.1. Levantamiento de carga	22
2.2. Modelo de la red en DigSilent Power Factory	29

2.3. Análisis de carga.....	32
2.4. Análisis de Cortocircuito.....	36
Capítulo 3	56
3. Resultados.....	57
3.1. Coordinación de Protecciones.....	57
3.1.1. Protección ANSI 51.....	58
3.1.2. Protección ANSI 50.....	60
3.1.3. Protección ANSI 46.....	61
3.1.4. Protección ANSI 27 y ANSI 59.....	62
3.1.5. Curvas de corriente de tiempo inverso.....	64
Capítulo 4	74
4. Conclusiones y Recomendaciones.....	75
4.1. Conclusiones	75
4.2. Recomendaciones.....	76
Referencias	78
Apéndice A.....	80

Abreviaturas

EB1 Estación de bombeo 1

EB2 Estación de bombeo 2

EB3 Estación de bombeo 3

EB4 Estación de bombeo 4

CT Current transformer

PT Potential transformer

IEC International Electrotechnical Commission

GE General Electric

ANSI American National Standards Institute

Simbología

V	Voltio
A	Amperio
kV	Kilo voltio
kA	Kilo amperio
kW	Kilo watio
MVA	Mega voltio amperio
MVA _r	Mega voltio amperio reactivo.
I	Intensidad de corriente
I _{k''}	Corriente inicial de cortocircuito
I _p	Corriente pico de cortocircuito
I _k	Corriente de estado estable de cortocircuito
R	Resistencia
pu	Por unidad
S	Segundo
RPM	Revoluciones por minuto
Km	Kilometro

Índice de Figuras

Figura 1.1	Componente de corriente simétrica [2].	7
Figura 1.2	Componente dc de la curva de corriente [2].	7
Figura 1.3	Corriente de falla asimétrica [2].	8
Figura 1.4	Fallas eléctricas en los sistemas de potencia [3].	10
Figura 1.5	Estructura de diseño de una coordinación de protecciones [4].	12
Figura 1.6	Relé electromecánico.	16
Figura 1.7	Diagrama representativo de un relé numérico.	17
Figura 1.7	Protección de Sobre corriente direccional [7].	18
Figura 1.9	Protección de Sobrecorriente temporizada e instantánea [9].	19
Figura 1.10	Protección diferencial de un transformador.	20
Figura 1.11	Protección de mínimo voltaje.	20
Figura 2.1	Interconexión E de la planta "La Toma".	26
Figura 2.2	Interconexión G de la planta "La Toma".	26
Figura 2.3	Interconexiones de la planta a EB3	27
Figura 2.4	Cargas convencionales y auxiliares de la planta "La Toma".	28
Figura 2.5	Red de la planta "La Toma" en DigSilent.	29
Figura 2.6	Modelo de la estación de bombeo 4.	29
Figura 2.7	Modelo de la estación de bombeo 1.	30
Figura 2.8	Modelo de la estación de bombeo 2.	30
Figura 2.9	Modelo de la estación de bombeo 3.	31
Figura 2.10	Perfil de carga de las bombas de la planta "La Toma".	33
Figura 2.11	Días totales sin operar cada grupo de bombeo en un periodo de 3 meses.	34
Figura 2.12	Curvas de potencia de la máquina de inducción.	35
Figura 2.13	Perfil de operación en el arranque de la máquina de inducción.	36

Figura 2.14 Perfil de voltaje de operación de la máquina de inducción.	36
Figura 2.15 Curva de voltaje y corriente de cortocircuito trifásica del Grupo 5.	38
Figura 2.16 Curva de voltaje y corriente de cortocircuito línea a línea del Grupo 5.	39
Figura 2.17 Curva de voltaje y corriente de cortocircuito línea a tierra del Grupo 5.	39
Figura 2.18 Curva de voltaje y corriente de cortocircuito trifásica del Grupo 6.	40
Figura 2.19 Curva de voltaje y corriente de cortocircuito línea a línea del Grupo 6.	41
Figura 2.20 Curva de voltaje y corriente de cortocircuito línea a tierra del Grupo 6.	41
Figura 2.21 Curva de voltaje y corriente de cortocircuito trifásica del Grupo 7.	42
Figura 2.22 Curva de voltaje y corriente de cortocircuito línea a línea del Grupo 7.	43
Figura 2.23 Curva de voltaje y corriente de cortocircuito línea a tierra del Grupo 7.	43
Figura 2.24 Curva de voltaje y corriente de cortocircuito trifásica del Grupo 8.	44
Figura 2.25 Curva de voltaje y corriente de cortocircuito línea a línea del Grupo 8.	45
Figura 2.26 Curva de voltaje y corriente de cortocircuito línea a tierra del Grupo 8.	45
Figura 2.27 Curva de voltaje y corriente de cortocircuito trifásica del Grupo 9.	46
Figura 2.28 Curva de voltaje y corriente de cortocircuito línea a línea del Grupo 9.	47
Figura 2.29 Curva de voltaje y corriente de cortocircuito línea a tierra del Grupo 9.	47
Figura 2.30 Curva de voltaje y corriente de cortocircuito trifásica del Grupo 10.	48
Figura 2.31 Curva de voltaje y corriente de cortocircuito línea a línea del Grupo 10.	49
Figura 2.32 Curva de voltaje y corriente de cortocircuito línea a tierra del Grupo 10.	49
Figura 2.33 Curva de voltaje y corriente de cortocircuito trifásica del Grupo 11.	50
Figura 2.34 Curva de voltaje y corriente de cortocircuito línea a línea del Grupo 11.	51
Figura 2.35 Curva de voltaje y corriente de cortocircuito línea a tierra del Grupo 11.	51
Figura 2.36 Curva de voltaje y corriente de cortocircuito trifásica del Grupo 12.	52
Figura 2.37 Curva de voltaje y corriente de cortocircuito línea a línea del Grupo 12.	53
Figura 2.38 Curva de voltaje y corriente de cortocircuito línea a tierra del Grupo 12.	53

Figura 3.1	Efectos de la caída de tensión en una máquina de inducción.	63
Figura 3.2	Curva de tiempo inverso de las protecciones de los motores de la estación 2.....	65
Figura 3.3	Curva de tiempo inverso de las protecciones de los motores de la estación 3.....	66
Figura 3.4	Actuación de los relés de protección de motores de EB2 ante una falla trifásica en los terminales del grupo de bombeo 5.....	67
Figura 3.5	Actuación de los relés de protección de EB3 ante una falla trifásica en los terminales del grupo de bombeo 5.....	68
Figura 3.6	Actuación de los relés de protección de motores de EB3 ante una falla trifásica en los terminales del grupo de bombeo 10.....	69
Figura 3.7	Actuación de los relés de protección de EB2 ante una falla trifásica en los terminales del grupo de bombeo 10.....	70
Figura 3.8	Actuación de los relés de motores de EB2 ante falla en la barra de EB2.....	71
Figura 3.9	Actuación de los relés de motores de EB3 ante falla en la barra de EB3.....	72
Anexo 1	Estudio de cortocircuito proporcionado por la planta "La Toma".....	81
Anexo 2	Estudio de cortocircuito proporcionado por la planta "La Toma" - Caso: Falla línea a línea.....	82
Anexo 3	Estudio de cortocircuito proporcionado por la planta "La Toma" - Caso: Falla línea a tierra.....	83
Anexo 4	Estudio de cortocircuito proporcionado por la planta "La Toma" - Caso: Falla trifásica.....	84
Anexo 5	Curva de corriente de falla en los terminales de los motores proporcionado por la planta "La Toma" – Barra 002.....	85
Anexo 6	Curva de corriente de falla en los terminales de los motores proporcionado por la planta "La Toma" – Barra 003.....	86
Anexo 7	Ajustes de relés de barra generales proporcionado por la planta "La Toma".....	87

Índice de Tablas

Tabla 2.1	Características de los transformadores de EB4.	23
Tabla 2.2	Características de los motores de EB4.....	23
Tabla 2.3	Características de los transformadores de EB1.	24
Tabla 2.4	Características de los motores de EB1.....	24
Tabla 2.5	Características de los transformadores de EB2.	25
Tabla 2.6	Características de los motores de EB2.....	25
<i>Tabla 2.7</i>	<i>Características de los motores de EB3.....</i>	<i>27</i>
Tabla 2.8	Corrientes de cortocircuito en la barra del Grupo 5.	38
Tabla 2.9	Corrientes de cortocircuito en los terminales del Grupo 5.....	38
Tabla 2.10	Corrientes de cortocircuito en la barra del Grupo 6.	40
Tabla 2.11	Corrientes de cortocircuito en los terminales del Grupo 6.....	40
Tabla 2.12	Corrientes de cortocircuito en la barra del Grupo 7.	42
Tabla 2.13	Corrientes de cortocircuito en los terminales del Grupo 7.....	42
Tabla 2.14	Corrientes de cortocircuito en la barra del Grupo 8.	44
Tabla 2.15	Corrientes de cortocircuito en los terminales del Grupo 8.....	44
Tabla 2.16	Corrientes de cortocircuito en la barra del Grupo 9.	46
Tabla 2.17	Corrientes de cortocircuito en los terminales del Grupo 9.....	46
Tabla 2.18	Corrientes de cortocircuito en la barra del Grupo 10.	48
Tabla 2.19	Corrientes de cortocircuito en los terminales del Grupo 10.....	48
Tabla 2.20	Corrientes de cortocircuito en la barra del Grupo 11.	50
Tabla 2.21	Corrientes de cortocircuito en los terminales del Grupo 11.....	50
Tabla 2.22	Corrientes de cortocircuito en la barra del Grupo 12.	52
Tabla 2.23	Corrientes de cortocircuito en los terminales del Grupo 12.....	52
Tabla 3.1	Ajustes de protección ANSI 51 para los relés de motores de la estación EB2 y EB3.....	58

Figura 3.2	Ajustes de protección ANSI 51 para los relés de las barras generales de la estación EB2 y EB3.	59
Tabla 3.3	Ajustes de protección ANSI 50 para los relés de la estación EB2 y EB3.	60
Tabla 3.4	Ajustes de protección ANSI 50 para los relés de la estación EB2 y EB3.	62
Tabla 3.5	Ajustes de protección ANSI 27 para los relés de la estación EB2 y EB3.	64
Tabla 3.6	Ajustes de protección ANSI 59 para los relés de la estación EB2 y EB3.	64

Capítulo 1

1. Introducción

La constante evolución de la humanidad ha provocado que el uso de la energía eléctrica sea un factor imprescindible para el diario vivir de cada ser humano, en las últimas décadas el crecimiento constante de las poblaciones ha demandado un desarrollo significativo en el área eléctrica de cualquier país, provocando que el sustento de toda nación se base en un sistema eléctrico eficiente, eficaz y confiable; por tanto, realizar pruebas y estudios a los equipos que conforman la red eléctrica es de vital importancia, para brindar un nivel de seguridad alta a los consumidores del sistema eléctrico y para el personal que maniobra la red.

El sistema de protecciones eléctricas es una sección importante de la red que correctamente aplicado podrá prevenir problemas a toda la infraestructura eléctrica y a los técnicos presentes. Por ello, realizar una buena selección de los elementos de protección, ajustar adecuadamente los tiempos de interrupción y una capacidad de operación rápida de los equipos, evitará anomalías eléctricas que puedan provocar grandes pérdidas para las instituciones que suministran el servicio público de electricidad y disgustos de la ciudadanía al no recibir un servicio confiable.

En la actualidad los equipos de protecciones eléctricas se encuentran en un proceso de innovación, ya que cada vez estos permiten realizar acciones de forma automática y sin necesidad de supervisión humana. Por otra parte, la capacidad de protección de cada elemento que compone el sistema de protecciones eléctricas dependerá de principalmente del estudio de carga de la red que se desea proteger para identificar todos los elementos eléctricos disponibles, un estudio de cortocircuito el cual mostrara los parámetros de fallas que presenta el sistema y con ello seleccionar los equipos de protección y los parámetros de ajustes óptimos de las protecciones eléctricas según las características de operación y condiciones de la red. Estas acciones permitirán detectar

condiciones eléctricas anormales en la red eléctrica y aislar las posibles fallas en periodos de tiempo muy cortos con el fin de resguardar las maquinas eléctricas como transformadores, motores y dispositivos eléctricos que se encuentran distribuidas en subestaciones, fábricas y viviendas.

La planta de bombeo de agua “La Toma”, perteneciente a Interagua y gestionada por la empresa Veolia, ubicada en el Km 26.5, Vía Daule es una estación de bombeo de agua de gran tamaño que tiene el objetivo de suministra un servicio de agua potable de calidad a la población de Guayaquil, esto mediante la supervisión de un sistema Scada que monitorea cada uno de los sistemas de agua potable y alcantarillado de la ciudad, dicha planta consta de 2 subestaciones eléctricas de 69kV a 13.8kV y 69Kv a 4.16kV con 4 transformadores de capacidad de 16MVA y 12.5 MVA, 4 estaciones de bombeo que constituyen un total de 20 bombas, actualmente la planta “La Toma” se encuentra en un proceso de actualización por ende, precisan de un nuevo estudio de carga y coordinación de protecciones para que esta red pueda operar sin inconvenientes.

1.1. Descripción del problema

La planta de potabilización “La Toma” ubicada en la ciudad de Guayaquil requiere actualizar su sistema de protecciones eléctricas en cada una de sus cuatro estaciones de bombeo debido a que la mayoría de los dispositivos de protección son antiguos y obsoletos además de que ciertos valores del sistema eléctrico han ido cambiando con el tiempo haciendo que los parámetros configurados en las protecciones sean erróneos. Actualmente el sistema está conformado por un total de 20 bombas divididas entre las cuatro estaciones, sin embargo, el estudio de cortocircuito y coordinación de protecciones va a enfocarse en las estaciones de bombeo #2 y #3 las cuales están constituidas por un total de 8 bombas distribuidas de forma horizontal. También se requiere un levantamiento completo del sistema para cubrir todas las máquinas eléctricas que consumen e

inyectan potencia para poder modelar el sistema con un software especializado y realizar los estudios pertinentes.

1.2. Justificación

Es imperativo que los equipos eléctricos que conforman la red eléctrica de la planta de potabilización “La Toma” dispongan de un estudio de protecciones actualizado y acorde a la normativa vigente para evitar el deterioro o destrucción de dichos elementos ante la presencia de algún tipo de falla, además de precautelar la integridad del personal en cada estación y el constante suministro de agua potable a la ciudad donde; cabe recalcar que, si el sistema deja de operar, la ciudad de Guayaquil dejaría de disponer de agua potable en un tiempo aproximado de 30 minutos. Por otro lado, es necesario un levantamiento actual del sistema para analizar su comportamiento ante una falla y conocer cuanta potencia inyecta cada una de las máquinas eléctricas a dicha falla, para posteriormente determinar los parámetros pertinentes requeridos para reconfigurar los relés de protección existentes en la planta.

1.3. Objetivos

1.3.1. Objetivo General

Realizar un estudio de cortocircuito y coordinación de protecciones a las estaciones de bombeo 2 y 3 de la planta “La Toma” mediante el uso de softwares especializados como DigSilent Power Factory obteniendo así las curvas de corriente vs tiempo y ajustes de los elementos de protección.

1.3.2. Objetivos específicos

1. Representar por medio del programa DIGSILENT la red eléctrica de la sección de la planta a estudiarse, aplicando los estudios y configuraciones pertinentes al sistema.
2. Realizar la coordinación de protecciones eléctricas de las estaciones de bombeo seleccionadas de la planta con el fin de que sea actualizada la información de la planta de bombeo “La Toma”, evitando así problemas de falsas interrupciones.
3. Obtener las curvas de corriente vs tiempo de cada relé empleado para la protección de las estaciones de bombeo a estudiarse además de sus tiempos de ajuste mediante el seguimiento de normativas y estándares utilizados en diversos estudios.
4. Evidenciar el aporte de corriente generado por cada uno de los motores eléctricos de las estaciones de bombeo al realizarse una falla en el sistema.

1.4. Marco Teórico

1.4.1. Análisis de cortocircuito

Los sistemas eléctricos de potencia están hechos con el fin de suministrar energía de forma constante y sin interrupción, los diseños eléctricos se los realiza con un alto nivel de confiabilidad para evitar todo tipo de problema económico y técnico, sin embargo, las fallas eléctricas son factores impredecibles que afectaran a la red eléctrica sin importar las consideraciones tomadas, puesto que estas sobre corrientes no se las puede prevenir en el diseño eléctrico, causando incomodidad a la ciudadanía y pérdidas económicas.

Los cortocircuitos son conexiones de baja resistencia o impedancia entre dos puntos distintos de la red que se encuentran a un potencial diferente, las sobre corrientes que se originan

producto del cortocircuito suelen ser de mucha mayor escala que la corriente nominal y ocurren de forma instantánea. Los cortocircuitos generan 3 efectos al producirse [1].

- Arco Eléctrico. - Este efecto se presenta como la aparición de un arco muy brillante y caliente que puede ocurrir desde niveles bajos hasta niveles altos de corriente, este efecto es muy peligros puesto que el arco eléctrico es capaz de quemar todo lo que toque.
- Calentamiento. – La corriente de falla al ser una corriente de gran magnitud implicara calentamiento en los conductores de alimentación debido a la energía liberada por el choque de los electrones, además los conductores y equipos están diseñados para trabajar hasta máximo su valor nominal por lo que al producirse una sobre corriente, este elemento disipara el exceso de energía mediante el efecto joule.
- Esfuerzos magnéticos. – Por la ley de ampere se sabe que al circular corriente en un circuito cerrado, este producirá un campo magnético a su alrededor proporcional a la corriente que lo genera, el campo magnético producido por una sobre corriente será de gran magnitud produciendo mayores esfuerzos magnéticos.

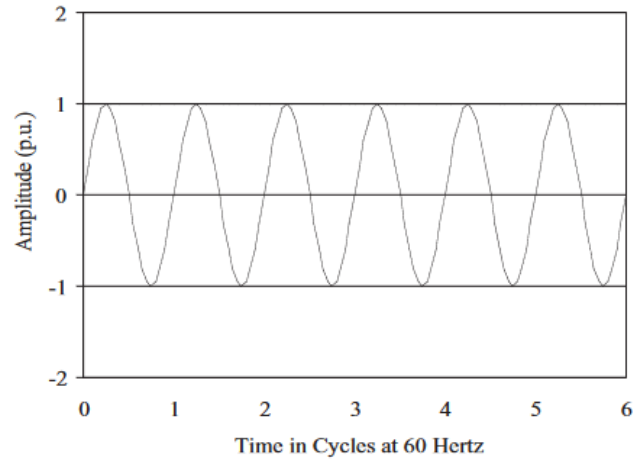
1.4.2. Corriente de falla.

Las corrientes de falla dentro de un sistema de distribución o transmisión están compuestas de 2 componentes, una componente simétrica y una componente DC o asimétrica. La unión de ambas curvas originará la forma real de la corriente de falla dentro de un sistema. Por lo general las corrientes de falla suelen ser asimétricas en un inicio alcanzado su valor máximo durante el primer ciclo debido a la presencia de la componente DC, dicha componente decae con el tiempo debido a que la energía que representa la curva será disipada como perdidas de calor I^2R . Una vez disipada la energía, la forma de onda de la corriente de falla se vuelve simétrica con respecto al

eje del tiempo y se acerca a un valor de estado estable originado por los cambios de los campos de flujo magnético de las maquinas eléctricas que se encuentren presentes [2].

Figura 1.4

Componente de corriente simétrica [[2]].

**Figura 1.4**

Componente dc de la curva de corriente [[2]].

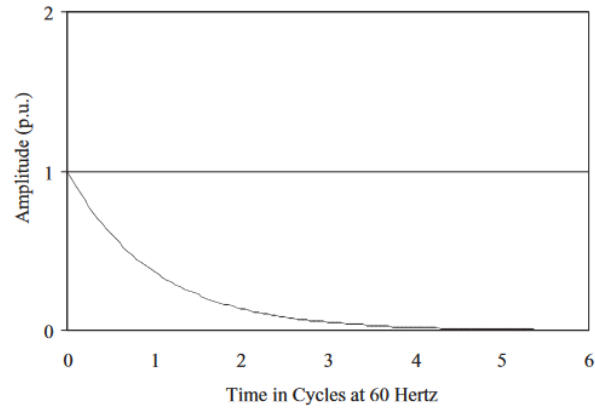
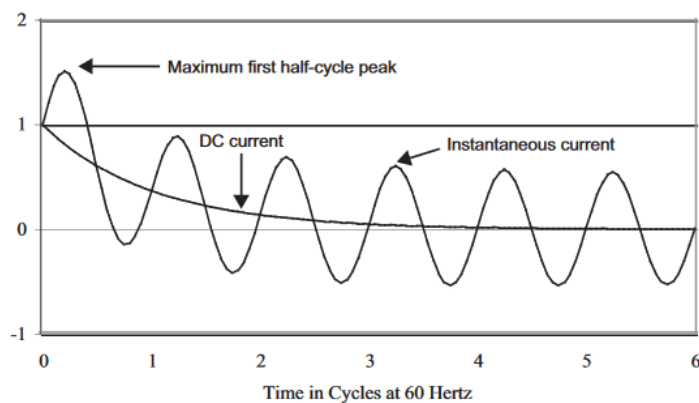


Figura 1.4

Corriente de falla asimétrica [[2]].



El grado de asimetría que presente la curva de corriente de falla dependerá principalmente del momento del punto en que se encuentre la curva del voltaje cuando ocurre la falla y de la impedancia que exista en la red. Si la falla ocurre en el pico de voltaje en un sistema solo con reactancias, la corriente de falla empezará en cero y originará una curva totalmente simétrica con respecto al eje del tiempo. Si la falla ocurre cuando el voltaje es cero, la forma de corriente generada no será totalmente simétrica puesto que la corriente en un circuito inductivo atrasa 90° al voltaje. Si la falla ocurre en un lugar dentro del valor inicial y pico de voltaje, la corriente de falla será asimétrica dependiendo del punto exacto donde ocurra la falla en la onda de voltaje. Por último, en un circuito que tiene tanto resistencia y reactancia, el grado de asimetría puede variar entre cero y el valor de asimetría máximo de un circuito solo con reactancia [2].

En los sistemas eléctricos, la corriente total de falla será alimentada por tres tipos de fuente de alimentación, la primera son los elementos de servicios públicos del sistema de transmisión que trabajan como un generador remoto, el segundo son los generadores locales o más cercanos a las fallas y la última son los motores síncronos y de inducción cercanos. Las máquinas rotativas al ser sometidas a un cortocircuito, estas presentarán también una caída de su componente simétrica debido a la reducción del flujo magnético en la máquina durante el cortocircuito. Cuando ocurre

una falla cerca de los terminales de estas máquinas rotativas, los motores de inducción generan una corriente simétrica de falla que desaparece después de los primeros ciclos, mientras que los motores síncronos se mantienen aportando un valor inicial pequeño de corriente de falla debido a que su armadura se mantiene energizada.

Los sistemas que presentan una gran cantidad de motores de inducción en comparación de motores síncronos presentan decaimientos de las componentes de cortocircuito mucho más rápidos, así mismo, la componente dc de falla será mucho más elevada provocando que el pico de corriente de cortocircuito se incremente, es por ello que la diferencia entre la corriente de falla del primer ciclo con una corriente de ciclos posteriores es muy elevada. Es así como la corriente de cortocircuito se la puede definir [[2]:

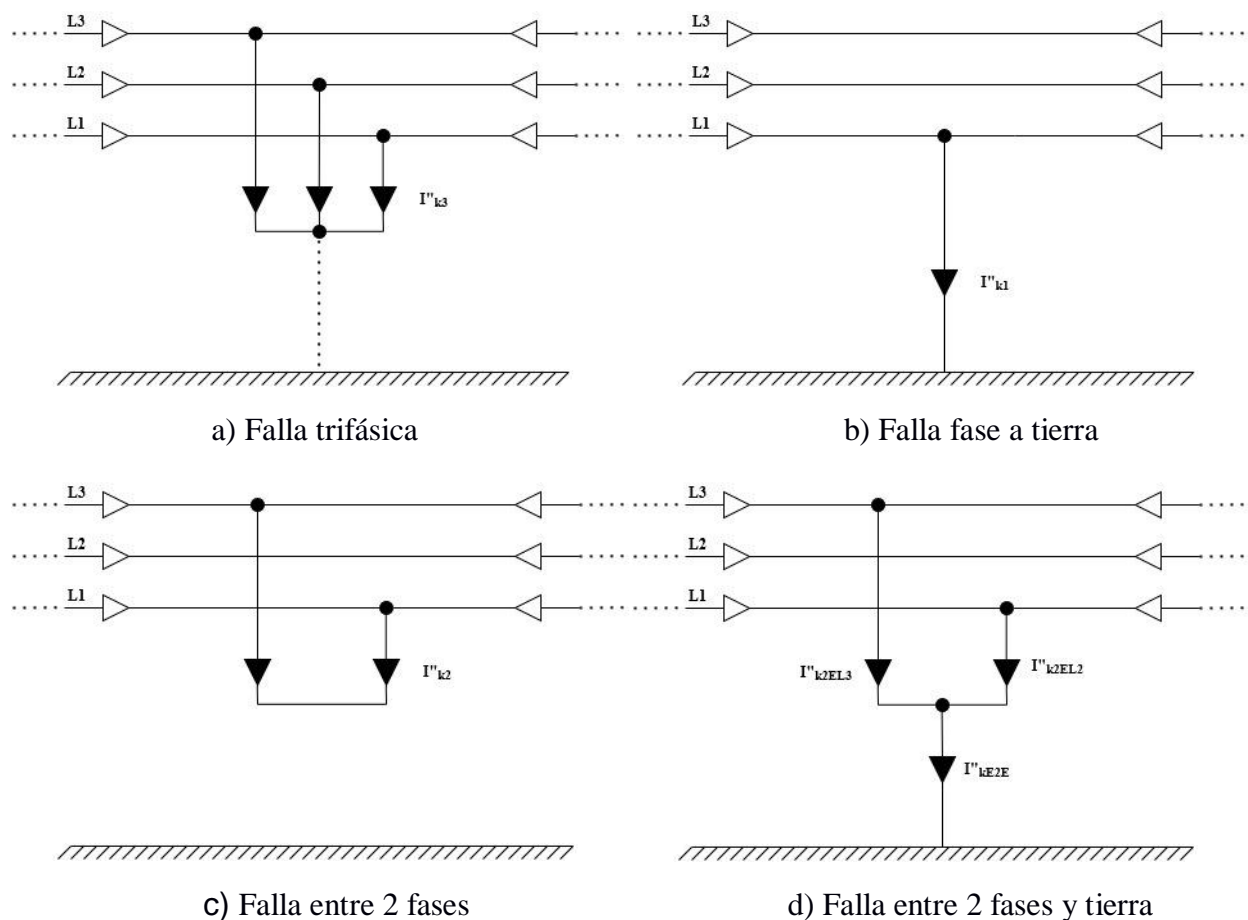
$$i = i_{dc\ decae} + i_{ac\ estado\ estable} + i_{ac\ decae}$$

1.4.3. Fallas eléctricas en una red.

Dentro del conjunto de fallas eléctricas, existen 2 tipos en específico las cuales son las fallas simétricas que son aquellas que provocan un mismo desbalance o alteración en los parámetros de cada una de las líneas de la red, y las fallas asimétricas que producen un desequilibrio en los parámetros de cada una de las fases de la red. Hay 4 tipos de fallas eléctricas muy comunes que pueden ocurrir en los sistemas de potencia las cuales son las fallas trifásicas que pertenece al grupo de fallas simétricas, falla de una fase a tierra, falla entre dos fases y falla entre dos fases y tierra. Estas tres últimas mencionadas pertenecen al grupo de fallas asimétricas debido a que se generarán diferentes valores de tensiones y corrientes entre las fases al momento de ocurrir el evento.

Figura 1.4

Fallas eléctricas en los sistemas de potencia [[3].



Las fallas trifásicas dentro de los sistemas de potencia son las más críticas que pueden existir, puesto que son las que presentan los más elevados valores de corriente de cortocircuito, pero suelen ocurrir con menor frecuencia debido a que es poco probable que se cortocircuiten las tres fases al mismo tiempo.

Las fallas entre 2 fases son perturbaciones que presentan una magnitud de corriente del 87% de la corriente de falla trifásica y suelen ocurrir mayormente por objetos u otro elemento que llega a tocar ambas líneas. Las fallas de 2 fases a tierra usualmente suelen ser fallas de una fase a

tierra que llegan a afectar a una segunda línea de la red, este tipo de fallas presentan una magnitud de corriente mayor al de las fallas entre 2 fases, pero menor a la falla trifásica.

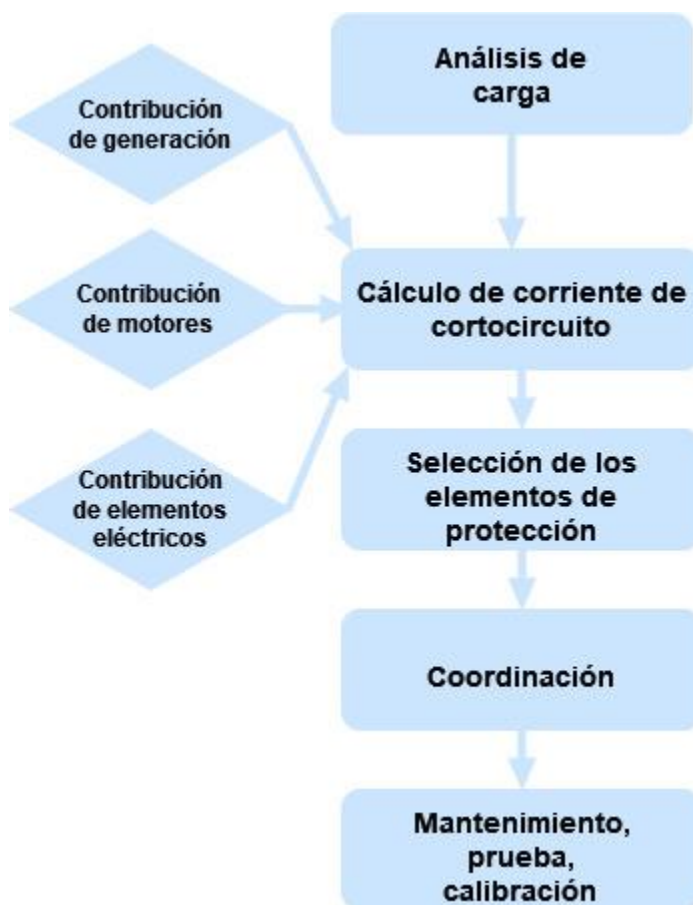
Las fallas de una fase a tierra son las más comunes en un sistema de potencia, este tipo de cortocircuito es el que menos efectos ocasiona a la red debido a que presenta la menor magnitud de corriente de cortocircuito, la magnitud de la corriente de falla de este tipo dependerá principalmente del tipo de sistema de aterrizaje a tierra y la impedancia de puesta a tierra [[2].

1.4.4. Requerimientos para un análisis de cortocircuito.

Un análisis de cortocircuito se basa en la determinación de las corrientes y voltajes de fallas que una red puede producir bajo varios casos de cortocircuito, con estos parámetros es posible la selección de los elementos de protección y el ajuste de los mismo. Para realizar un análisis de cortocircuito es necesario primero determinar la carga requerida incluyendo todos los tamaños, tipos y requerimientos especiales de cargas presentes para obtener un diagrama unifilar que modele el sistema. Se deberá obtener los parámetros de cortocircuito en el punto de entrega de la energía eléctrica, curvas y ajustes de tiempos de las protecciones aguas arriba y de cualquier restricción de ajuste que presente algún relé cerca del caso de estudio [[4].

Figura 1.4

Estructura de diseño de una coordinación de protecciones [4].



Los parámetros de cortocircuito de la red en el punto de entrega deberán cumplir con especificaciones detalladas de la red de distribución [[5], tales como:

- Máxima y mínima corriente monofásica y trifásica de cortocircuito momentánea (red de primer ciclo).
- Máxima y mínima corriente trifásica de la red de interrupción (1.5 ciclos a 8 ciclos).
- Máxima y mínima corriente trifásica de corto circuito de la red de 30 ciclos.
- Máxima y mínima corriente de falla de línea a tierra.

1.4.5. Metodología de solución para análisis de cortocircuito.

Existen muchos métodos para la determinación de corrientes de cortocircuito, cada uno de ellos se basa específicamente en el método de las componentes simétricas debido a que este puede trabajar con fases desbalanceadas [[4], las componentes simétricas son la representación de los parámetros trifásicos de la red en tres nuevos fasores simétricos balanceados. Las componentes de secuencia positiva denotado con el subíndice 1 presentan tres fasores de la misma magnitud desplazados 120° entre ellos y se encuentran con la misma secuencia de fase de los fasores originales. La secuencia negativa denotada por el subíndice 2 presenta tres fasores de la misma magnitud desplazados 120° entre ellos y se encuentran con una secuencia opuesta a los fasores originales y el fasor de secuencia cero denotado por el subíndice 0 presenta tres fasores de la misma magnitud con un desplazamiento de 0° entre ellos [[4].

$$V_{an} = V_{a1} + V_{a2} + V_{a0} \quad I_a = I_{a1} + I_{a2} + I_{a3} \quad (\text{ec. 1})$$

$$V_{bn} = V_{b1} + V_{b2} + V_{b0} \quad I_b = I_{b1} + I_{b2} + I_{b3} \quad (\text{ec. 2})$$

$$V_{cn} = V_{c1} + V_{c2} + V_{c0} \quad I_c = I_{c1} + I_{c2} + I_{c3} \quad (\text{ec. 3})$$

Así mismo cada elemento de la red eléctrica deberá ser expresado en sus componentes simétricas para poder aplicar el método, usualmente estos parámetros suelen ser datos de placa en las maquinas eléctricas y en los conductores, así mismo cada tipo de falla tendrá su representación mediante interconexiones en las redes de secuencia.

El principio fundamental en el cálculo de las corrientes de cortocircuito se encuentra en la ley de Ohm la cual explica que la corriente que fluye a través de una red eléctrica es proporcional a la división entre el voltaje aplicado y la impedancia de la red [[4].

$$I = \frac{E}{Z}$$

Una vez expresando nuestras tres redes de secuencia es importante realizar el cálculo de cortocircuito para ello se deben seguir tres pasos [[4].

- Generar una representación unifilar de la red de cada componente simétrica.
- Calcular la impedancia total y el voltaje desde la fuente hasta el punto de falla, también llamado circuito de Thévenin.
- Conociendo el voltaje de pre falla y aplicando la correcta interconexión de los circuitos de componentes simétrica, podemos aplicar la ley de Ohm para obtener nuestra corriente de cortocircuito.

1.4.6. Criterios para la selección de protecciones

Para realizar un estudio de protecciones debemos dividir el sistema eléctrico en varias zonas donde cada una debe contar con su propio esquema de protección. Para lograr un sistema eficiente de protección se deben tener en consideración las siguientes características [[1]:

- **Confiabilidad**

Esta característica hace referencia a que el sistema de protecciones no debería operar de forma errónea es decir que la protección debe tener la habilidad de accionar ante la presencia de una falla y asimismo no operar cuando no se presente alguna perturbación en el sistema evitando falsas alarmas.

- **Rapidez**

El dispositivo de protección empleado debe extinguir la falla lo suficientemente rápido para evitar daños en los equipos, este es un criterio muy importante que considerar cuando se selecciona el equipo encargado a operar en el sistema eléctrico.

- **Economía**

Para la selección de un equipo el factor económico es importante, por ello siempre se debe buscar un equilibrio entre eficiencia y rentabilidad, asimismo analizar el porcentaje de confiabilidad que dicho equipo proporcionara a la red.

- **Selectividad**

Un sistema de protección es pensado para trabajar por zonas, las cuales deben ser capaces que proteger todo el sistema eléctrico. Cuando una falla aparece en la red se necesita que la protección sea capaz de elegir y disparar exclusivamente los dispositivos de protección paralelos a la falla, discriminando las otras zonas a no ser que uno de los dispositivos no opere.

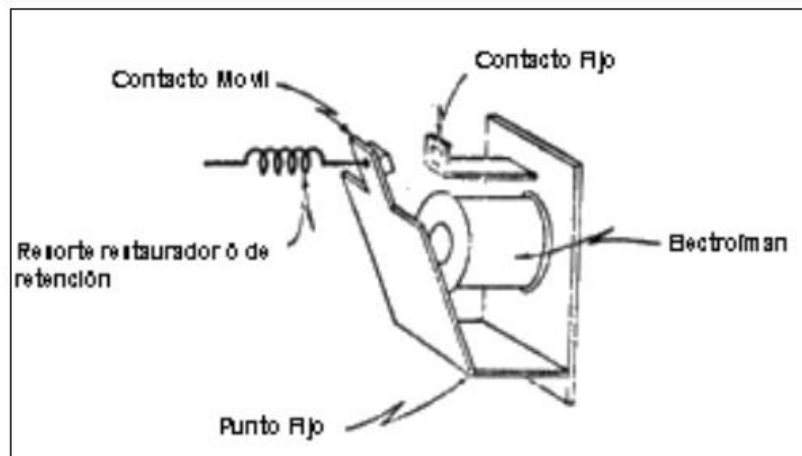
1.4.7. Tecnología de Relés

Inicialmente los relés fueron del tipo electromecánico, pero con el pasar del tiempo han ido mejorando y actualizándose por relés estáticos, numéricos y digitales, donde cada cambio ha traído consigo mejoras en la operación y reducción en sus tamaños. De igual forma los niveles de confiabilidad en los sistemas de potencia han mejorado, actualmente aún se sigue investigando tecnologías que permitan una respuesta más eficiente al momento de ocurrir una falla además de automatizar los sistemas por medio de inteligencia artificial para que las protecciones se adapten a los crecimientos de una red sin necesidad de estar constantemente modificando sus parámetros.

- **Relés electromecánicos**

Este tipo de relés fueron los primeros en emplearse en sistemas de potencia, su principio de funcionamiento se basa en una fuerza mecánica que ocasiona la operación de un contacto en respuesta a dicha fuerza.

Figura 1.4
Relé electromecánico.



- **Relés estáticos**

Este tipo de relés no posee partes móviles, su diseño está basado en la utilización de dispositivos electrónicos análogos en lugar de imanes o bobinas para generar la característica del relé. Inicialmente se empleaban elementos discretos como diodos, resistencias, condensadores, entre otras, pero los avances en la electrónica permitieron la utilización de circuitos integrados digitales para el procesamiento de señales y la posterior implementación de lógica de funciones.

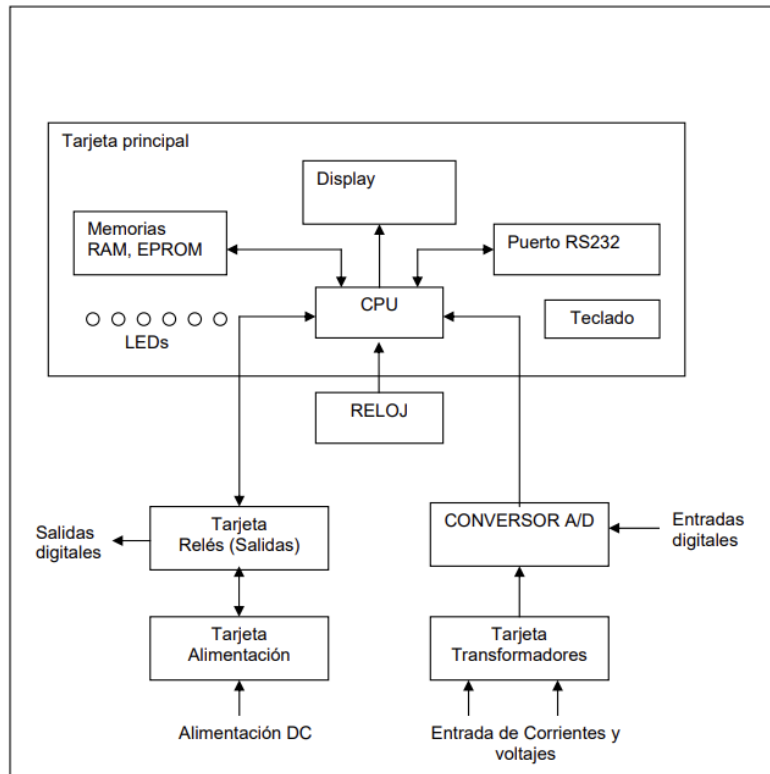
- **Relés numéricos y digitales:**

Este tipo de relés se emplean actualmente en sistemas de potencia e industrias, están constituidos por microprocesadores y microcontroladores para ejecutar funciones de relés,

asimismo disponen de convertidores de señales tanto analógicas como digitales, además de que disponen de un gran número de protecciones y funciones [[6].

Figura 1.4

Diagrama representativo de un relé numérico.



1.4.8. Protecciones eléctricas en distribución

Los relés dependen de parámetros eléctricos tales como voltaje, corriente, frecuencia, entre otras. Entre las protecciones que disponen para niveles de distribución tenemos los siguientes tipos:

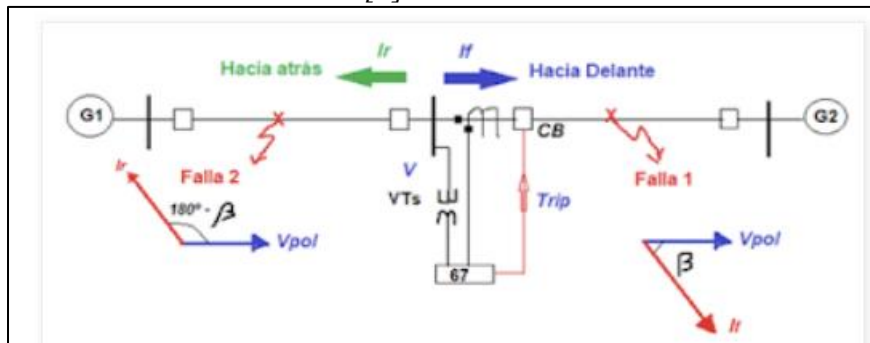
- **Sobre corriente direccional**

La protección de Sobre corriente direccional se representa por medio del número 67, su función es detectar un corriente de falla que circule en ambos sentidos dentro de un sistema, es decir ya sea hacia adelante o hacia atrás, dependiendo de cómo se parametrize en el equipo de

detección. Los parámetros requeridos para programar la protección son la corriente de umbral, el tiempo de temporización de actuación y la dirección de la corriente en estado normal previo a falla.

Figura 1.4

Protección de Sobre corriente direccional [7].

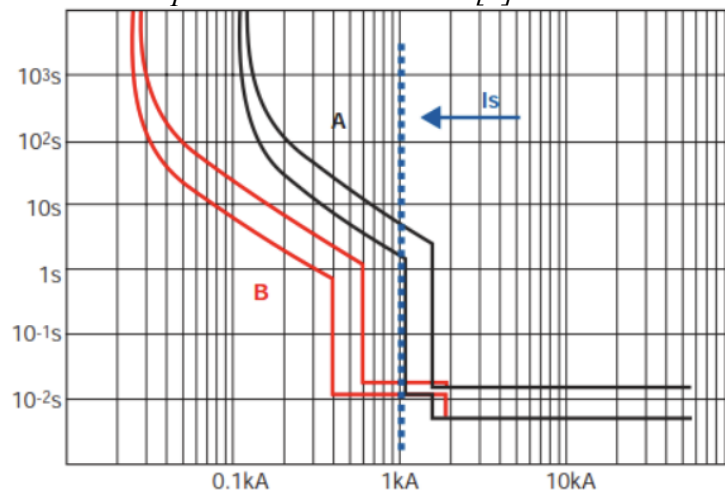


- **Sobre corriente temporizada o instantánea**

El funcionamiento de esta protección se basa en emplear la magnitud de corriente medida en un punto del sistema, debido a que, ante la presencia de una falla en la red, la corriente aumenta de forma considerable, lo cual genera que el relé opere y el tiempo de operación depende de los parámetros colocados en el sistema, dicho tiempo seleccionado define si la protección es temporizada o instantánea. Cabe recalcar que la protección de Sobrecorriente temporizada se representa por medio del número 51 mientras que la instantánea con el 50. Los parámetros por seleccionar y colocar en una protección de sobre corriente temporizada son el tipo de curva, la corriente de umbral y el retardo de tiempo. Por otro lado, para una instantánea solo se requiere la corriente límite y el tiempo de actuación el cual ronda por lo 0.01 s [[8].

Figura 1.4

Protección de Sobrecorriente temporizada e instantánea [9].

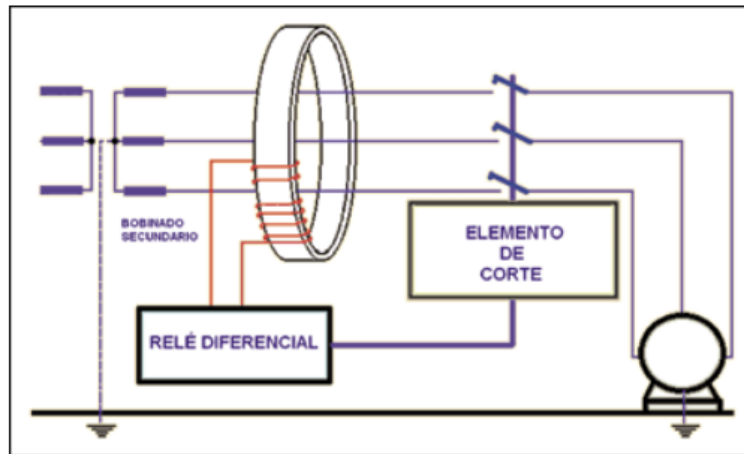


- **Diferencial de transformadores**

El principio de funcionamiento de esta protección se basa en comparar las corrientes del lado secundario de cada CT ubicado en el lado de alta tensión y el de baja tensión de un transformador principal. Esta protección se representa por medio del número 87T, para esta protección se debe considerar que las corrientes a la salida de ambos CT podrían no ser exactamente iguales por desfases entre las conexiones de cada lado del transformador, también de que al momento de energizar un transformador, la corriente de magnetización que se genera podría activar erróneamente la protección debido a que se la consideraría como una falla interna, sin embargo hoy en día los dispositivos de protección tienen la capacidad de solucionar los problemas anteriormente mencionados [10].

Figura 1.4

Protección diferencial de un transformador.

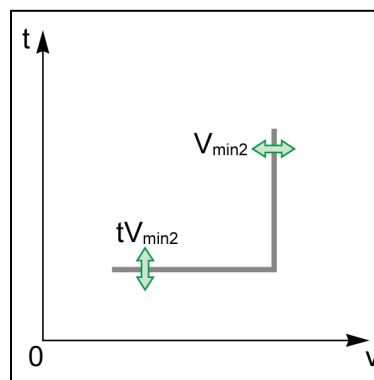


- **Protección de mínimo voltaje**

El principio de funcionamiento de esta protección se basa en establecer un valor mínimo de umbral de voltaje donde el valor de voltaje ya sea de la red o el equipo a proteger no se menor a dicho umbral. Esta protección se representa por medio del número 27 en el código ANSI, cabe recalcar que ciertos relés digitales tienen la capacidad de supervisar tanto de forma independiente como en conjunto las fases del sistema [[11].

Figura 1.4

Protección de mínimo voltaje.



Capítulo 2

2. Metodología

La metodología aplicada a nuestro caso de estudio se basó en el hecho de mejorar la información presente en la estación de bombeo “La Toma”, ya que necesitan urgentemente actualizar los datos de todo su sistema eléctrico y tener un respaldo del mismo debido a que durante los años estos datos se han ido perdiendo, además de mejorar los ajustes de protecciones de las estaciones de bombeo dos y tres que recientemente han presentado problemas por mala actuación los relés de protección y disyuntores, con el fin de brindar mayor seguridad y empezar con el proceso de actualización. Por lo tanto, se realizó un estudio de cortocircuito para posteriormente coordinar las protecciones de los elementos más críticos y primordiales que son los motores de esta y que sin ellos la planta no podría operar.

2.1. Levantamiento de carga

Se realizaron varias visitas a la planta de bombeo con el fin de empezar con un levantamiento de datos de cada uno de los equipos y cargas que conforman a la estación de bombeo “La Toma” y la configuración de todo su sistema. Esta red cuenta con un total de 20 bombas entre verticales y horizontales que son alimentados mediante 4 transformadores de potencia de 12.5MVA y 16MVA directamente conectados a la barra de 69kV de la subestación pascuales. El sistema de bombeo se divide entre 4 estaciones de bombeo siendo la estación 4 la más reciente y la de mayor potencia de la red, esta presenta los equipos más nuevos las cuales son las bombas en disposición vertical, a continuación, en las tablas 2.1 y 2.2 se presentan las características de la estación de bombeo 4.

Tabla 2.1*Características de los transformadores de EB4.*

Transformadores de EB4					
Nombre del transformador	Potencia (MVA)	Tensión primaria (kV)	Tensión secundaria (kV)	Conexión de los devanados	Impedancia de secuencia (%)
TR1-101	16	69	13.8	Dyn11	7
TR2-102	16	69	13.8	Dyn11	7

Tabla 2.1*Características de los motores de EB4.*

Bombas de EB4						
Nombre del motor	Potencia (kW)	Tensión (kV)	Factor de potencia	Eficiencia (%)	Velocidad (rpm)	Conexión de las bobinas
Grupo #1A	2400	13.8	0.892	95.1	1185	Y
Grupo #2A	2400	13.8	0.892	95.1	1185	Y
Grupo #3A	2400	13.8	0.892	95.1	1185	Y
Grupo #4A	2400	13.8	0.892	95.1	1185	Y
Grupo #5A	2400	13.8	0.892	95.1	1185	Y
Grupo #6A	2400	13.8	0.892	95.1	1185	Y
Grupo #7A	2400	13.8	0.892	95.1	1185	Y
Grupo #8A	2400	13.8	0.892	95.1	1185	Y

Las estaciones de bombeo 1, 2 y 3 son las más antiguas dentro de la planta, estas estaciones presentan un total de 12 bombas en disposición horizontal. La estación de bombeo 1 está conformada por un total de 4 grupos de bombeo a 4160V que se encuentran conectados a una barra

común y se alimentan mediante el transformador de potencia TR1. A continuación, en las tablas 2.3 y 2.4 se presentan las características de EB1.

Tabla 2.1

Características de los transformadores de EB1.

Transformador de EB1					
Nombre del transformador	Potencia (MVA)	Tensión primaria (kV)	Tensión secundaria (kV)	Conexión de los devanados	Impedancia de secuencia (%)
TR1	12.5	69	4.16	Dyn1	7.15

Tabla 2.1

Características de los motores de EB1.

Bombas de EB1						
Nombre del motor	Potencia (kW)	Tensión (kV)	Factor de potencia	Eficiencia (%)	Velocidad (rpm)	Conexión de las bobinas
Grupo 1	932.5	4.16	0.8	94.2	895.2	Y
Grupo 2	932.5	4.16	0.8	94.2	895	Y
Grupo 3	932.5	4.16	0.8	94.2	893	Y
Grupo 4	932.5	4.16	0.8	94.2	893	Y

La estación de bombeo 2 está conformada por un total de 5 grupos de bombeo en disposición horizontal a 4160V y son alimentados por el transformador de potencia TR2. A continuación, en las tablas 2.5 y 2.6 se presentan las características de EB2.

Tabla 2.1*Características de los transformadores de EB2.*

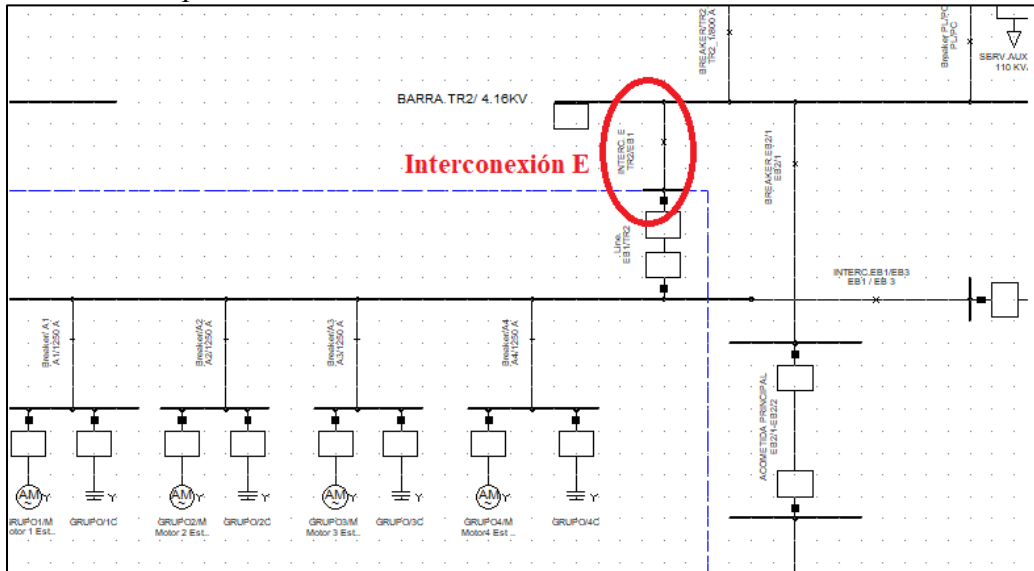
Transformador de EB2					
Nombre del transformador	Potencia (MVA)	Tensión primaria (kV)	Tensión secundaria (kV)	Conexión de los devanados	Impedancia de secuencia (%)
TR1	12.5	69	4.16	Dyn1	6.17

Tabla 2.1*Características de los motores de EB2.*

Bombas de EB2						
Nombre del motor	Potencia (kW)	Tensión (kV)	Factor de potencia	Eficiencia (%)	Velocidad (rpm)	Conexión de las bobinas
Grupo 5	932.5	4.16	0.8	94.2	894	Y
Grupo 6	931.25	4.16	0.81	94.2	900	Y
Grupo 7	931.25	4.16	0.83	94.2	889	Y
Grupo 8	931.25	4.16	0.81	94.2	900	Y
Grupo 9	931.25	4.16	0.81	94.2	900	Y

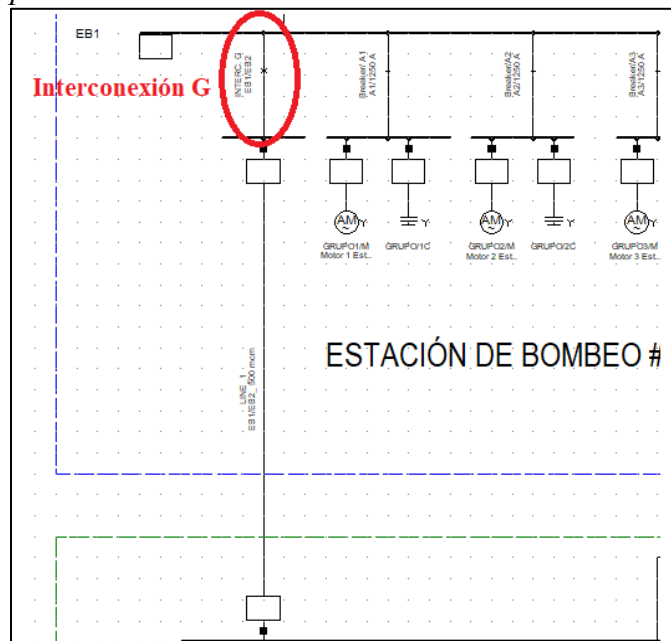
Cabe mencionar que existen interconexiones dentro de estos dos grupos de bombeo en caso de que se necesiten realizar mantenimientos o existan fallas eléctricas en la red con el fin de que los grupos de bombeo se mantengan operativos ante cualquier adversidad, puesto que si uno de estos llega a fallar se interrumpirá el servicio de agua potable dentro de la ciudad de Guayaquil, lo cual ocasionaría grandes pérdidas a Interagua y desconformidades a los usuarios. En caso de que el TR1 salga de operación existe la interconexión E la cual nos permite alimentar la barra de EB1 mediante el transformador TR2.

Figura 2.1
Interconexión E de la planta "La Toma".



En caso de que salga el transformador TR2 por algún problema o por mantenimiento, se tiene la interconexión G la cual permite alimentar la barra de EB2 mediante el transformador TR1.

Figura 2.1
Interconexión G de la planta "La Toma".

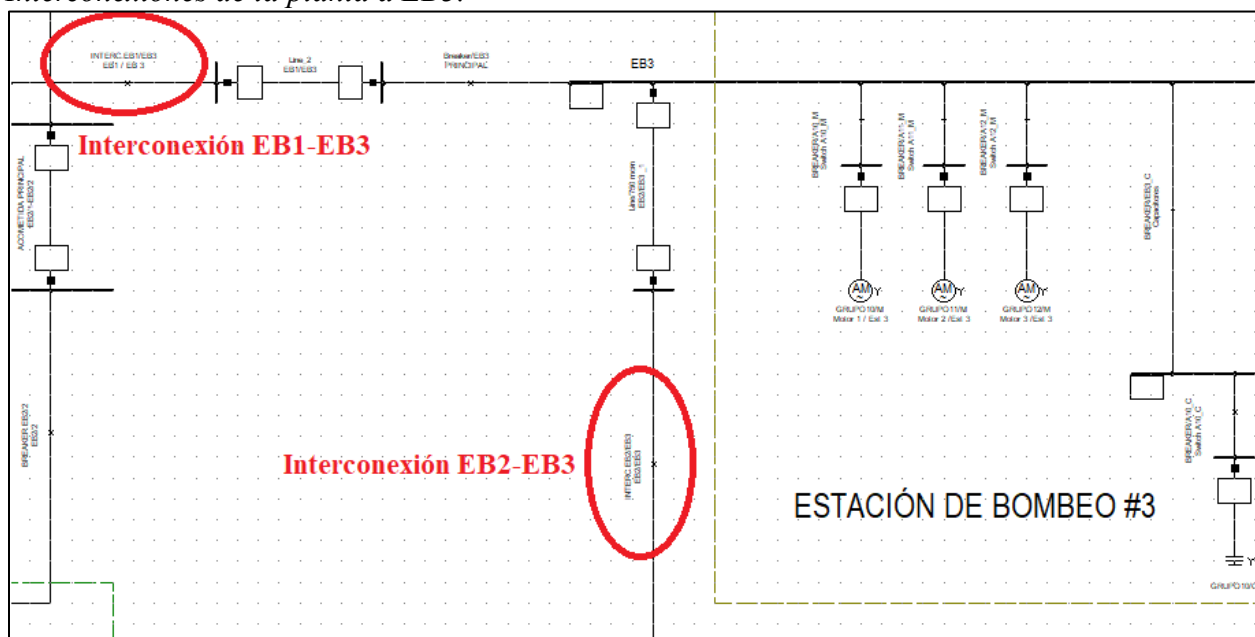


La estación de bombeo 3 se conforma por 3 grupos de bombeo en disposición horizontal a 4160V, esta estación no cuenta con un transformador de potencia específico que alimente a su grupo de bombeo, para ello esta cuenta interconexiones tanto con EB1 y EB2 para energizar su sistema, usualmente esta se encuentra operando con la interconexión con EB2. A continuación, se presentan en la Tabla 2.7 las características de EB3.

Tabla 2.1
Características de los motores de EB3.

Bombas de EB3						
Nombre del motor	Potencia (kW)	Tensión (kV)	Factor de potencia	Eficiencia (%)	Velocidad (rpm)	Conexión de las bobinas
Grupo 10	920	4.16	0.85	94.2	894	Y
Grupo 11	920	4.16	0.85	94.2	894	Y
Grupo 12	920	4.16	0.8	94.2	894	Y

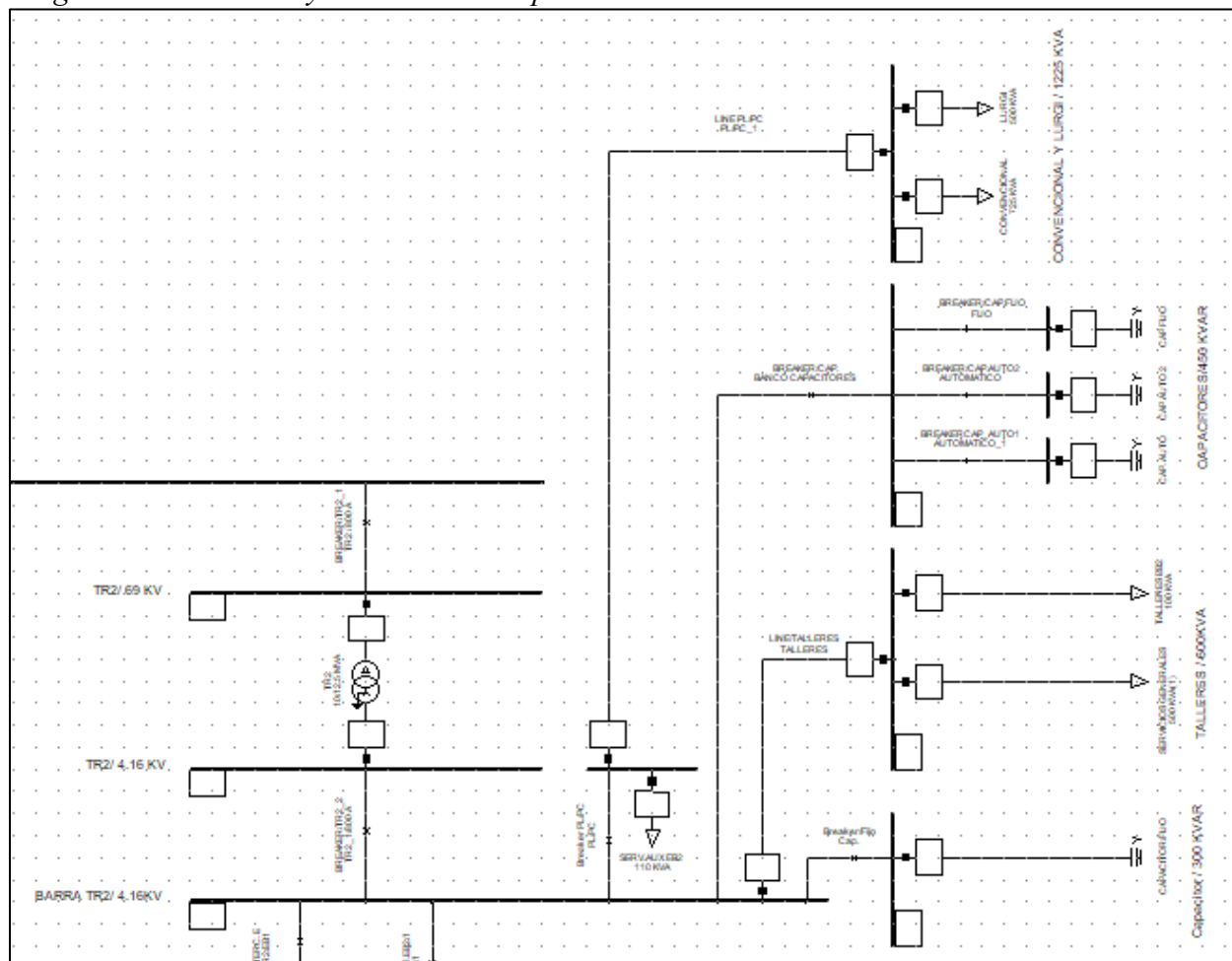
Figura 2.1
Interconexiones de la planta a EB3.



Adicionalmente, se tienen cargas distribuidas en todo el sistema que pertenecen a cargas convencionales, servicios generales o cargas fijas, estas también se tomaron en cuenta en el modelo para así tener un margen de error más pequeño entre el sistema real y el simulado.

Figura 2.1

Cargas convencionales y auxiliares de la planta "La Toma".



Para finalizar el levantamiento de equipos, también se tomaron medidas de las distancias y características de las líneas que conectan cada una de las estaciones, así también como capacidad de los bancos de capacitores para cada grupo de bombeo, corriente y características de interrupción de cada interruptor de la red; y potencias de cortocircuito en el punto de entrega de energía con el fin de realizar un modelo completo y lo más cercano a lo real de la red.

2.2. Modelo de la red en DigSilent Power Factory

Con los datos proporcionados por la empresa Interagua, se realizó el modelo de la red de la estación de bombeo “La toma”, y con ello proceder a realizar los estudios de cortocircuito y coordinación de protecciones.

Figura 2.2
Red de la planta "La Toma" en DigSilent.

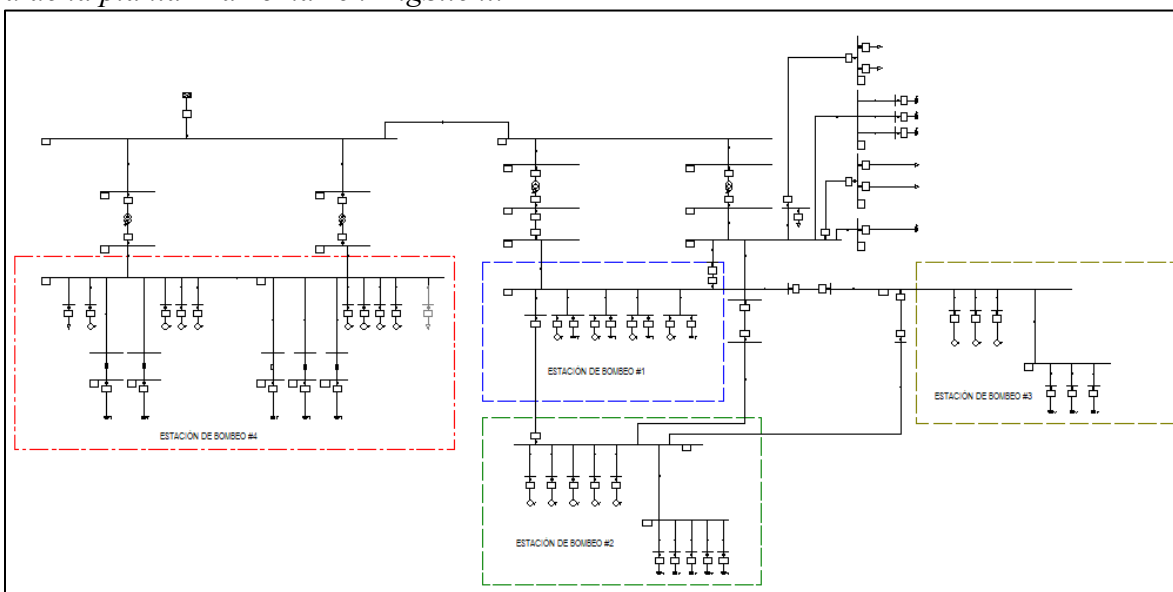


Figura 2.2
Modelo de la estación de bombeo 4.

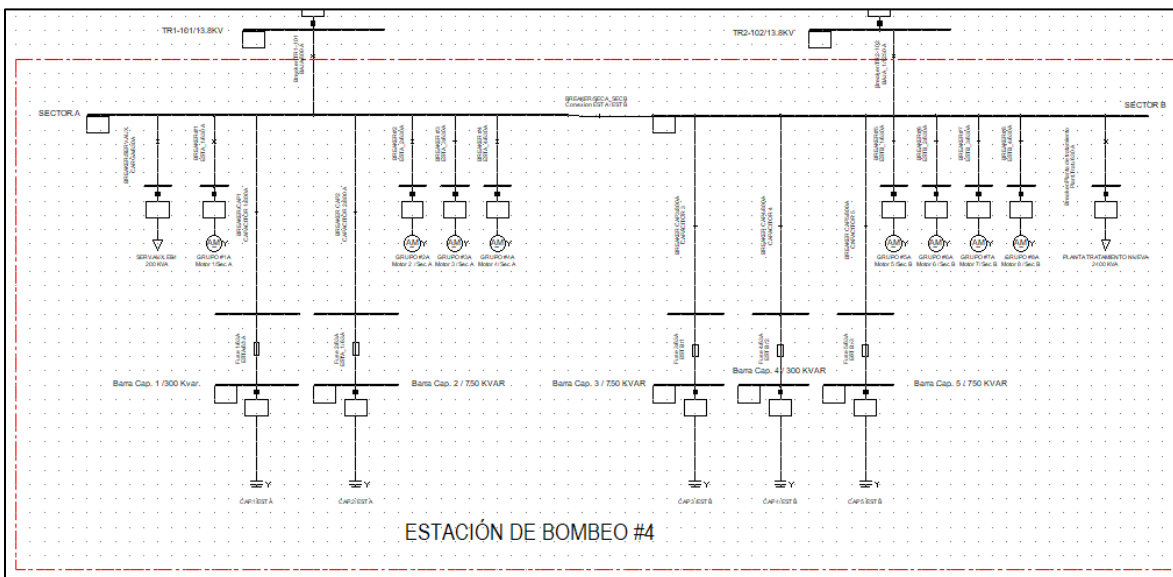


Figura 2.2
Modelo de la estación de bombeo 1.

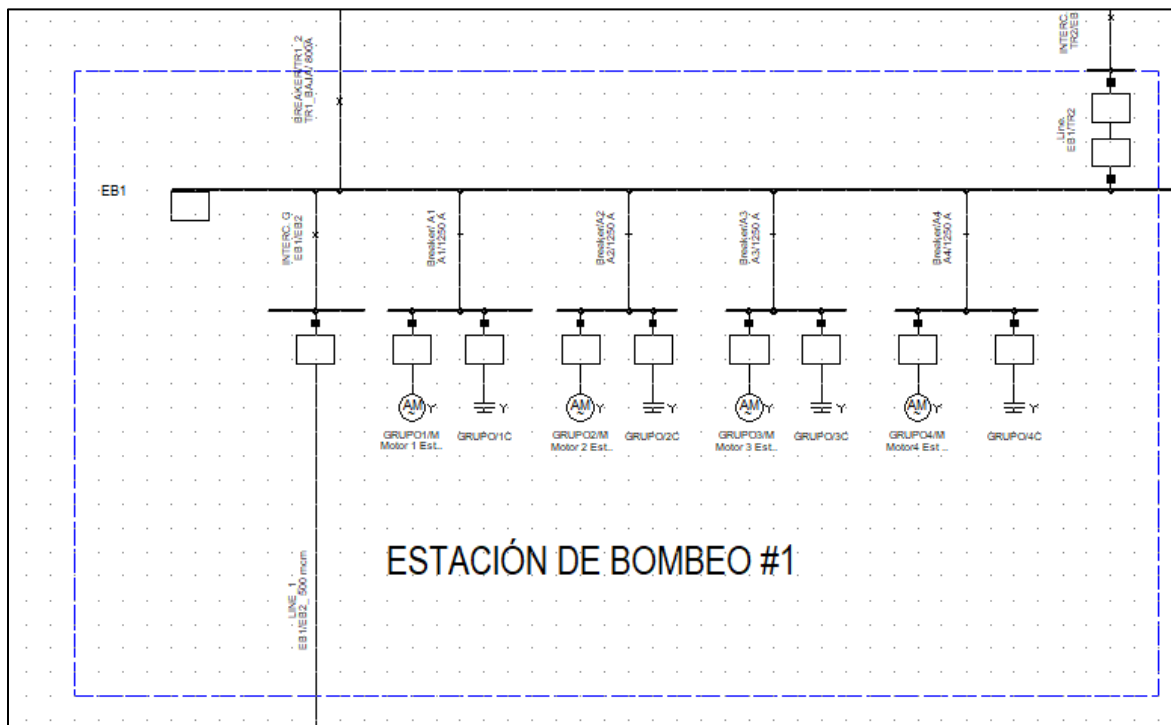


Figura 2.2
Modelo de la estación de bombeo 2.

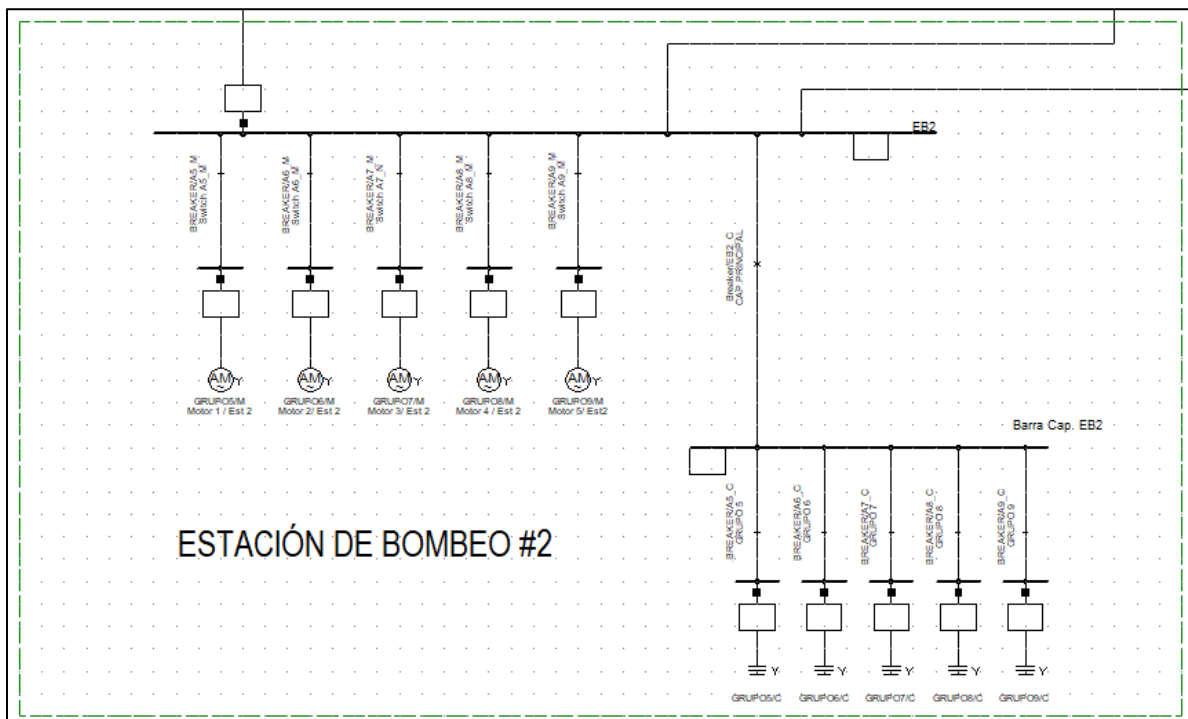
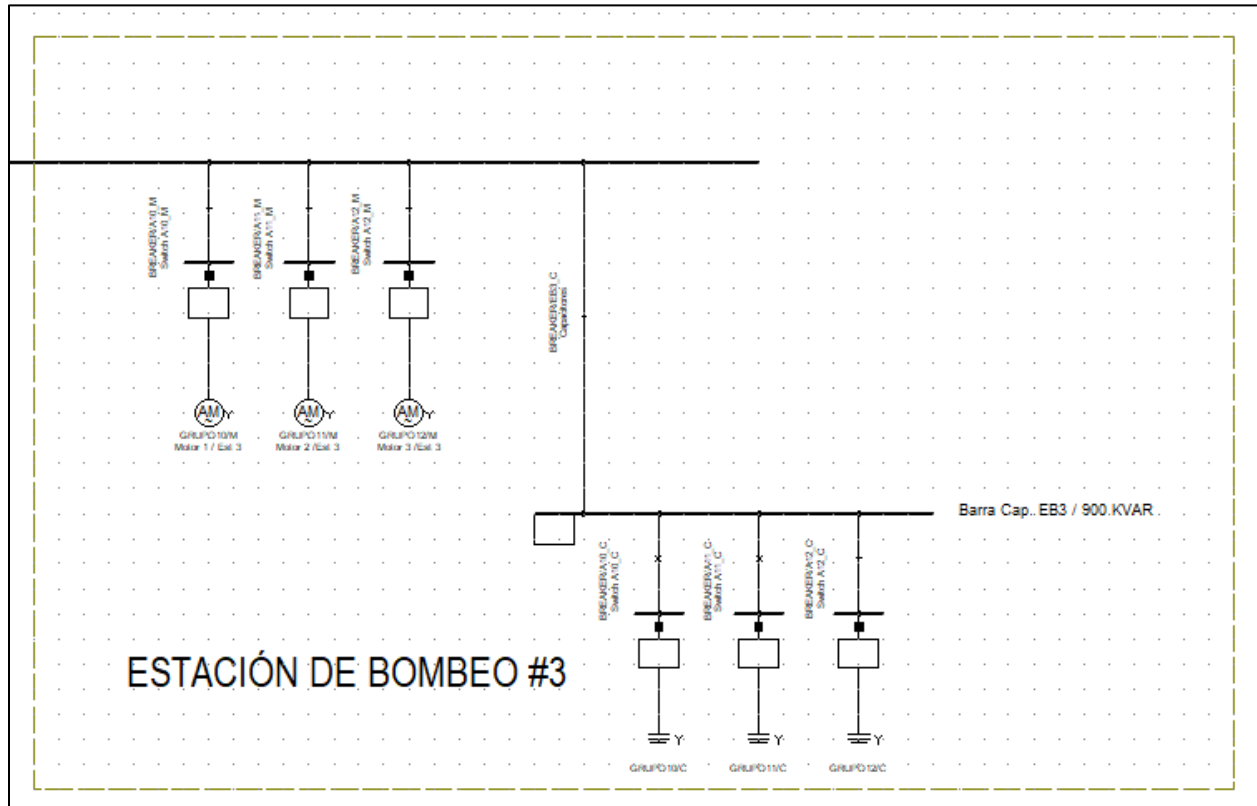


Figura 2.2*Modelo de la estación de bombeo 3.*

Para nuestro caso de estudio nos vamos a enfocar principalmente en las estaciones de bombeo 2 y 3, estas estaciones son una de las más antiguas dentro de la planta y sus grupos de bombeo no han sido reemplazados durante años, a pesar de ello, ambas estaciones son las que mayormente se tienen en operación puesto que son de las más seguras y eficientes a la hora de trabajar en conjunto con la estación de bombeo 4.

Ambas estaciones presentan un grave problema a la hora de operar sus protecciones eléctricas, debido a que en su coordinación se presentan sus parámetros de operación muy ajustados y por lo tanto algunas veces estas pueden activarse cuando no es requerido perdiendo seguridad en el sistema. Este caso sucede frecuentemente cuando alguna de las grandes subestaciones de la ciudad de Guayaquil como Trinitaria, Caraguay, entre otras, tienen algún tipo

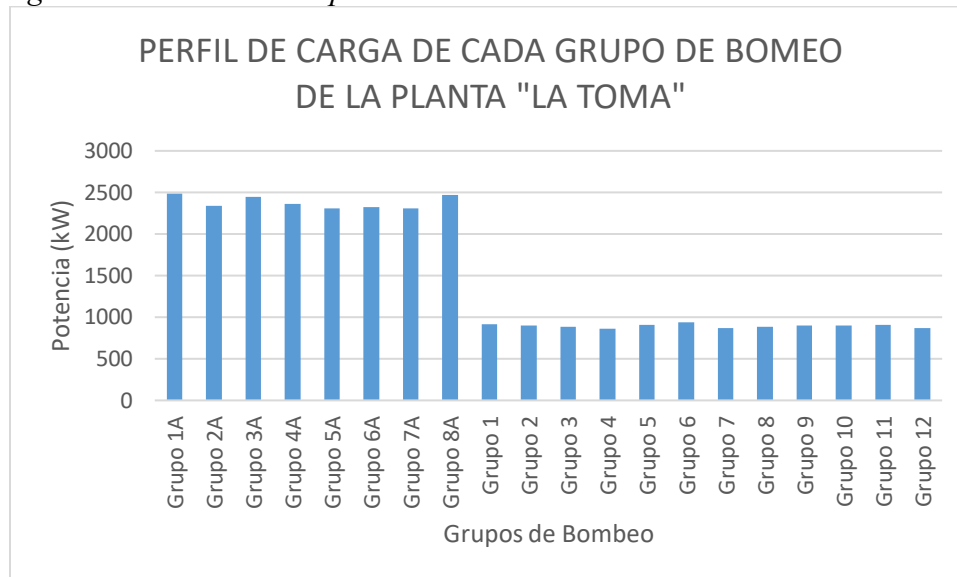
de falla; ya que, al ser este sistema de protecciones muy sensible ante perturbaciones, los transitorios que generan esas fallas son percibidos por las protecciones de las estaciones de bombeo 2 y 3 provocando el funcionamiento tanto de los relés como los disyuntores y deteniendo los grupos de bombeo. Esto genera fatiga para el usuario que consume agua potable y para los trabajadores de la planta, puesto que las maniobras de activación de los grupos de bombeo deben ser monitoreadas y controladas para no sobrecargar la red. Es por ello que el enfoque de nuestro estudio se basará en las estaciones de bombeo 2 y 3, ya que es imperativo una nueva coordinación de protecciones que evite los problemas mencionados.

2.3. Análisis de carga.

Antes de poner en operación la red modelada es necesario analizar la carga y la frecuencia a los equipos eléctricos que trabajan para tener una referencia de la carga que opera normalmente al momento de realizar el estudio de cortocircuito, para ello se tomaron los datos de operación de cada grupo de bombeo en un periodo de 3 meses, con el fin de ser más preciso a la hora de realizar los análisis de cortocircuito de la red. Primero, se realizó un perfil de carga mostrado en la Figura 2.10, donde se puede observar la potencia promedio a la que trabaja cada grupo de bombeo cuando estos se encuentran en operación. Esta potencia promedio es muy cercana al valor nominal de cada grupo de bombeo puesto que siempre se trata de mantener un flujo y un caudal de agua constante hacia la planta de tratamiento de agua.

Figura 2.3

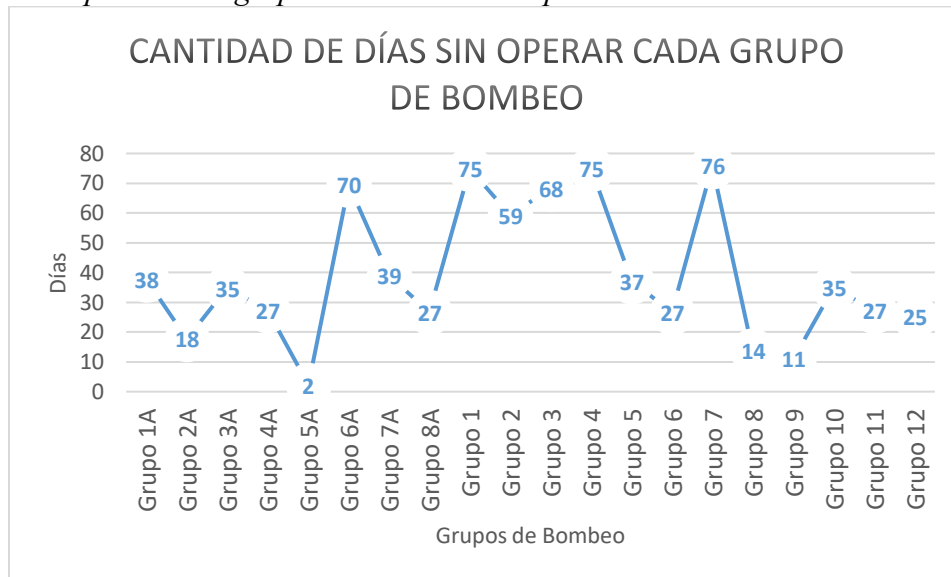
Perfil de carga de las bombas de la planta "La Toma".



Así también se realizó un análisis de las maquinas que menos han trabajado en los últimos meses, mostrado en la Figura 2.11, observando así los días totales en los que no han operado cada grupo de bombeo en un periodo de 90 días, donde los grupos 1, 2, 3 y 4 pertenecientes a la estación de bombeo 1 son los que menos operaron debido a que actualmente se encuentran en mantenimiento y en proceso de cambio por la antigüedad de los equipos. Por otro lado, los demás grupos de bombeos pertenecientes a las estaciones de bombeo 2, 3 y 4 son las que más operan en la red; esto nos ayudó a corroborar de que las estaciones 2 y 3 a estudiar son las que más se encuentran trabajando y las que más problemas pueden sufrir debido a la mala coordinación de protecciones que se dispone y eventos externos a la red, poniendo en riesgo la seguridad de la planta.

Figura 2.3

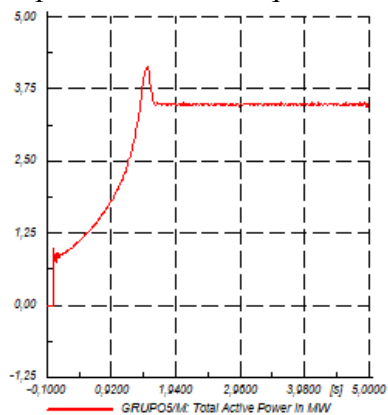
Días totales sin operar cada grupo de bombeo en un periodo de 3 meses.



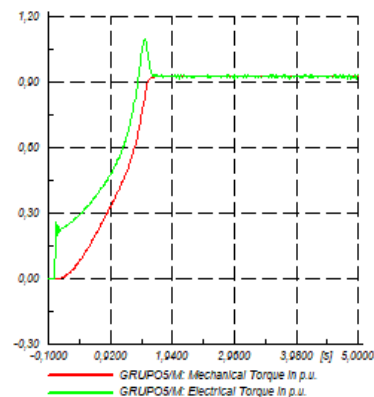
Se analizó también las características de la máquina al momento de ser puesta en operación, esto nos ayudó al momento de coordinar las protecciones eléctricas, puesto que es necesario que estas no operen durante el arranque de las máquinas. En la Figura 2.12 se pueden observar las curvas de potencia del motor presente en las estaciones de bombeo donde se muestra el comportamiento de la máquina durante todo el arranque; así también en la Figura 2.13 se presentan las características de dicho arranque de la máquina donde se observó que la corriente de arranque llega a ser de 1.449 [kA] durante 1.73 [s]. Este es un tiempo muy prolongado lo cual puede accionar las protecciones si estas tienen un ajuste de corriente menor a la corriente de arranque. Durante las visitas realizadas a la estación de bombeo se explicó que la corriente de arranque dependía de la marea y la turbiedad del agua y que esta puede variar entre 500 a 800 [A] en condiciones de baja carga, así también se obtuvo el perfil del voltaje de arranque en la Figura 2.14 que servirá al momento de la coordinación de la protección de bajo voltaje, puesto este nos presenta los límites de operación de voltaje de la máquina que se dispone en la planta.

Figura 2

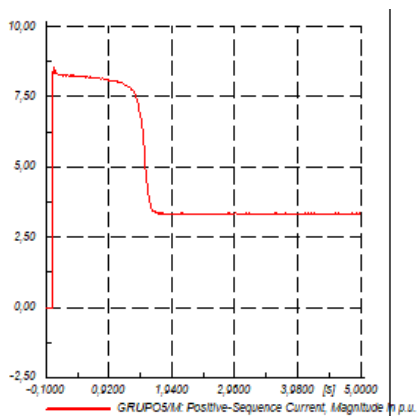
Curvas de potencia de la máquina de inducción.



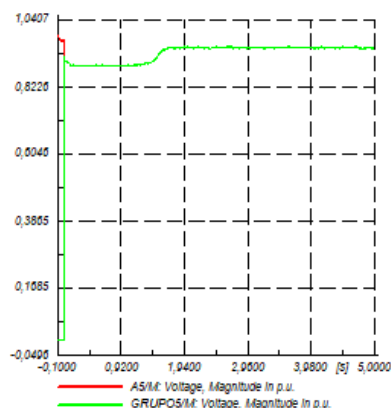
a) Potencia activa en MW



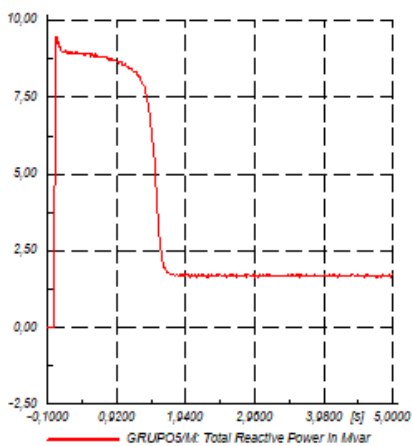
b) Torque mecánico en pu.



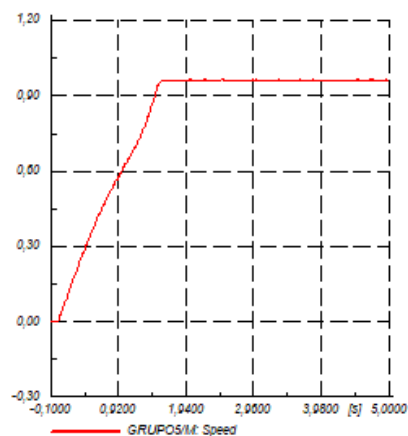
c) Corriente de secuencia positiva.



d) Magnitud de voltaje en pu.



e) Potencia reactiva en MVar.



f) Velocidad de la máquina.

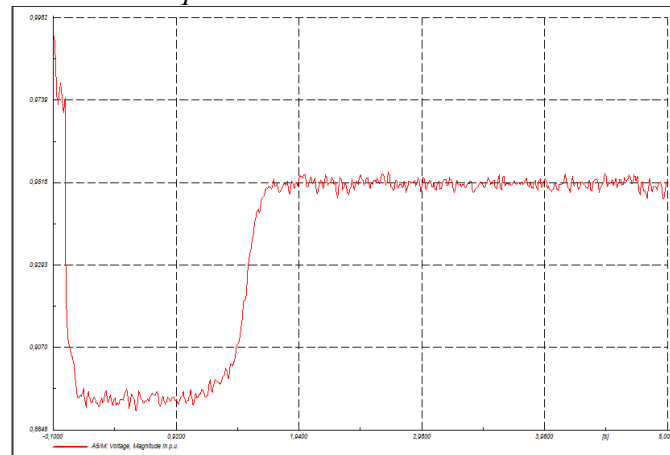
Figura 2

Perfil de operación en el arranque de la máquina de inducción.

Motor Name	Terminal Name	Terminal Voltage Before Starting (p.u.)	Motor Voltage Minimum on Starting (p.u.)	Motor Voltage After Starting (p.u.)	Starting Current (kA)	Starting P.F. (p.u.)	Successful Start?	Approx. Starting Time (s)
GRUPOS/M	A5/M	0,991	0,890	0,952	1,449	8,543	Yes	1,713

Figura 2

Perfil de voltaje de operación de la máquina de inducción.



2.4. Análisis de Cortocircuito.

El software de simulación DigSilent presenta varias normativas y estándares a la hora de poder realizar estudios de cortocircuito, una de ellas y de las más utilizadas es la normativa IEC 60909, la cual es una norma aplicada a estudios y cálculos de corrientes de cortocircuito en sistemas AC de bajo y alto voltaje, esta normativa puede ser aplicada tanto a sistemas balanceados y desbalanceados y consta de un proceso de cálculo general, práctico y conciso con una precisión aceptable con respecto a los resultados que se obtienen. Los cálculos de cortocircuitos aplicados en la norma IEC 60909 están basados en componentes simétricas debido a la versatilidad del método a la hora de trabajar con sistemas de potencia, la norma permite realizar análisis de fallas trifásicas, línea a línea, línea a neutro, bifásica a neutro y fallas múltiples, además que esta permite

trabajar con cualquier tipo de características que tenga el sistema considerando todas las condiciones del equipo como transformadores de tres devanados, transformadores multi-taps, unidades eólicas, entre otras.

Las corrientes de fallas que se necesitan a la hora de realizar un estudio de cortocircuito son aquellos que delimitan a dicha corriente, es decir, la corriente máxima y mínima de cortocircuito. La corriente máxima de cortocircuito determina la capacidad de los elementos eléctricos de la red y la corriente mínima de cortocircuito es la base para la selección de fusibles, configuración de protecciones eléctricas y comprobación del arranque de motores. Estos 2 parámetros son de vital importancia a la hora de coordinar las protecciones de la red, además, nos establecerán los límites a la hora de realizar los arranques de los motores y observar si estos pueden llegar a activar las protecciones.

Las fallas trifásicas se las suele asociar como las fallas más críticas que pueden suceder en una red, por lo que su magnitud de corriente es la más elevada dentro del conjunto de perturbaciones eléctricas; por otro lado, las fallas de una fase a tierra o las fallas de línea a línea suelen ser las de menor magnitud de corriente, esto dependerá del tipo de red y las impedancias que estén conectadas en el sistema, es por ello que se realizaron estos 3 casos de cortocircuito a cada una de las barras de los grupos de bombeo de las estaciones 2 y 3 con el fin de obtener los límites de corriente de cortocircuito que son útiles y necesarias en el proceso de coordinación de protecciones. A continuación, se mostrarán los resultados obtenidos en el estudio de cortocircuito para cada motor.

- **Grupo de Bombeo 5**

Tabla 2

Corrientes de cortocircuito en la barra del Grupo 5.

Fases	Falla 3 ϕ			Falla 1 ϕ -1 ϕ		Falla 1 ϕ -T	
	$ Ik'' $ [kA]	$ Ip $ [kA]	$ Ik $ [kA]	$ Ik'' $ [kA]	$ Ip $ [kA]	$ Ik'' $ [kA]	$ Ip $ [kA]
Fase A	33.68	83.68	19.07	0	0	28.66	71.19
Fase B	33.68	83.68	19.07	29.16	72.44	0	0
Fase C	33.68	83.68	19.07	29.16	72.44	0	0

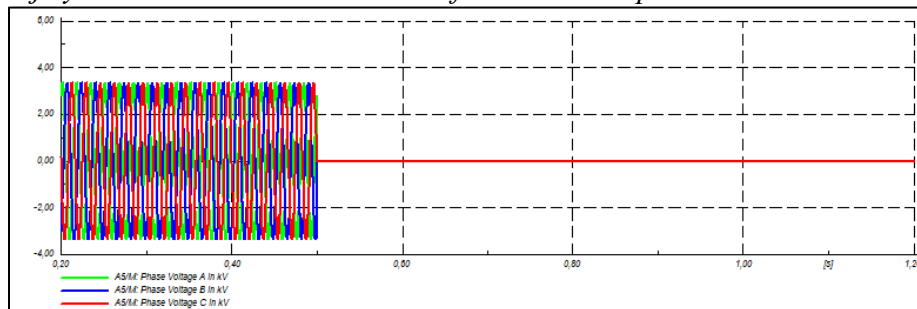
Tabla 2

Corrientes de cortocircuito en los terminales del Grupo 5.

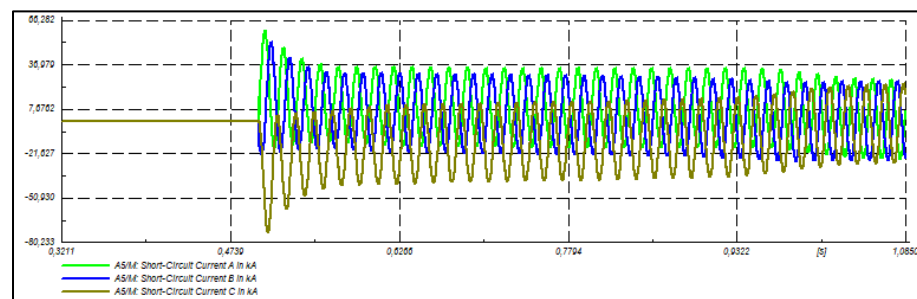
Fases	Falla 3 ϕ		Falla 1 ϕ -1 ϕ		Falla 1 ϕ -T	
	$ Ik'' $ [kA]	$ Ip $ [kA]	$ Ik'' $ [kA]	$ Ip $ [kA]	$ Ik'' $ [kA]	$ Ip $ [kA]
Fase A	1.73	4.29	0	0	0.98	2.43
Fase B	1.73	4.29	1.50	3.72	0.49	1.22
Fase C	1.73	4.29	1.50	3.72	0.49	1.22

Figura 2

Curva de voltaje y corriente de cortocircuito trifásica del Grupo 5.



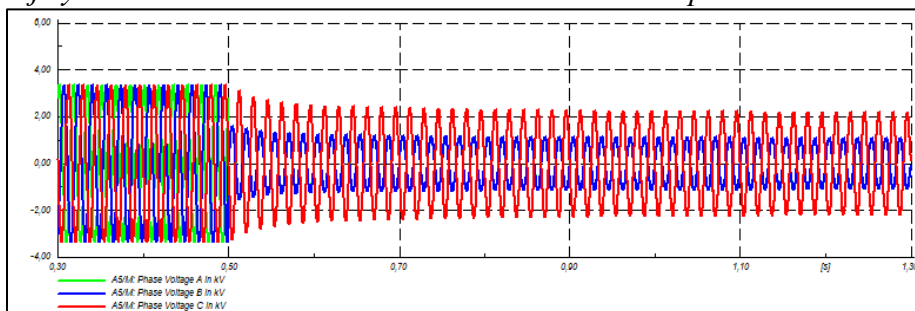
a) Curva de voltaje de falla.



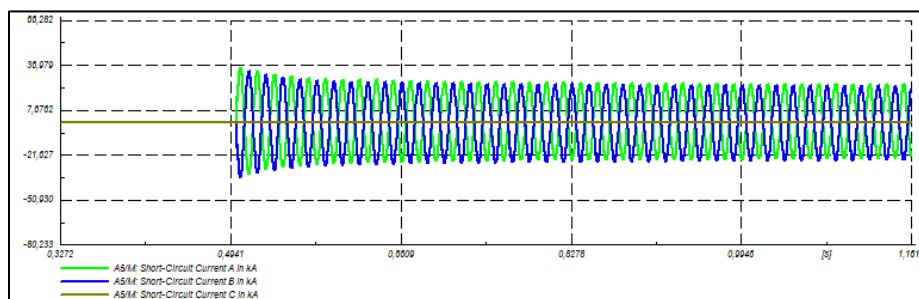
b) Curva de corriente de falla.

Figura 2

Curva de voltaje y corriente de cortocircuito línea a línea del Grupo 5.



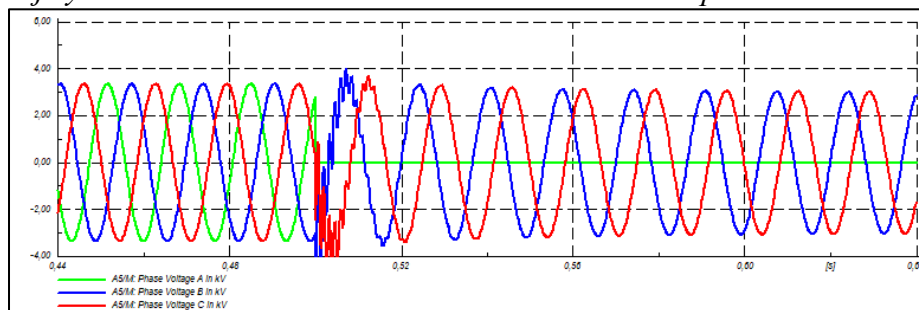
a) Curva de voltaje de falla.



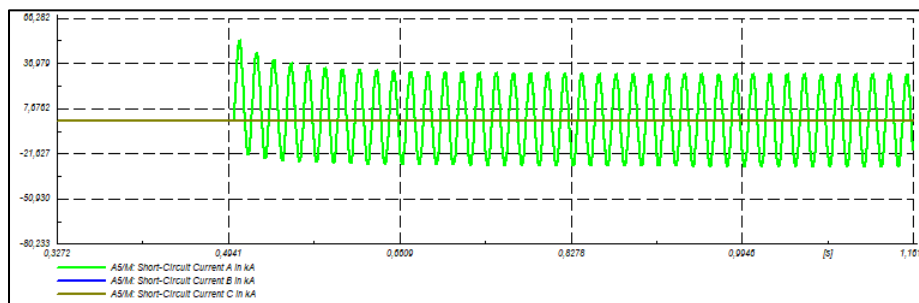
b) Curva de corriente de falla.

Figura 2

Curva de voltaje y corriente de cortocircuito línea a tierra del Grupo 5.



a) Curva de voltaje de falla.



b) Curva de corriente de falla.

- **Grupo de Bombeo 6**

Tabla 2

Corrientes de cortocircuito en la barra del Grupo 6.

Fases	Falla 3 ϕ			Falla 1 ϕ -1 ϕ		Falla 1 ϕ -T	
	$ Ik'' $ [kA]	$ Ip $ [kA]	$ Ik $ [kA]	$ Ik'' $ [kA]	$ Ip $ [kA]	$ Ik'' $ [kA]	$ Ip $ [kA]
Fase A	33.68	83.68	19.07	0	0	28.66	71.19
Fase B	33.68	83.68	19.07	29.16	72.44	0	0
Fase C	33.68	83.68	19.07	29.16	72.44	0	0

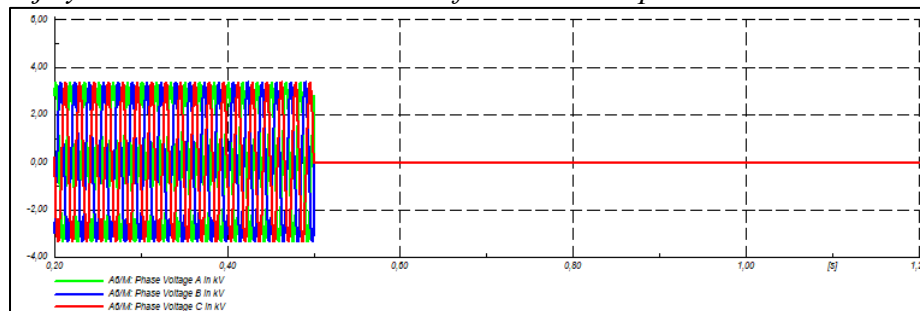
Tabla 2

Corrientes de cortocircuito en los terminales del Grupo 6.

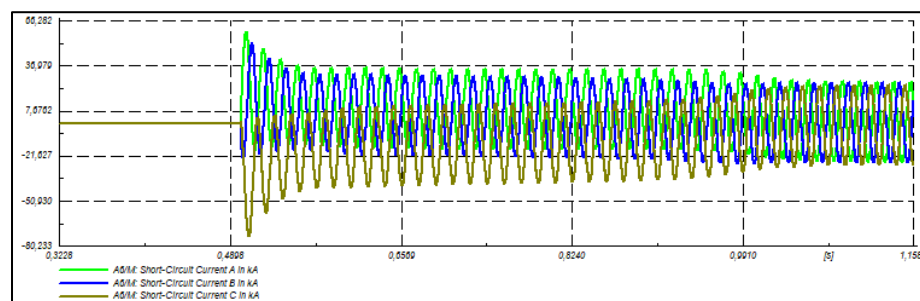
Fases	Falla 3 ϕ		Falla 1 ϕ -1 ϕ		Falla 1 ϕ -T	
	$ Ik'' $ [kA]	$ Ip $ [kA]	$ Ik'' $ [kA]	$ Ip $ [kA]	$ Ik'' $ [kA]	$ Ip $ [kA]
Fase A	1.73	4.29	0	0	0.98	2.43
Fase B	1.73	4.29	1.49	3.71	0.49	1.22
Fase C	1.73	4.29	1.49	3.71	0.49	1.22

Figura 2

Curva de voltaje y corriente de cortocircuito trifásica del Grupo 6.



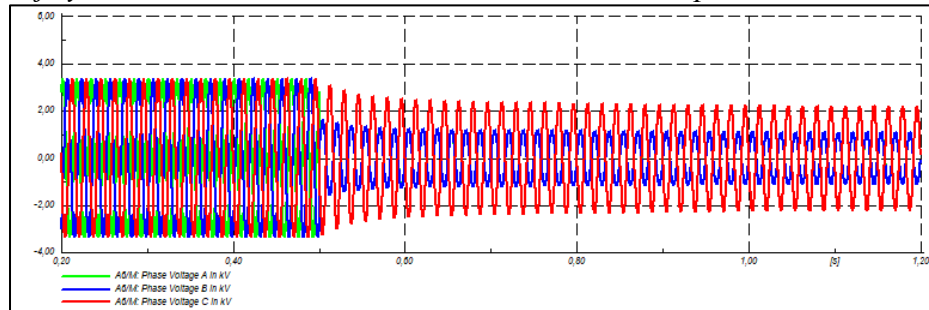
a) Curva de voltaje de falla.



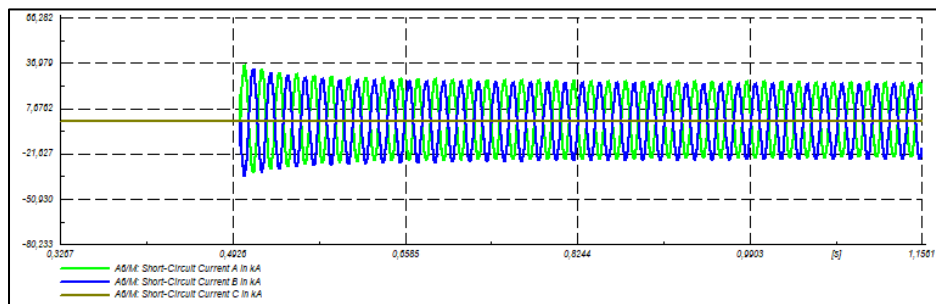
b) Curva de corriente de falla.

Figura 2

Curva de voltaje y corriente de cortocircuito línea a línea del Grupo 6.



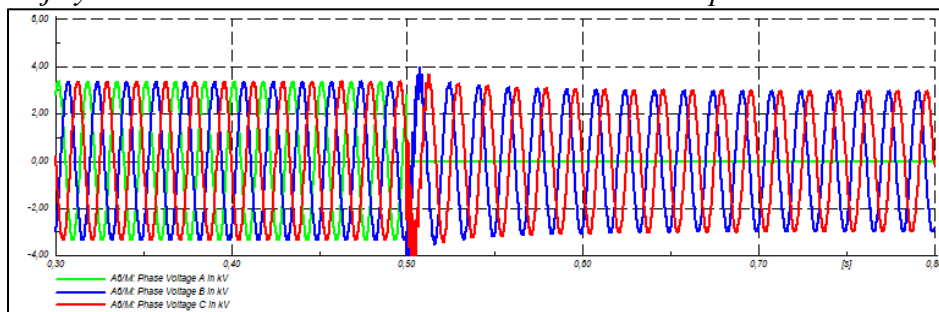
a) Curva de voltaje de falla.



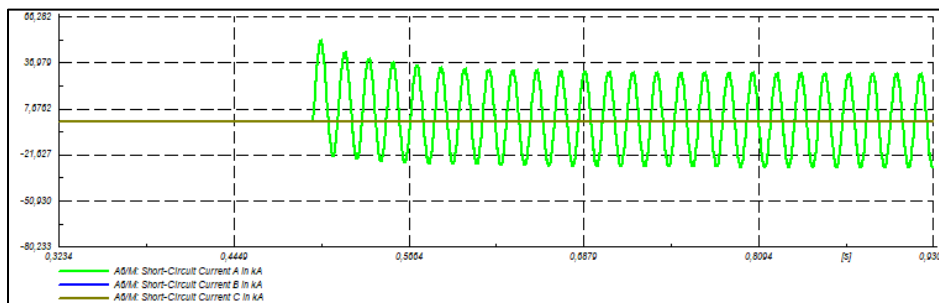
b) Curva de corriente de falla.

Figura 2

Curva de voltaje y corriente de cortocircuito línea a tierra del Grupo 6.



a) Curva de voltaje de falla.



b) Curva de corriente de falla.

- **Grupo de Bombeo 7**

Tabla 2

Corrientes de cortocircuito en la barra del Grupo 7.

Fases	Falla 3 ϕ			Falla 1 ϕ -1 ϕ		Falla 1 ϕ -T	
	$ Ik'' $ [kA]	$ Ip $ [kA]	$ Ik $ [kA]	$ Ik'' $ [kA]	$ Ip $ [kA]	$ Ik'' $ [kA]	$ Ip $ [kA]
Fase A	33.68	83.68	19.07	0	0	28.66	71.19
Fase B	33.68	83.68	19.07	29.16	72.44	0	0
Fase C	33.68	83.68	19.07	29.16	72.44	0	0

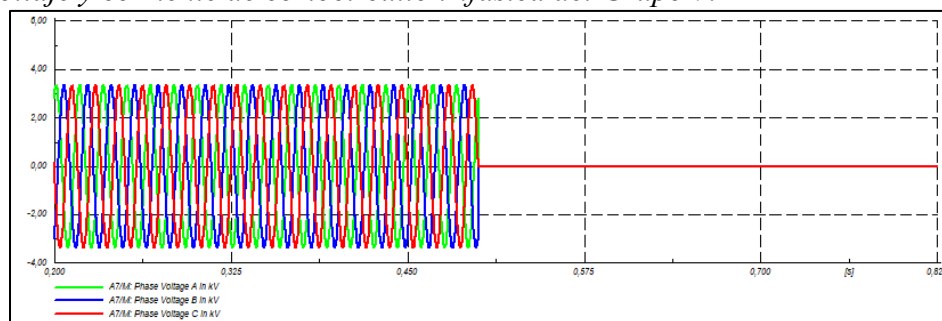
Tabla 2

Corrientes de cortocircuito en los terminales del Grupo 7.

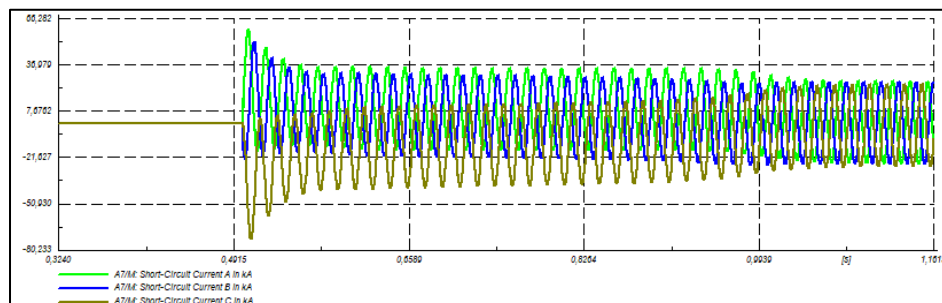
Fases	Falla 3 ϕ		Falla 1 ϕ -1 ϕ		Falla 1 ϕ -T	
	$ Ik'' $ [kA]	$ Ip $ [kA]	$ Ik'' $ [kA]	$ Ip $ [kA]	$ Ik'' $ [kA]	$ Ip $ [kA]
Fase A	1.68	4.18	0	0	0.96	2.37
Fase B	1.68	4.18	1.46	3.62	0.48	1.19
Fase C	1.68	4.18	1.46	3.62	0.48	1.19

Figura 2

Curva de voltaje y corriente de cortocircuito trifásica del Grupo 7.



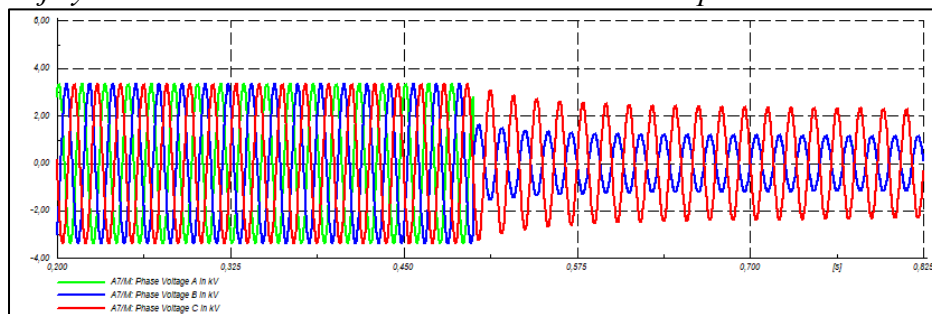
a) Curva de voltaje de falla.



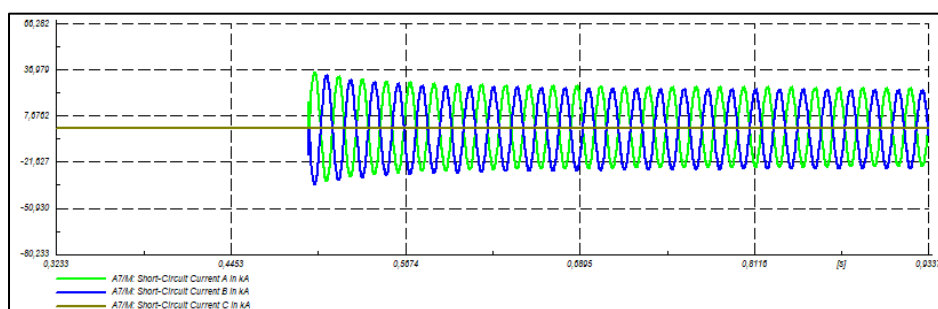
b) Curva de corriente de falla.

Figura 2

Curva de voltaje y corriente de cortocircuito línea a línea del Grupo 7.



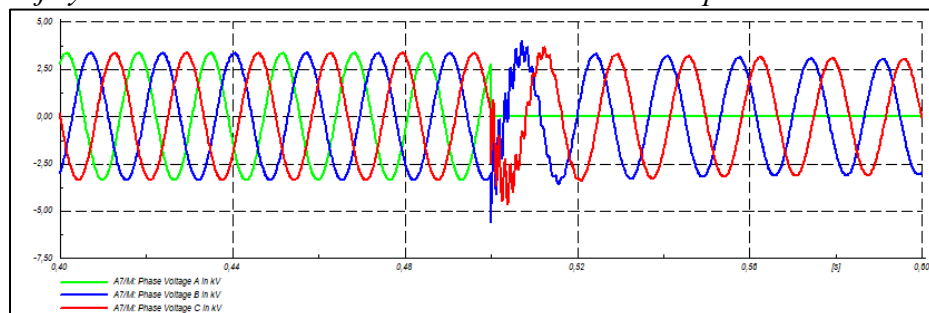
a) Curva de voltaje de falla.



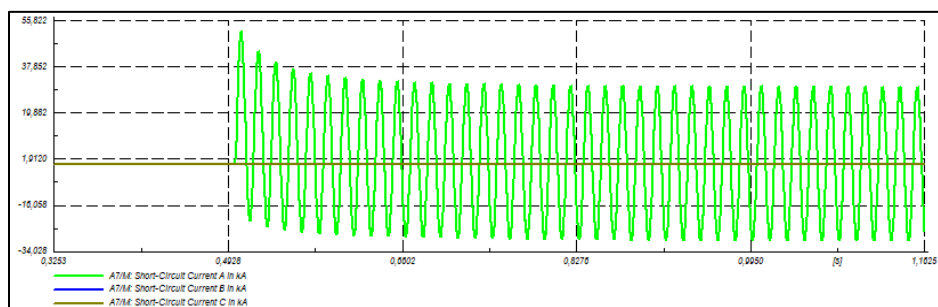
b) Curva de corriente de falla.

Figura 2

Curva de voltaje y corriente de cortocircuito línea a tierra del Grupo 7.



a) Curva de voltaje de falla.



b) Curva de corriente de falla.

- **Grupo de Bombeo 8**

Tabla 2

Corrientes de cortocircuito en la barra del Grupo 8.

Fases	Falla 3 ϕ			Falla 1 ϕ -1 ϕ		Falla 1 ϕ -T	
	$ Ik'' $ [kA]	$ Ip $ [kA]	$ Ik $ [kA]	$ Ik'' $ [kA]	$ Ip $ [kA]	$ Ik'' $ [kA]	$ Ip $ [kA]
Fase A	33.68	83.68	19.07	0	0	28.66	71.19
Fase B	33.68	83.68	19.07	29.16	72.44	0	0
Fase C	33.68	83.68	19.07	29.16	72.44	0	0

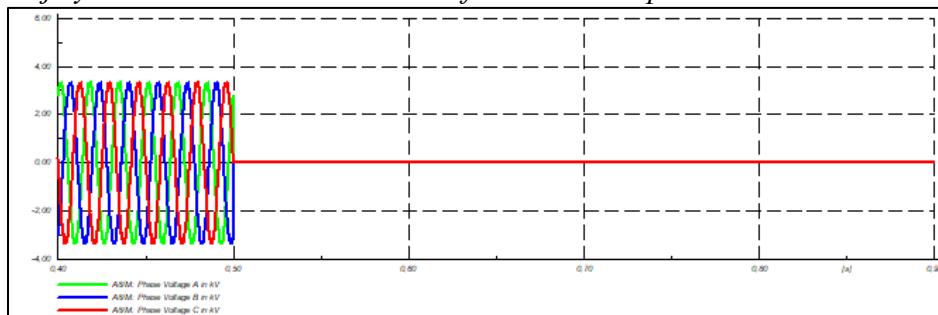
Tabla 2

Corrientes de cortocircuito en los terminales del Grupo 8.

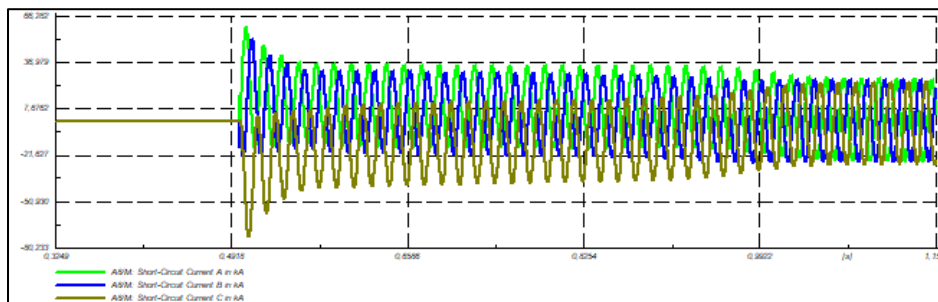
Fases	Falla 3 ϕ		Falla 1 ϕ -1 ϕ		Falla 1 ϕ -T	
	$ Ik'' $ [kA]	$ Ip $ [kA]	$ Ik'' $ [kA]	$ Ip $ [kA]	$ Ik'' $ [kA]	$ Ip $ [kA]
Fase A	1.73	4.29	0	0	0.98	2.43
Fase B	1.73	4.29	1.49	3.71	0.49	1.22
Fase C	1.73	4.29	1.49	3.71	0.49	1.22

Figura 2

Curva de voltaje y corriente de cortocircuito trifásica del Grupo 8.



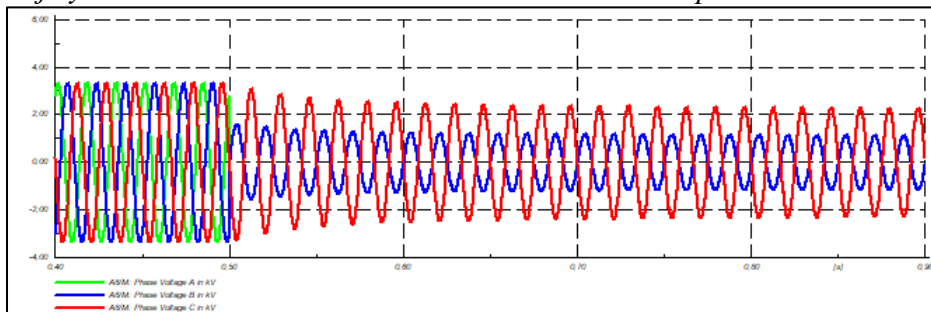
a) Curva de voltaje de falla.



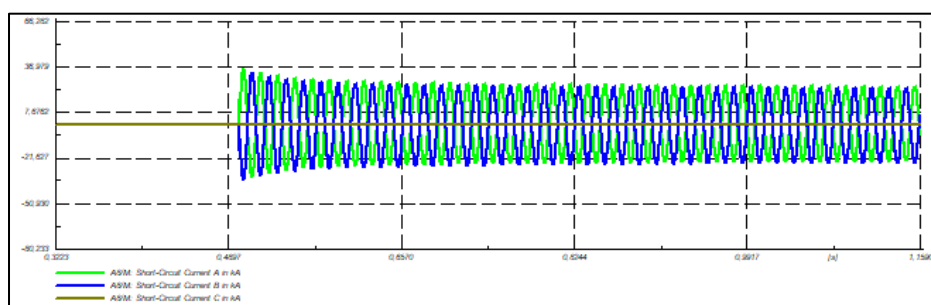
b) Curva de corriente de falla.

Figura 2

Curva de voltaje y corriente de cortocircuito línea a línea del Grupo 8.



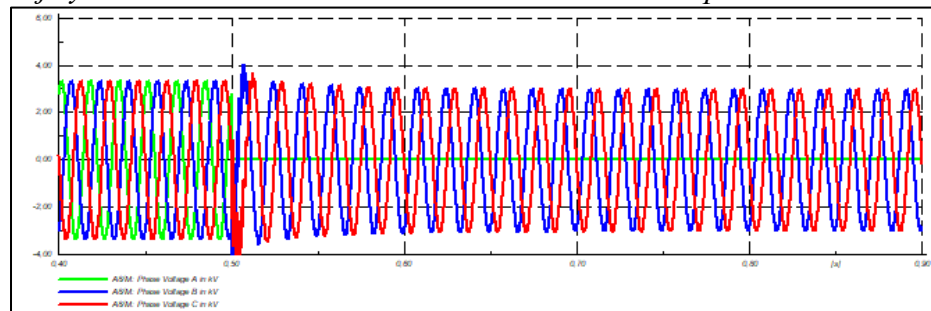
a) Curva de voltaje de falla.



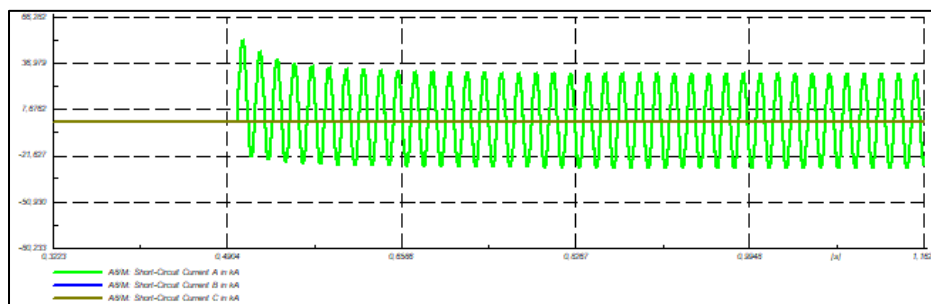
b) Curva de corriente de falla.

Figura 2

Curva de voltaje y corriente de cortocircuito línea a tierra del Grupo 8.



a) Curva de voltaje de falla.



b) Curva de corriente de falla.

- **Grupo de Bombeo 9**

Tabla 2

Corrientes de cortocircuito en la barra del Grupo 9.

Fases	Falla 3 ϕ			Falla 1 ϕ -1 ϕ		Falla 1 ϕ -T	
	$ Ik'' $ [kA]	$ Ip $ [kA]	$ Ik $ [kA]	$ Ik'' $ [kA]	$ Ip $ [kA]	$ Ik'' $ [kA]	$ Ip $ [kA]
Fase A	33.68	83.68	19.07	0	0	28.66	71.19
Fase B	33.68	83.68	19.07	29.16	72.44	0	0
Fase C	33.68	83.68	19.07	29.16	72.44	0	0

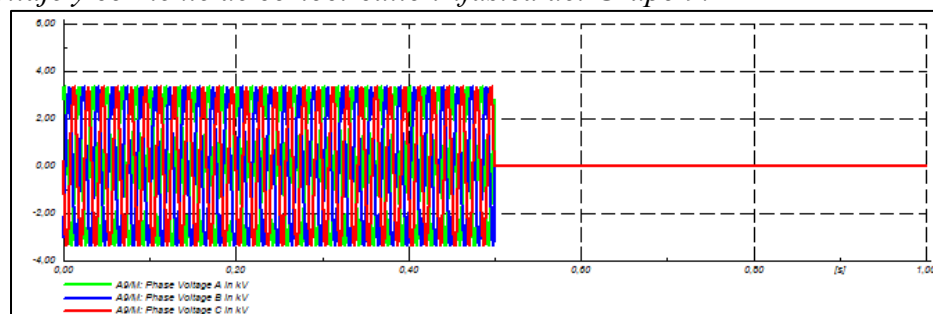
Tabla 2

Corrientes de cortocircuito en los terminales del Grupo 9.

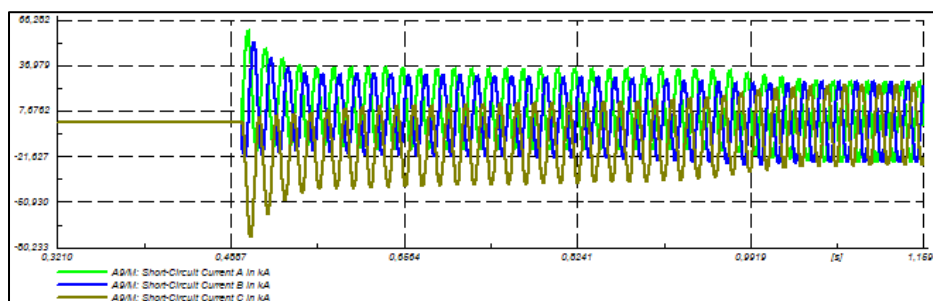
Fases	Falla 3 ϕ		Falla 1 ϕ -1 ϕ		Falla 1 ϕ -T	
	$ Ik'' $ [kA]	$ Ip $ [kA]	$ Ik'' $ [kA]	$ Ip $ [kA]	$ Ik'' $ [kA]	$ Ip $ [kA]
Fase A	1.73	4.29	0	0	0.98	2.43
Fase B	1.73	4.29	1.49	3.71	0.49	1.22
Fase C	1.73	4.29	1.49	3.71	0.49	1.22

Figura 2

Curva de voltaje y corriente de cortocircuito trifásica del Grupo 9.



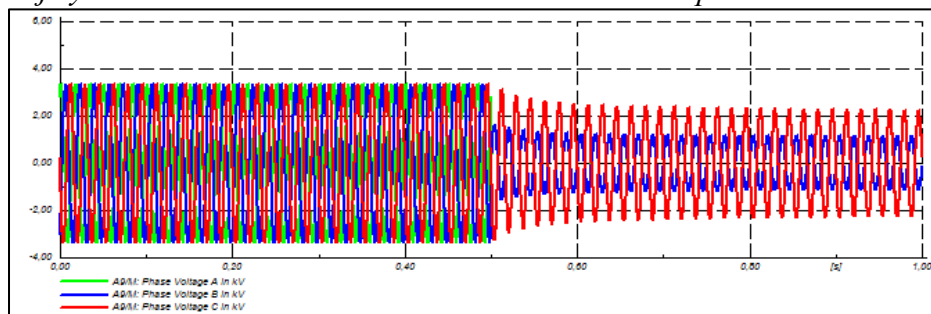
a) Curva de voltaje de falla.



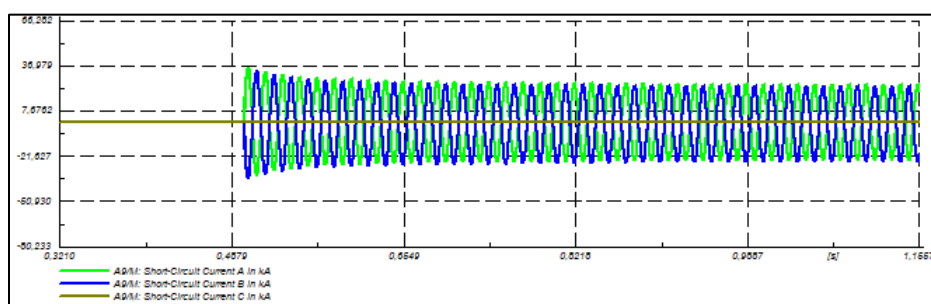
b) Curva de corriente de falla.

Figura 2

Curva de voltaje y corriente de cortocircuito línea a línea del Grupo 9.



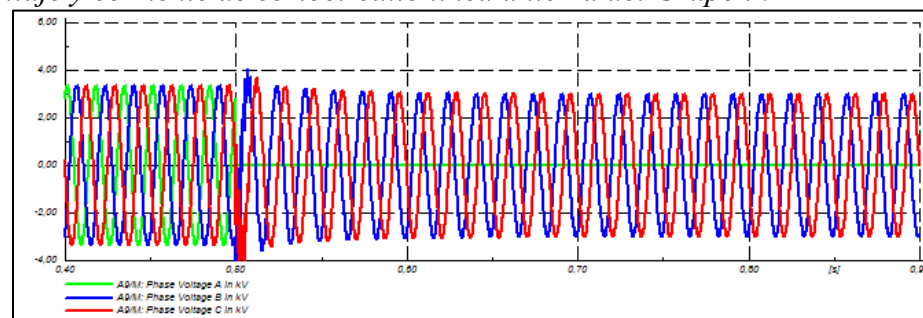
a) Curva de voltaje de falla.



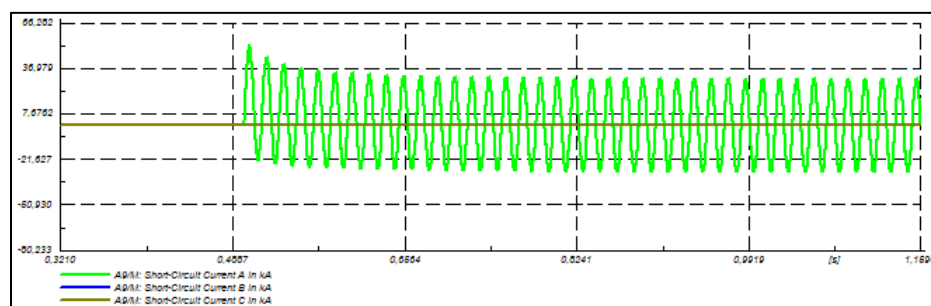
b) Curva de corriente de falla.

Figura 2

Curva de voltaje y corriente de cortocircuito línea a tierra del Grupo 9.



a) Curva de voltaje de falla.



b) Curva de corriente de falla.

- **Grupo de Bombeo 10**

Tabla 2

Corrientes de cortocircuito en la barra del Grupo 10.

Fases	Falla 3 ϕ			Falla 1 ϕ -1 ϕ		Falla 1 ϕ -T	
	$ Ik'' $ [kA]	$ Ip $ [kA]	$ Ik $ [kA]	$ Ik'' $ [kA]	$ Ip $ [kA]	$ Ik'' $ [kA]	$ Ip $ [kA]
Fase A	29.34	70.89	16.12	0	0	25.04	60.50
Fase B	29.34	70.89	16.12	25.41	61.37	0	0
Fase C	29.34	70.89	16.12	25.41	61.37	0	0

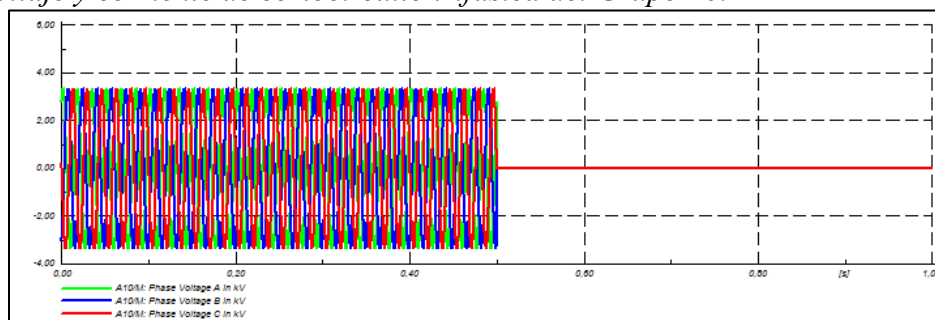
Tabla 2

Corrientes de cortocircuito en los terminales del Grupo 10.

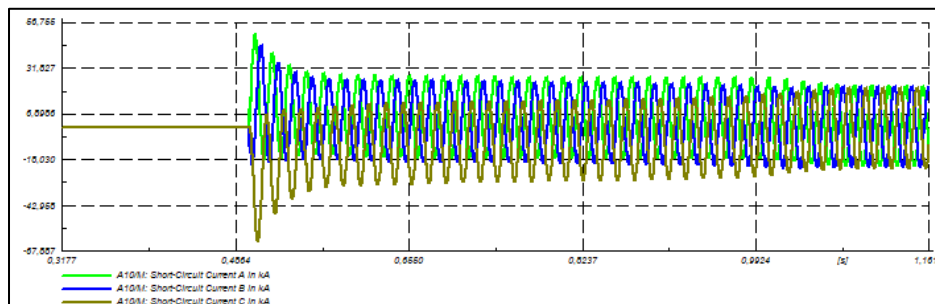
Fases	Falla 3 ϕ		Falla 1 ϕ -1 ϕ		Falla 1 ϕ -T	
	$ Ik'' $ [kA]	$ Ip $ [kA]	$ Ik'' $ [kA]	$ Ip $ [kA]	$ Ik'' $ [kA]	$ Ip $ [kA]
Fase A	1.62	3.92	0	0	0.92	2.23
Fase B	1.62	3.92	1.41	3.40	0.46	1.12
Fase C	1.62	3.92	1.41	3.40	0.46	1.12

Figura 2

Curva de voltaje y corriente de cortocircuito trifásica del Grupo 10.



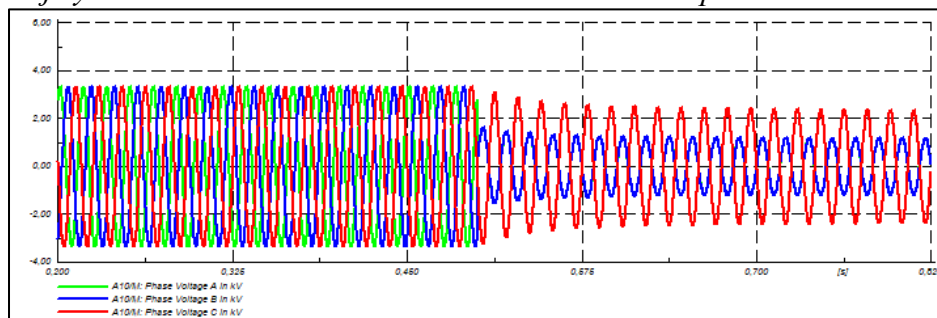
a) Curva de voltaje de falla.



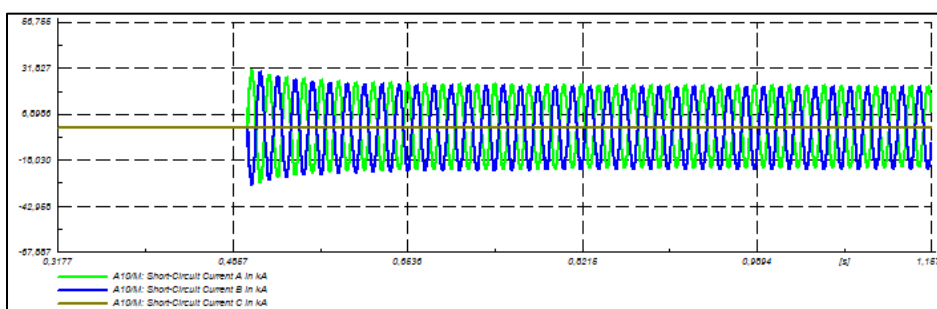
b) Curva de corriente de falla.

Figura 2

Curva de voltaje y corriente de cortocircuito línea a línea del Grupo 10.



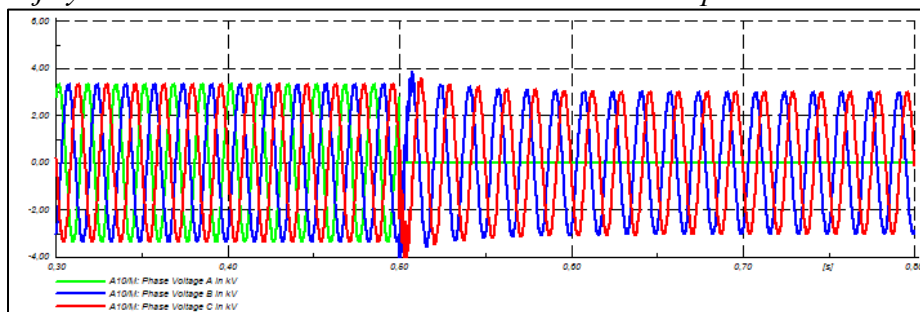
a) Curva de voltaje de falla.



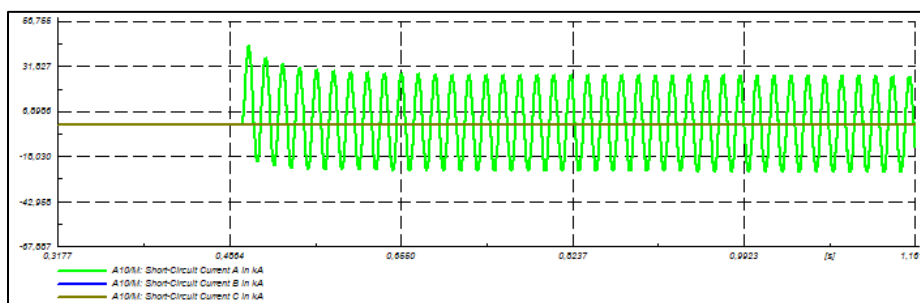
b) Curva de corriente de falla.

Figura 2

Curva de voltaje y corriente de cortocircuito línea a tierra del Grupo 10.



a) Curva de voltaje de falla.



b) Curva de corriente de falla.

- **Grupo de Bombeo 11**

Tabla 2

Corrientes de cortocircuito en la barra del Grupo 11.

Fases	Falla 3 ϕ			Falla 1 ϕ -1 ϕ		Falla 1 ϕ -T	
	$ Ik'' $ [kA]	$ Ip $ [kA]	$ Ik $ [kA]	$ Ik'' $ [kA]	$ Ip $ [kA]	$ Ik'' $ [kA]	$ Ip $ [kA]
Fase A	29.34	70.89	16.12	0	0	25.04	60.50
Fase B	29.34	70.89	16.12	25.41	61.37	0	0
Fase C	29.34	70.89	16.12	25.41	61.37	0	0

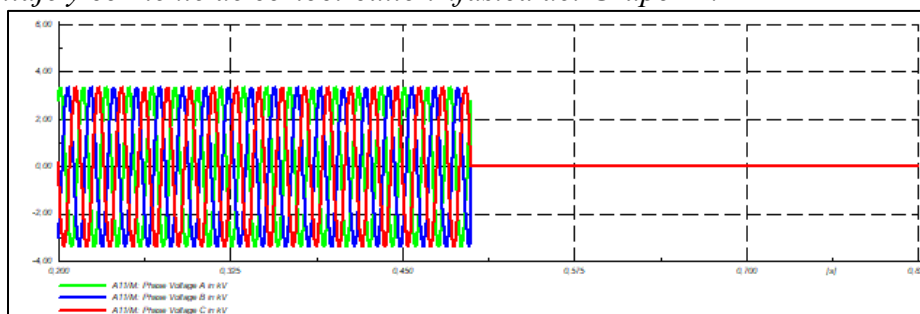
Tabla 2

Corrientes de cortocircuito en los terminales del Grupo 11.

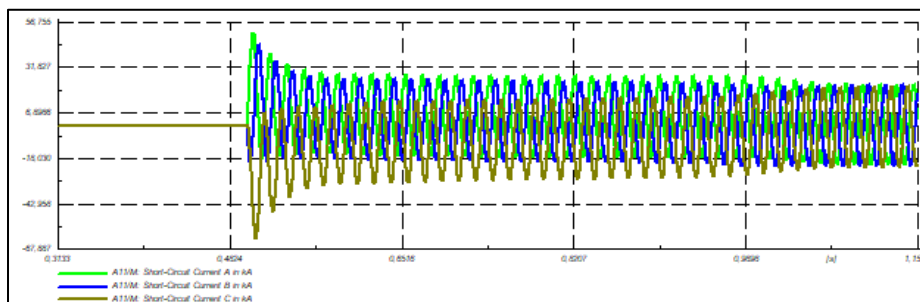
Fases	Falla 3 ϕ		Falla 1 ϕ -1 ϕ		Falla 1 ϕ -T	
	$ Ik'' $ [kA]	$ Ip $ [kA]	$ Ik'' $ [kA]	$ Ip $ [kA]	$ Ik'' $ [kA]	$ Ip $ [kA]
Fase A	1.62	3.92	0	0	0.92	2.23
Fase B	1.62	3.92	1.41	3.40	0.46	1.12
Fase C	1.62	3.92	1.41	3.40	0.46	1.12

Figura 2

Curva de voltaje y corriente de cortocircuito trifásica del Grupo 11.



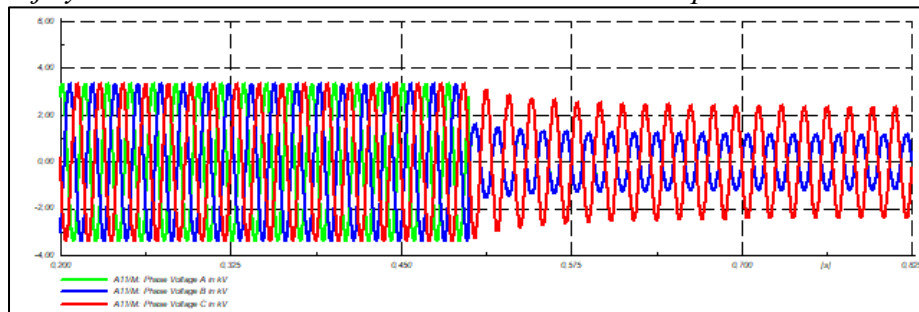
a) Curva de voltaje de falla.



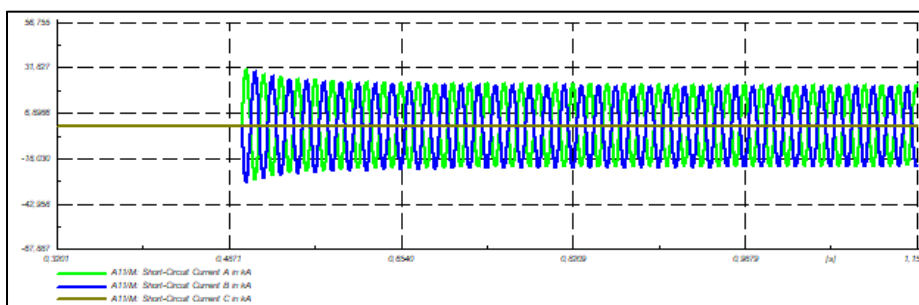
b) Curva de corriente de falla.

Figura 2

Curva de voltaje y corriente de cortocircuito línea a línea del Grupo 11.



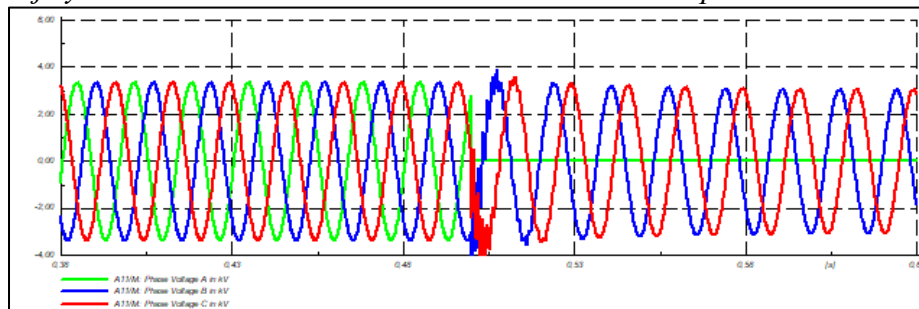
a) Curva de voltaje de falla.



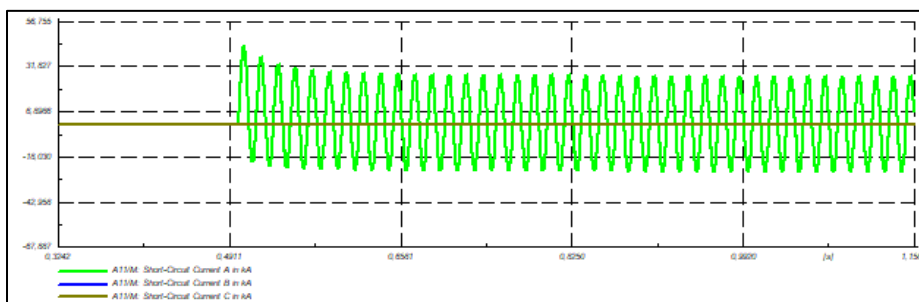
b) Curva de corriente de falla.

Figura 2

Curva de voltaje y corriente de cortocircuito línea a tierra del Grupo 11.



a) Curva de voltaje de falla.



b) Curva de corriente de falla.

- **Grupo de Bombeo 12**

Tabla 2

Corrientes de cortocircuito en la barra del Grupo 12.

Fases	Falla 3 ϕ			Falla 1 ϕ -1 ϕ		Falla 1 ϕ -T	
	$ Ik'' $ [kA]	$ Ip $ [kA]	$ Ik $ [kA]	$ Ik'' $ [kA]	$ Ip $ [kA]	$ Ik'' $ [kA]	$ Ip $ [kA]
Fase A	29.34	70.89	16.12	0	0	25.04	60.50
Fase B	29.34	70.89	16.12	25.41	61.37	0	0
Fase C	29.34	70.89	16.12	25.41	61.37	0	0

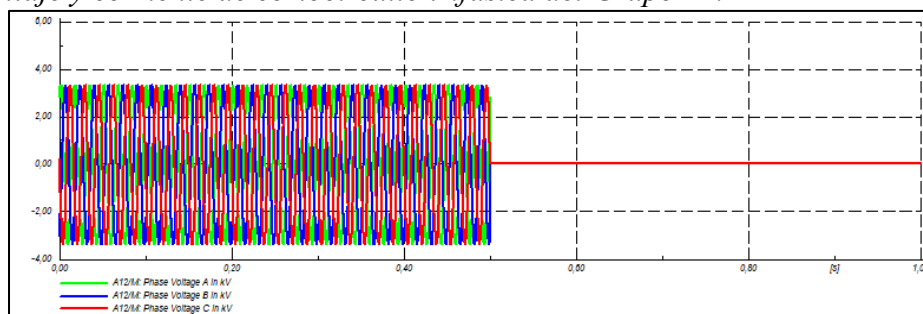
Tabla 2

Corrientes de cortocircuito en los terminales del Grupo 12.

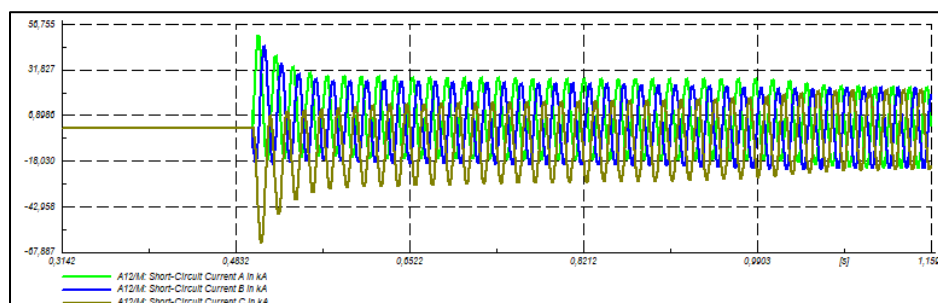
Fases	Falla 3 ϕ		Falla 1 ϕ -1 ϕ		Falla 1 ϕ -T	
	$ Ik'' $ [kA]	$ Ip $ [kA]	$ Ik'' $ [kA]	$ Ip $ [kA]	$ Ik'' $ [kA]	$ Ip $ [kA]
Fase A	1.62	3.92	0	0	0.92	2.23
Fase B	1.62	3.92	1.41	3.40	0.46	1.12
Fase C	1.62	3.92	1.41	3.40	0.46	1.12

Figura 2

Curva de voltaje y corriente de cortocircuito trifásica del Grupo 12.



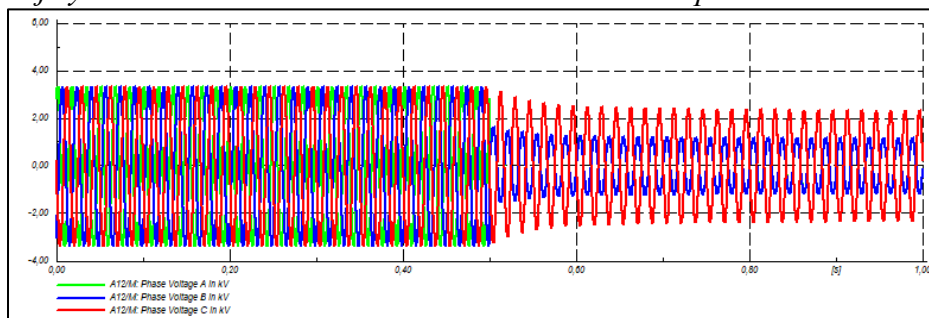
a) Curva de voltaje de falla.



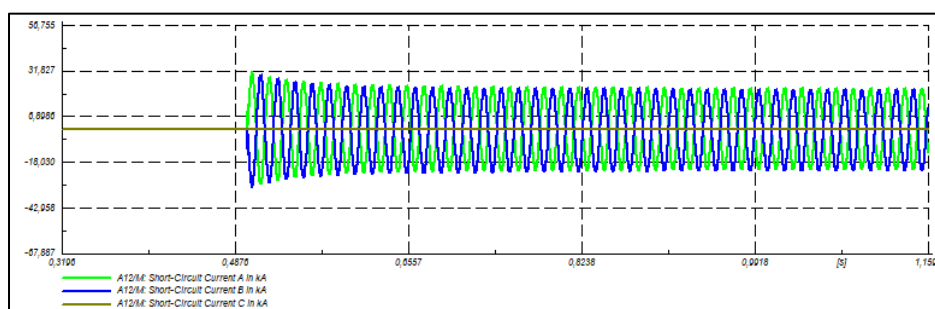
b) Curva de corriente de falla.

Figura 2

Curva de voltaje y corriente de cortocircuito línea a línea del Grupo 12.



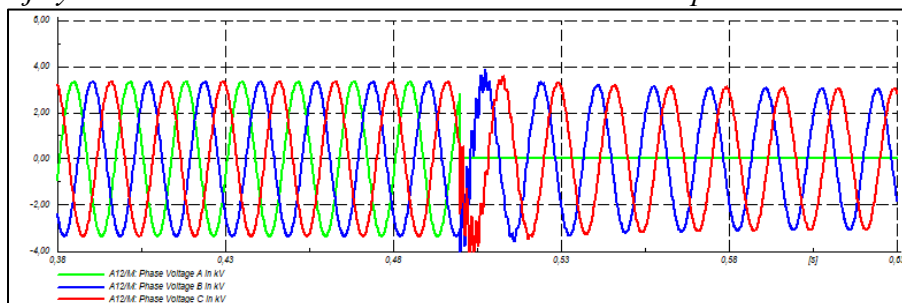
a) Curva de voltaje de falla.



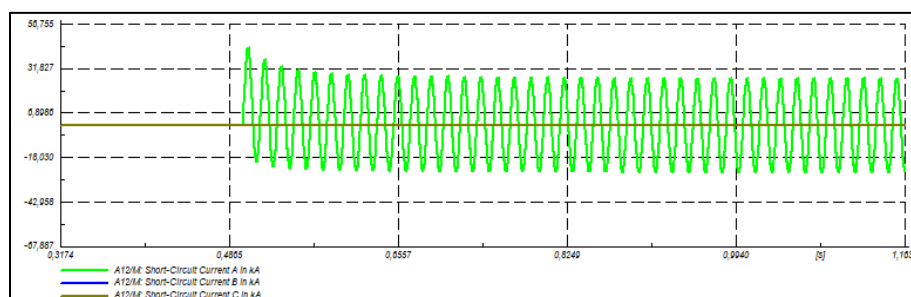
b) Curva de corriente de falla.

Figura 2

Curva de voltaje y corriente de cortocircuito línea a tierra del Grupo 12.



a) Curva de voltaje de falla.



b) Curva de corriente de falla.

Las corrientes de cortocircuito obtenidas en el estudio resultaron ser muy cercanas entre grupos de bombeos de la misma estación. Así, para la estación de bombeo 2 se obtuvo una corriente máxima pico de 83.68 [kA] y corriente de estado estable de 19.07 [kA] provenientes de una falla trifásica en la barra de cada motor, al igual que la corriente mínima pico de 71.19 [kA] proveniente de la falla de fase a tierra en la barra de cada motor. Para la estación de bombeo número 3 se obtuvo una corriente máxima pico de 70.89 [kA] y corriente de estado estable de 16.12 [kA] proveniente de una falla trifásica, además de una corriente mínima pico 60.50 [kA] proveniente de una falla línea a tierra. Las corrientes de falla que se obtuvieron en la estación de bombeo 3 son menores que en el caso de la estación de bombeo 2 debido a que se recorre un mayor camino de impedancia hasta llegar a la estación 3, puesto que esta presenta múltiples interconexiones en la red para poder ser alimentada. Los datos obtenidos fueron contrastados con los datos proporcionados por la planta “La Toma”. En el Anexo 1, podemos apreciar que la corriente de estado estable proporcionada es muy cercana a la obtenida, ya que esta se encontró en 22 [kA]. La diferencia entre ambos sistemas es que actualmente las estaciones de bombeo han ido cambiando en configuración y en máquinas lo cual provoca variaciones en las corrientes de cortocircuito que deben ser consideradas en un nuevo estudio de coordinación.

Al momento de ocurrir los cortocircuitos se observó que cada uno de los motores que se encontraban en el mismo grupo donde operó la falla, aportaban corriente a dicha falla eléctrica pero únicamente en el pico de la corriente de cortocircuito, debido a que estos al ser motores de inducción y no presentar un devanado en el rotor, así, al comportarse como generador no es posible que se genere una corriente eléctrica que fluya hacia la falla de forma constante. Esto solo sucede durante un pequeño periodo de tiempo al inicio del evento de falla. Las aportaciones de corriente de los motores que se encontraban en el mismo grupo de bombeo eran muy pequeñas pero la

aportación del motor donde ocurría la falla resultaba muy notable, llegando a aportar 1.73 [kA] al pico de corriente de falla. Este suceso se evidencio en cada uno de los eventos que se realizó en el estudio de cortocircuito.

Capítulo 3

3. Resultados.

En la presente sección se presentarán cada uno de los parámetros ajustados a los relés de protecciones de las estaciones de bombeo 2 y 3 de la planta “La Toma”, así también como las curvas de coordinación y las actuaciones de los relés de protección ante distintos eventos de fallas.

3.1. Coordinación de Protecciones.

Los estudios de coordinación de protecciones se basan en el ajuste de los parámetros de actuación de los relés de protección eléctrica para el correcto funcionamiento de estos ante eventos de fallas eléctricas. Para realizar el mismo es necesario de conocer las funciones y capacidades de los equipos de protección que presentan las estaciones de bombeo 2 y 3. La antigüedad de la planta de bombeo en general ha provocado que los relés no tengan una amplia gama de funciones de protección puesto que la mayoría de estos son electromecánicos y digitales, a pesar de ello se han actualizado algunos de estos durante los años para que cada vez se puedan proporcionar más características de protección que añadan más seguridad a las estaciones de bombeo.

Dentro de la gama de relés de protección que incorporan las estaciones de bombeo 2 y 3 se presentan un uso de 3 tipos relés de la marca “General Electric”, los cuales son el relé 269 Plus, Multilin 469 y Multilin 869, exclusivamente para protección de motores. Entre las funciones de protección que se tienen configuradas son la protección de sobrecorriente ANSI 51, protección de sobrecorriente instantánea ANSI 50, protección de bajo voltaje ANSI 27, protección de sobre voltaje ANSI 59 y protección de desbalance de corrientes ANSI 46, estas funciones de protección son las mismas que se ajustarán en el presente estudio para que sean una base para el reajuste de los parámetros de los relés de las estaciones de bombeo 2 y 3 de la planta “La Toma”.

3.1.1. Protección ANSI 51.

La protección de sobrecorriente ANSI 51 tiene la función de proteger a la red ante eventos de sobre corrientes que puedan circular en la misma, esta función de protección es una de las principales en cualquier esquema eléctrico puesto que es la encargada de eliminar cualquier tipo de sobrecorriente producto de una falla en la red de un sistema en un determinado tiempo.

Mediante el software DigSilent se ha implementado los mismos relés de protección mencionados anteriormente y presentes en las estaciones de bombeo 2 y 3. Para la protección ANSI 51 se han colocado los siguientes ajustes.

Tabla 3.1

Ajustes de protección ANSI 51 para los relés de motores de la estación EB2 y EB3.

Ajustes de la protección ANSI 51					
	Time Dial	Tap Setting	Pick up Setting	CT Ratio	Curve Type
Motores EB2	0.5	0.5xCT	500 [A]	1000/5	IEC Inverse
Motores EB3	0.5	0.5xCT	500[A]	1000/5	IEC Inverse

Ambas estaciones de bombeo presentan características de operación muy similares, es por ello que se optó por un mismo ajuste para cada una de ellas. La selección de los ajustes mostrados en la Tabla 3.1, fueron basados principalmente en los parámetros operativos de la red, la corriente de operación de las estaciones de bombeo suelen ser de 150 [A] a 175[A] dependiendo de la carga y la corriente de arranque suele ir de 800[A] a 1200[A], con los ajustes colocados para la protección 51 se permitirá que cada uno de los motores de cada estación de bombeo opere en condiciones normales incluso en el arranque sin que se activen los relés, pero si por fallas mecánicas de la maquina se llega a tener un problema de rotor bloqueado lo cual provoca una corriente de operación similar a la corriente de arranque, es decir, alrededor de 1000[A] de forma constante, la maquina deberá ser protegida en dichos casos. Por lo tanto, ante este tipo de eventos se tiene un

ajuste de la curva de protección en donde si se mantiene una corriente de arranque por más de 7 [s], la protección actúa para proteger el motor, este ajuste no interfiere con el arranque del motor porque este suele durar alrededor de 2 [s] y la protección esta ajustada para tiempo mayores a 7 [s]. Se demostrará dicho suceso mediante el uso de la ecuación característica del tipo de curva utilizado en los relés de protección.

$$t = \frac{0.14}{\left(\frac{I}{I_p}\right)^{0.02} - 1} * T_p$$

Donde T_p es el time dial, I la corriente que actúa en la red y I_p es la corriente de pickup. Para este evento se utilizarán los ajustes mencionados en la Tabla 3.1 y un evento donde se existe una corriente de operación de 800[A].

$$t = \frac{0.14}{\left(\frac{800}{500}\right)^{0.02} - 1} * 0.5 = 7.41[s]$$

Se puede observar que únicamente ante un evento donde se mantenga dicha corriente de operación por más de 7 [s], la protección se ejecutara la desconexión de la maquina eléctrica. Por último, se ajustaron algunos parámetros de las barras generales de las estaciones 2 y 3, puesto que el ajuste que estas presentaban podría provocar una mala actuación de los relés e incluso ningún tipo de actuación ante eventos de falla en los motores o en dichas barras. Los nuevos ajustes para las barras generales de distribución de las estaciones de bombeo 2 y 3 se presentan en la Tabla 3.2.

Figura 3.1

Ajustes de protección ANSI 51 para los relés de las barras generales de la estación EB2 y EB3.

Ajustes de la protección ANSI 51					
	Time Dial	Tap Setting	Pick up Setting	CT Ratio	Curve Type
Barra EB2	1	0.8xCT	800 [A]	1000/5	IEC Inverse
Barra EB3	1	0.8xCT	800[A]	1000/5	IEC Inverse

3.1.2. Protección ANSI 50.

La protección de sobrecorriente instantánea ANSI 50, al igual que la protección ANSI 51, es una de las principales protecciones y muy necesarias en los sistemas eléctricos, esta protección despeja las sobre corrientes producidas por fallas eléctricas de forma instantánea, a diferencia de la protección anterior que se toma pequeños intervalos de tiempos para que mande la señal de actuación al disyuntor.

Los ajustes seleccionados para esta función de protección se muestran en la siguiente tabla.

Tabla 3.1

Ajustes de protección ANSI 50 para los relés de la estación EB2 y EB3.

Ajustes de la protección ANSI 50				
	Time Dial	Tap Setting	Pick up Setting	CT Ratio
Motores EB2	0	9xCT	9000 [A]	1000/5
Motores EB3	0	9xCT	9000[A]	1000/5

En la Tabla 3.3, se muestran los ajustes de la protección 50 para ambas estaciones de bombeo. Se tomo un mismo ajuste para dicha función de protección principalmente a que estas estaciones de bombeo y relés de protección están diseñadas para trabajar a una corriente máxima de 10 [kA] en periodos de tiempo cortos. Estas al tener más de 50 años de operación, su infraestructura se ve desgastada por el continuo uso y por lo tanto sus características técnicas y eléctricas se encuentran deterioradas, es por ello que con el fin de prevalecer la vida de las instalaciones que conforman las estaciones de bombeo 2 y 3, se optó un ajuste de corriente de 9 [kA] menor al de su corriente de diseño en donde cualquier evento de falla será despejado de forma inmediata sin perjudicar a los motores y a los componentes de dichas estaciones de bombeo.

3.1.3. *Protección ANSI 46.*

Los desbalances de corriente en los sistemas eléctricos son fenómenos comunes que se producen al no circular una misma corriente entre las tres fases del sistema, este efecto puede provocar sobrecalentamiento en los conductores y máquinas eléctricas, también se pueden provocar circulaciones de corrientes en el neutro y disparos repentinos de las protecciones eléctricas. La protección ANSI 46 tiene el objetivo de desconectar los circuitos eléctricos cuando estos superen un umbral específico de desbalance entre las fases, por norma se sabe que los desbalances de corriente por encima del 10% pueden ser críticos y maximizar los efectos ya nombrados.

Para poder determinar el porcentaje de desbalance de corriente en una red se utilizará la siguiente ecuación [12]:

$$\%Desbalance = \frac{I_{nominal} - I_{promedio}}{I_{promedio}} * 100$$

Donde la $I_{promedio}$ representa el promedio de corriente entre las tres fases. Para ambas estaciones de bombeo se calculó la corriente promedio que circula en cada una de las líneas de los motores con la ayuda de los datos de potencia proporcionados por la planta “La Toma”, siendo estos 157 [A], 170 [A] y 172 [A] para EB2; y 147 [A], 151 [A] y 139 [A] para EB3. En el caso de los motores de EB2 se ha determinado que en operación nominal existe un desbalance del 3.4068% y los motores de EB3 presentan un desbalance del 3.6613%, en base a estos porcentajes se pudo determinar que en la estación de bombeo EB2 es necesario un desbalance de 40 [A] en cualquiera de las fases para que se supere el umbral del 10% de desbalance de corriente y en EB3 es necesario un desbalance de 22 [A] en cualquiera de sus fases para producir el mismo efecto, aun así, se estableció un umbral máximo del 8% de desbalance para proteger a la red y que se eviten daños

críticos en los equipos eléctricos. Así también, el disparo de dicha protección se lo estableció en un tiempo de 4 segundos debido a que los efectos de los desbalances de corriente no provocan el mismo deterioro que los efectos de sobre corrientes en periodos grandes de tiempo, aun así, no es permitido que la duración de esta perturbación sea muy prolongada porque esta puede ser producto de algún otro problema eléctrico más severo en el sistema que deberá ser resultado en el menor tiempo posible.

Tabla 3.1

Ajustes de protección ANSI 50 para los relés de la estación EB2 y EB3.

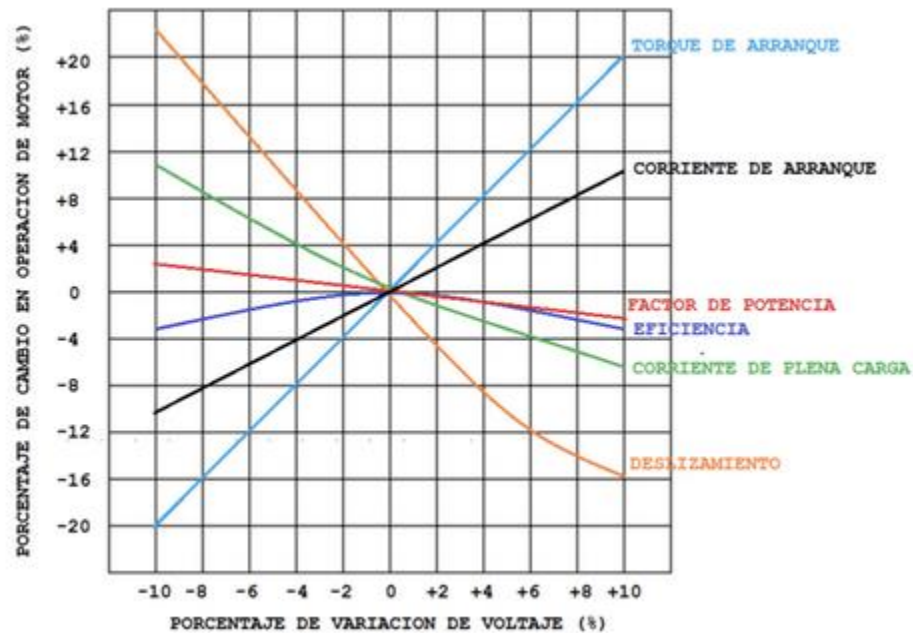
Ajustes de la protección ANSI 46				
	Time Setting	Tap Setting	Pick up Setting	CT Ratio
Motores EB2	4	$0.16 \times I_{nominal}$	32 [A]	1000/5
Motores EB3	4	$0.08 \times I_{nominal}$	16 [A]	1000/5

3.1.4. Protección ANSI 27 y ANSI 59.

Las caídas o subidas de tensiones dentro de los motores eléctricos son fenómenos eléctricos que pueden surgir debido a la fuente de alimentación de la planta o por deficiencia en el diseño eléctrico del equipo, esto puede provocar que el funcionamiento del equipo empeore significativamente ya que todos los parámetros eléctricos como potencia, corriente, factor de potencia, eficiencia y deslizamiento dependen del voltaje de operación, según la norma NEMA MG 10-2001 sugiere que la caída y subida de voltaje no supere el 10% del voltaje nominal, ya que en este punto la máquina trabajara de forma no deseada y podrá sufrir daños a largo plazo.

Figura 3.1

Efectos de la caída de tensión en una máquina de inducción [13].



Para poder mitigar este efecto se establece la protección ANSI 27 o protección de bajo voltaje y la protección ANSI 59 o protección de sobrevoltaje las cuales tienen el objetivo de salvaguardar equipos eléctricos ante situaciones de bajos y altos voltaje. Estas protecciones nos permiten establecer un umbral de voltaje en donde una vez este se supera, la protección actúa desconectando el equipo que se desea proteger. Las máquinas de las estaciones de bombeo 2 y 3 trabajan a un nivel de tensión de 4160 [V], a modo de protección adicional, se ajustarán dichas protecciones para umbrales menores y mayores al 8% del voltaje nominal, es decir, tensiones menores a 3785 [V] y tensiones mayores a 4448 [V] para ambas estaciones de bombeo con el fin de que estas no sufran una decadencia en sus parámetros eléctricos.

Tabla 3.1

Ajustes de protección ANSI 27 para los relés de la estación EB2 y EB3.

Ajustes de la protección ANSI 27			
	Time Setting	Tap Setting	Pick up Setting
Motores EB2	2	$0.8xV_{nominal}$	3785 [V]
Motores EB3	2	$0.8xV_{nominal}$	3785 [V]

Tabla 3.1

Ajustes de protección ANSI 59 para los relés de la estación EB2 y EB3.

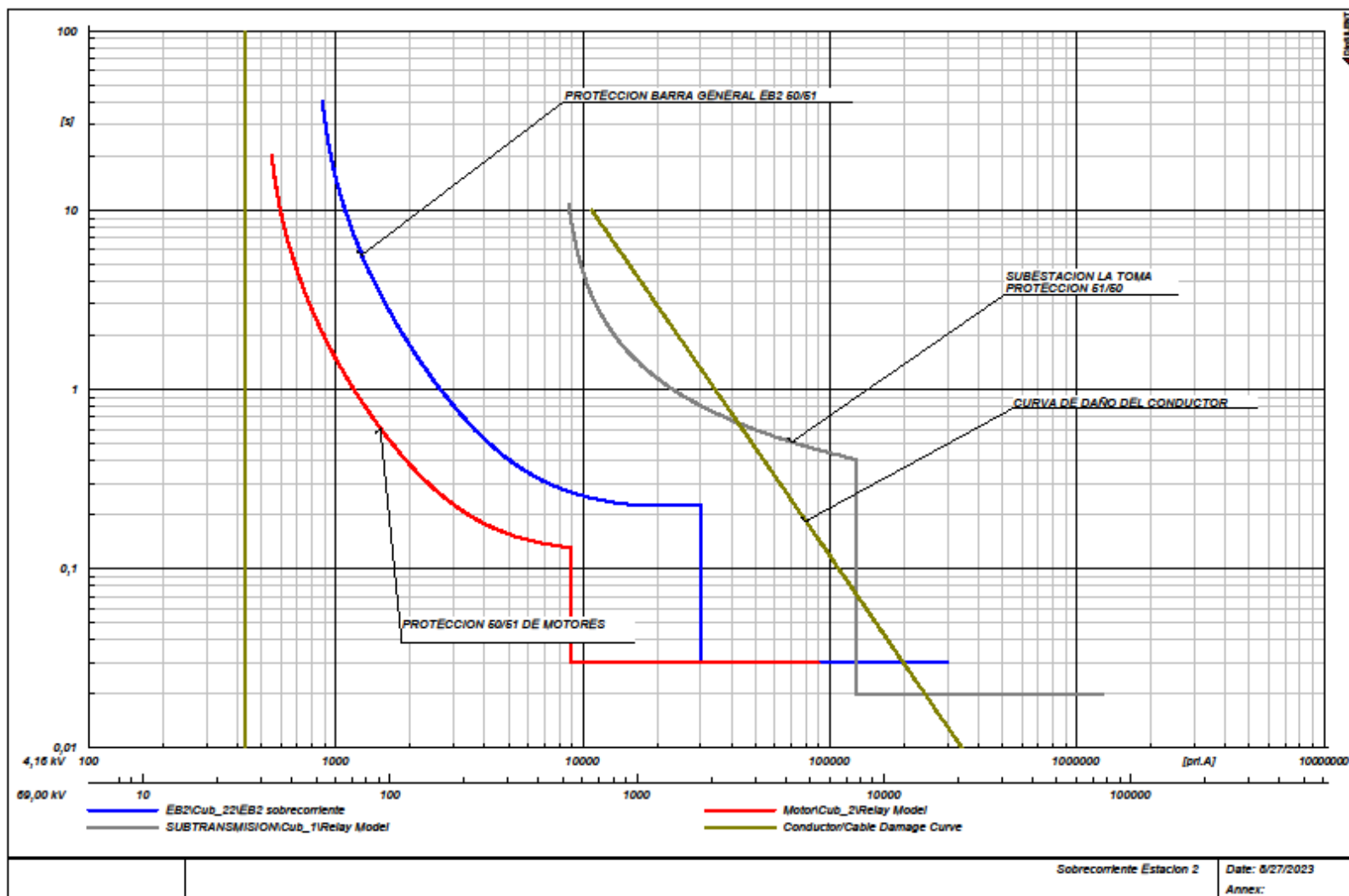
Ajustes de la protección ANSI 59			
	Time Setting	Tap Setting	Pick up Setting
Motores EB2	2	$1.08xV_{nominal}$	4448 [V]
Motores EB3	2	$1.08xV_{nominal}$	4448 [V]

3.1.5. Curvas de corriente de tiempo inverso.

En esta sección se presentarán las curvas de tiempo inverso de la coordinación de protecciones realizadas a las estaciones de bombeo 2 y 3 de la planta “La Toma”, además se ejecutaran distintos eventos de falla dentro del conjunto de motores eléctricos para observar los tiempos de actuación de las protecciones y que éstas actúen en su debida zona de protección, se agregaron las curvas de ajustes de la barra general de cada estación de bombeo y de la subestación “La Toma” para evidenciar de que el nuevo ajuste de protecciones se encuentre por debajo de dichas curvas para asegurar la fiabilidad de las protecciones eléctricas. Además, se agregó la curva de daño del conductor utilizados en las estaciones de bombeo con el fin de comprobar que los nuevos ajustes de coordinación se encuentren en la zona operativa de dicha curva.

Figura 3.1

Curva de tiempo inverso de las protecciones de los motores de la estación 2.



█ Curva de tiempo inverso del relé de protecciones de los motores de EB2.

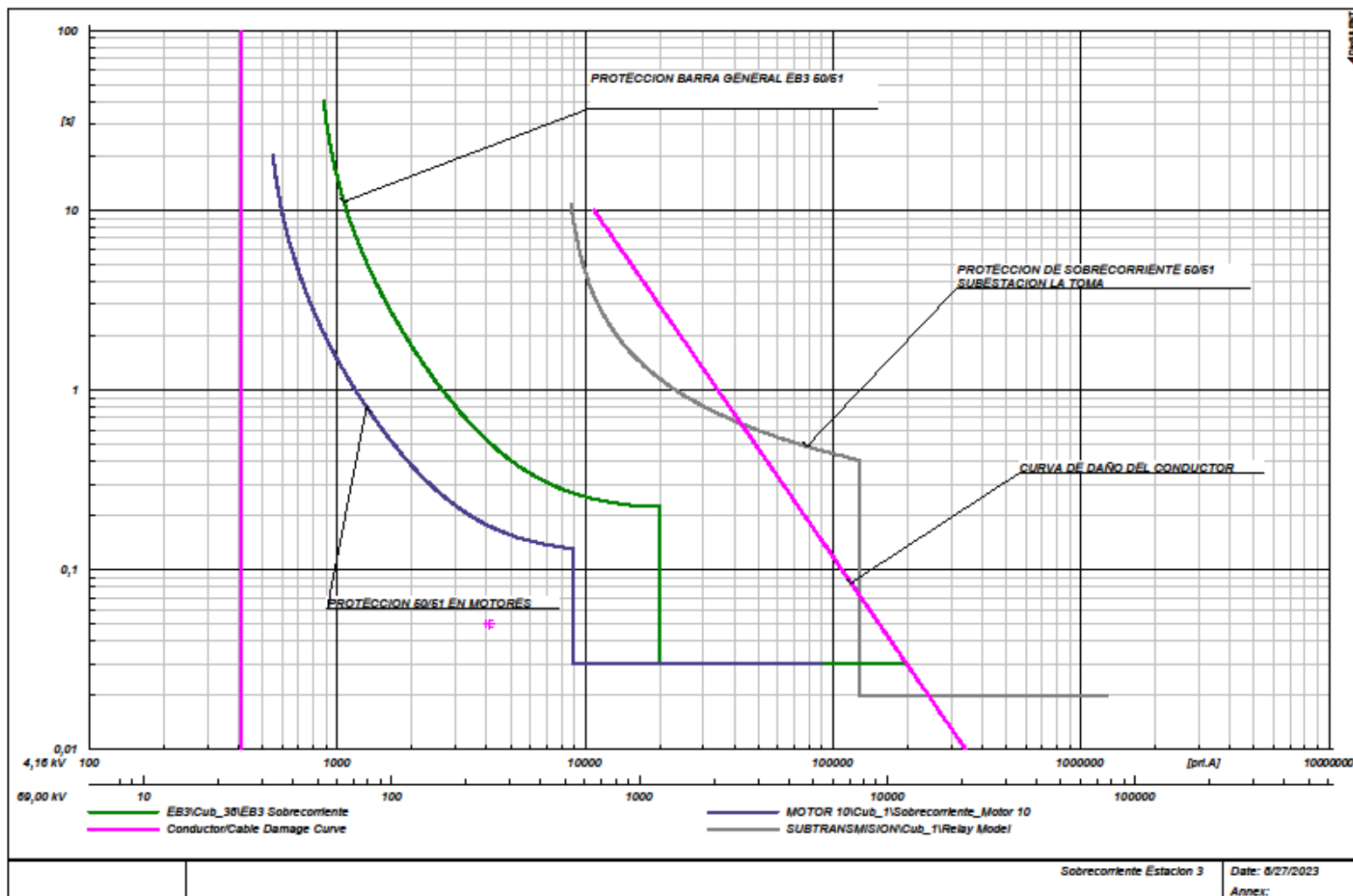
█ Curva de tiempo inverso de la barra general de EB2.

█ Curva de tiempo inverso de la subestación "La toma".

█ Curva de daño del conductor de EB2.

Figura 3.1

Curva de tiempo inverso de las protecciones de los motores de la estación 3.



— Curva de tiempo inverso del relé de protecciones de los motores de EB3.

— Curva de tiempo inverso de la barra general de EB3.

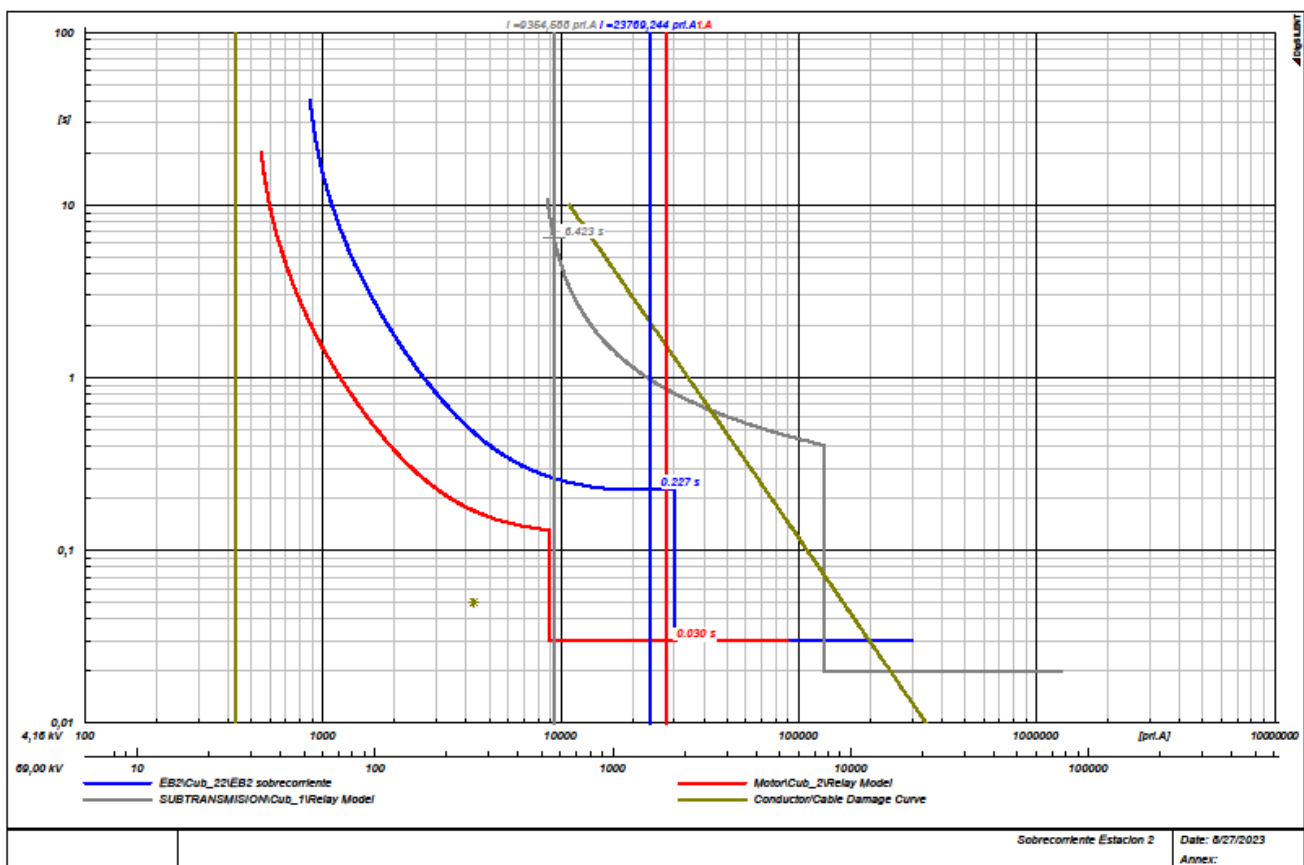
— Curva de tiempo inverso de la subestación “La toma”.

— Curva de daño del conductor de EB3.

Para la comprobación de la actuación de las protecciones eléctricas se han desarrollado eventos de falla en los terminales de los motores para observar los tiempos de actuación de los relés y disyuntores. Primeramente, se mostrará el caso de una falla monofásica dentro del grupo de bombeo 5 de la estación de bombeo 2.

Figura 3.1

Actuación de los relés de protección de motores de EB2 ante una falla trifásica en los terminales del grupo de bombeo 5.

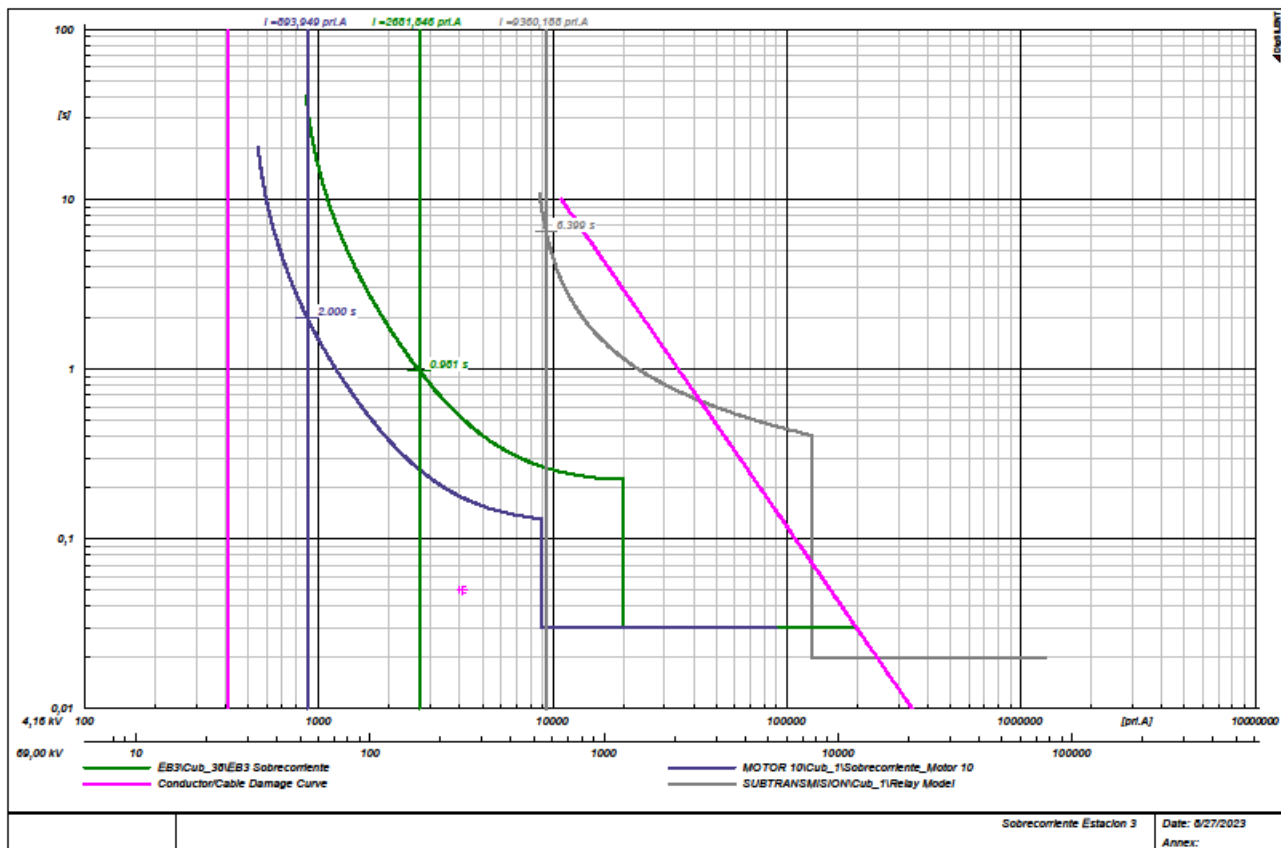


Ante la falla mostrada en la Figura 3.4, se puede observar que esta cae dentro de la zona de actuación instantánea del relé de protección de los motores aislando dicho cortocircuito en un periodo de tiempo cercano a 0 [s]. Por otro lado, el relé de protección de la barra general de alimentación de EB2 llega a medir dicho evento de falla, pero en un periodo de tiempo mayor,

alrededor de 0.227 [s], momento donde el relé del motor ya actuó y por lo tanto se evita una desenergización de todo EB2. Por último, el relé de la subestación “La Toma” actúa como respaldo en un tiempo de 6.399 [s].

Figura 3.1

Actuación de los relés de protección de EB3 ante una falla trifásica en los terminales del grupo de bombeo 5.



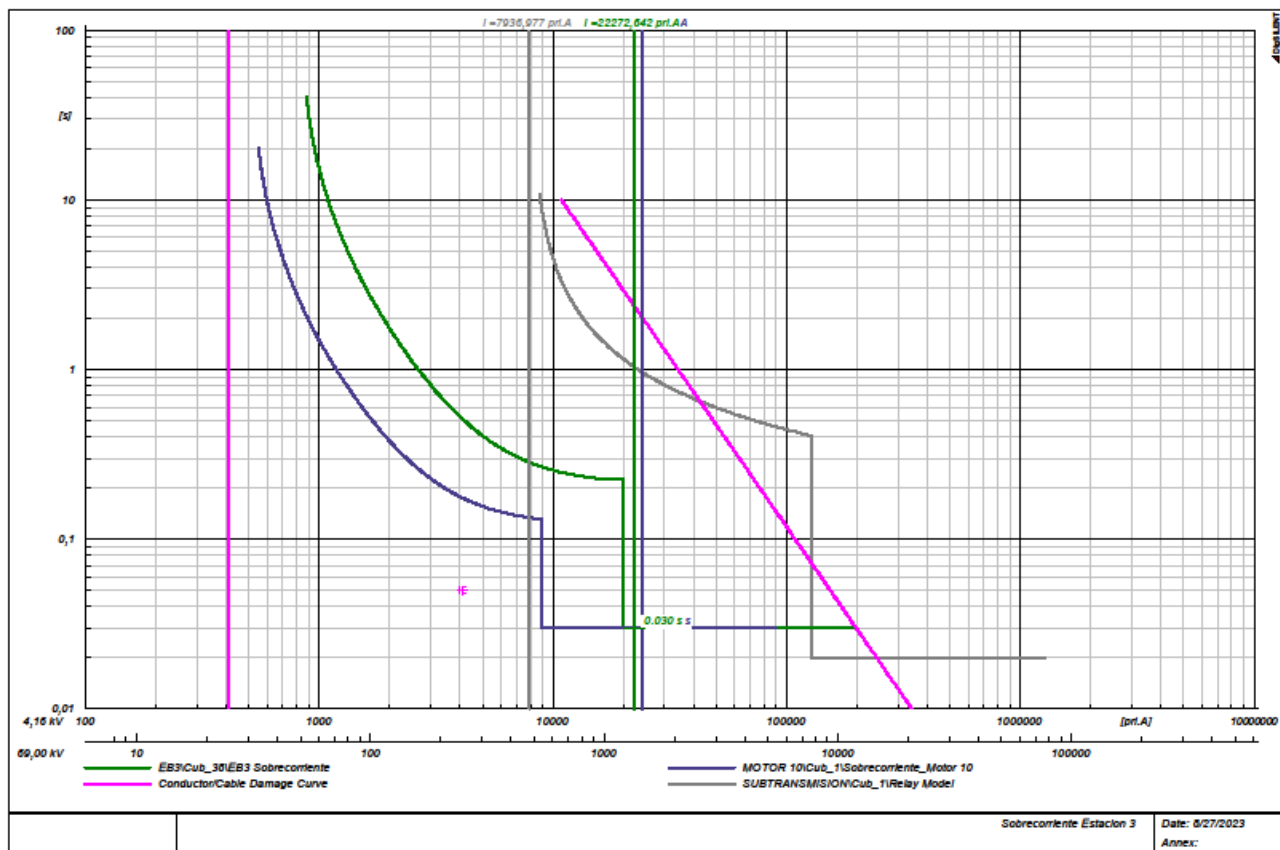
Se puede evidenciar en la Figura 3.5, que ante la falla en los motores en EB2, los relés de protección de los motores de EB3 llegan a actuar en un tiempo de 2 [s] instante donde dicha falla ya ha sido despejada. Por otro lado, el relé de la barra general de EB3 también observa la corriente de falla provocada por EB2, pero en un tiempo de 0.981 [s] en donde ya los relés de EB2 actuaron evitándose problemas de interrupción de las protecciones eléctricas. Por último, el relé de la

subestación también actúa como un respaldo ya que este se demora más tiempo en detectar la falla, tomando un tiempo de 6.399 [s] en actuar.

Al igual que con la estación de bombeo 2, se realizó el mismo evento de falla en los terminales del grupo de bombeo 10 perteneciente a la estación de bombeo 3 con el fin de comprobar el correcto funcionamiento de los relés de protección en dicha estación de bombeo.

Figura 3.1

Actuación de los relés de protección de motores de EB3 ante una falla trifásica en los terminales del grupo de bombeo 10.

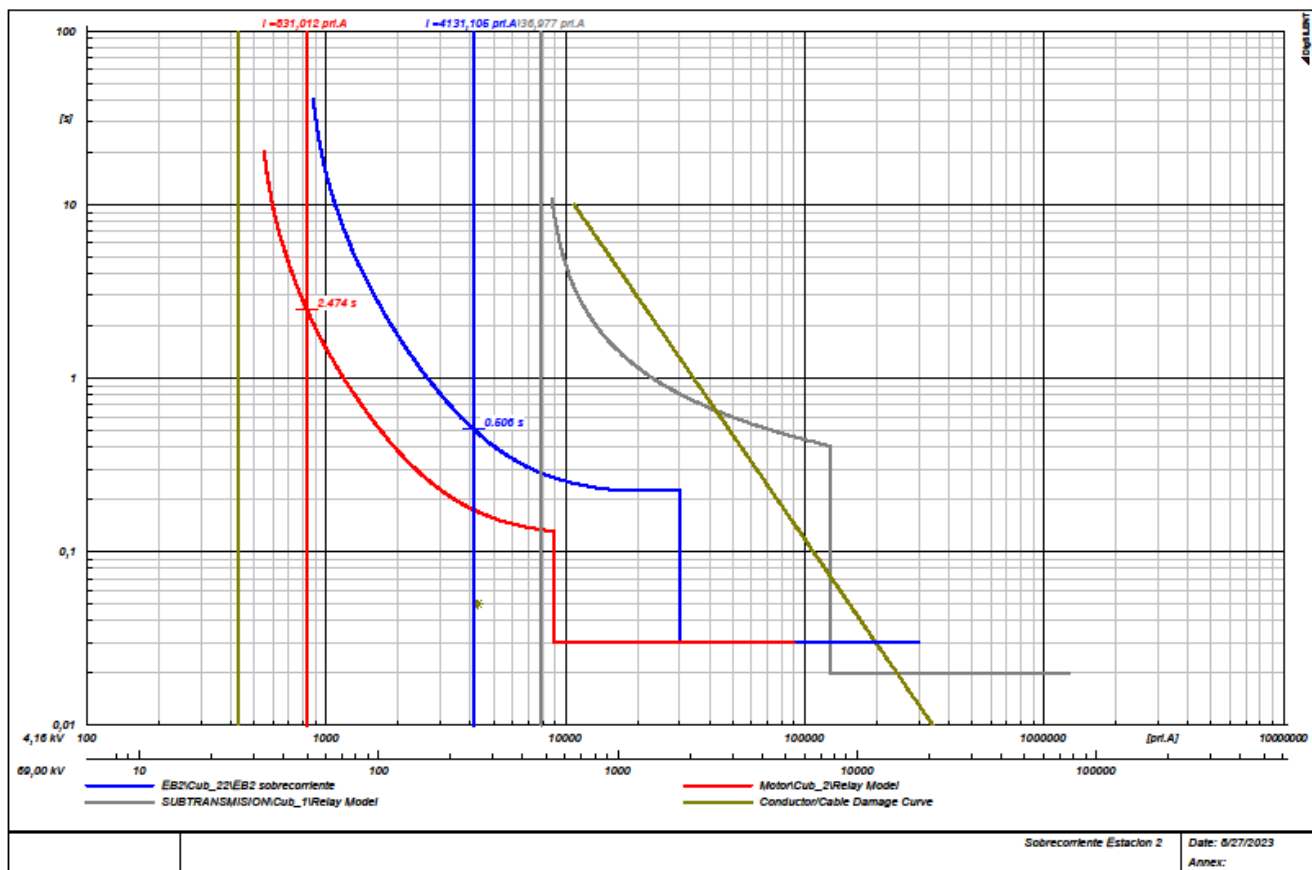


Para el caso de la estación de bombeo 3 mostrado en la Figura 3.6, se evidencia una actuación de los relés de los motores y de la barra general al mismo tiempo, esto debido a que el relé de protección GE 735 que se encuentra en la barra de EB3 permite una relación de protección

máxima de $20 \times CT$ en la actuación de su protección instantánea, es decir, un máximo de 20 [kA] y las corrientes de cortocircuito al siempre ser mayores a este valor, provocarían una actuación permanente de este relé ante eventos de falla. Esto puede ser un problema puesto que se desconectarán los 3 motores que se encuentra en dicha estación de bombeo de forma instantánea de la red, es por ello que para este sistema se recomienda el uso de otro relé de protección con mayores capacidades como lo son el GE 760 usado en las otras estaciones de bombeo.

Figura 3.1

Actuación de los relés de protección de EB2 ante una falla trifásica en los terminales del grupo de bombeo 10.



En la estación de bombeo 2 mostrado en la Figura 3.7, se observa una actuación por parte de los relés de protecciones de los motores y de la barra general en tiempos mayores a los de EB3,

2.474 [s] y 0.506 [s] respectivamente. Este funcionamiento es necesario porque estos relés sirven de respaldo para EB3 ante fallas eléctrica ya que como se observa en la Figura 3.7, la subestación “La Toma” no llega a detectar dicha falla y sus protecciones no actuaran. Además, hay que recordar que EB3 se encuentra conectada a partir de una interconexión con EB2 por lo que es necesario que esta sea un respaldo ante cualquier perturbación para EB3.

Por último, se evidenciará el efecto de la actuación de los relés de protección de los motores ante eventos de falla en la barra general de cada estación de bombeo puesto que en estos casos únicamente debería actuar el relé de cada barra ya que el cortocircuito se encuentra en su zona de actuación.

Figura 3.1

Actuación de los relés de motores de EB2 ante falla en la barra de EB2.

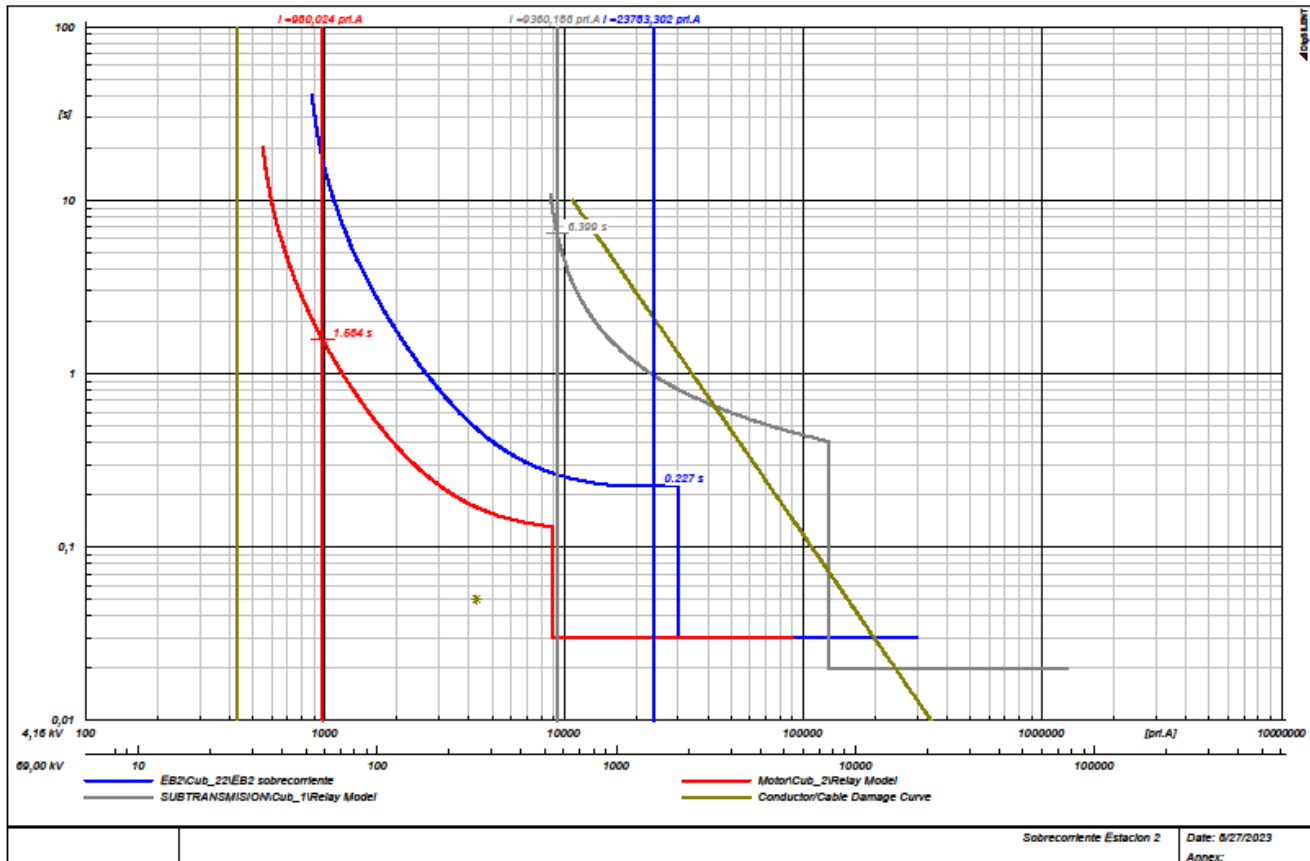
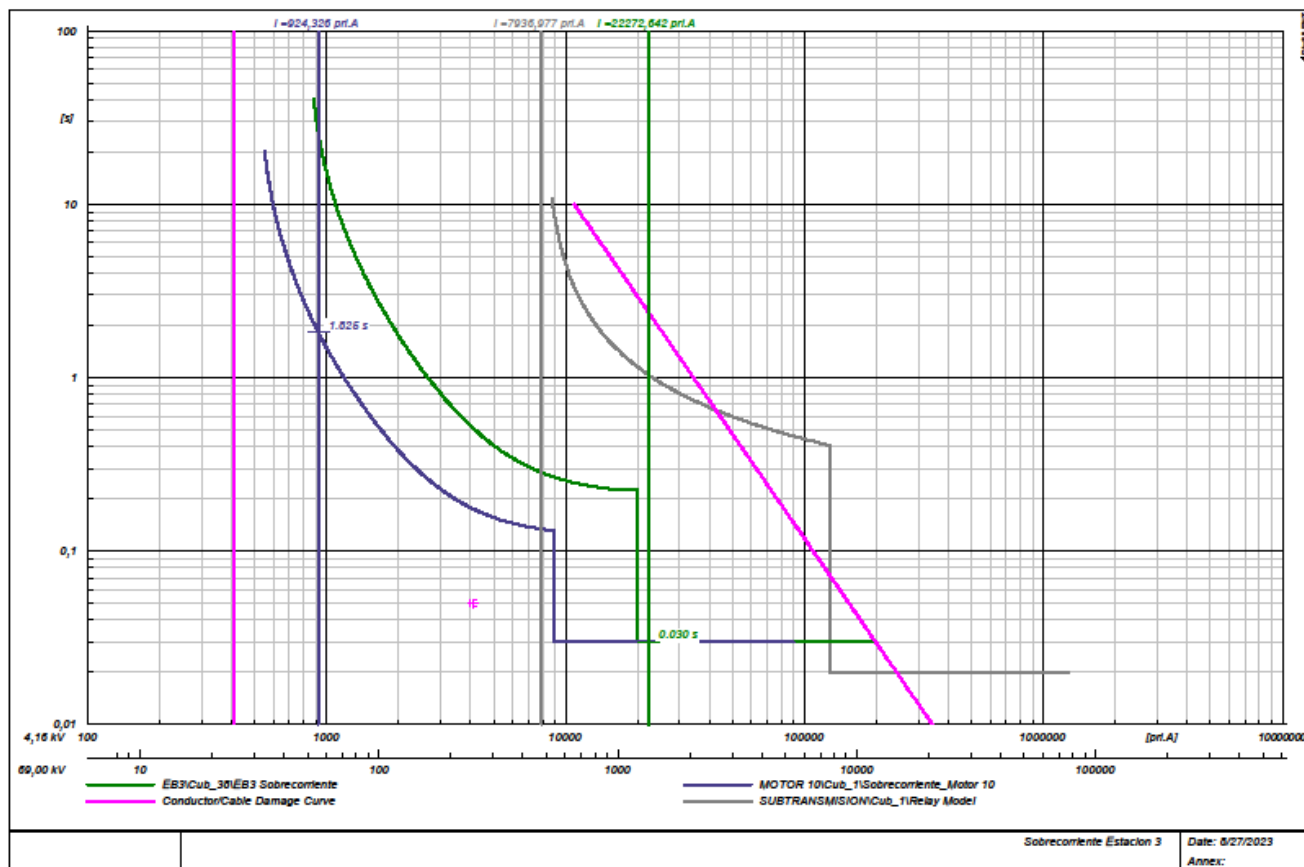


Figura 3.1

Actuación de los relés de motores de EB3 ante falla en la barra de EB3.



Ante eventos de falla en la barra de alimentación de cada estación de bombeo se puede observar en la Figura 3.9, que únicamente actúan los relés de dichas barras lo cual es el objetivo de la coordinación ya que estas tienen como prioridad la protección de toda la estación de bombeo en general, aun así, los relés de protecciones de los motores quedarían como un respaldo ante algún problema que evite la actuación de estos relés de protección de barras generales.

En base a los ajustes colocados y los resultados obtenidos por estos mismos, se puede evidenciar que las protecciones actúan de forma correcta con obediencia, fiabilidad y seguridad ante distintos eventos de falla que puedan ocurrir dentro de su zona de actuación, este es el objetivo de una buena coordinación de protecciones y lo que se ha tratado de lograr en conjunto con la

planta de bombeo “La Toma” ya que este estudio dará un mayor grado de seguridad y confianza a cada una de la estaciones de bombeo y operadores que son de gran importancia para el consumo de agua potable de cada uno de los ciudadanos de la ciudad de Guayaquil.

Capítulo 4

4. Conclusiones y Recomendaciones

El estudio de cortocircuito y coordinación de protecciones que se ha realizado a las estaciones de bombeo 2 y 3 de la planta “La Toma”, ha sido un reto y un trabajo complejo de llevar a cabo durante los últimos 3 meses, puesto que ha sido necesario considerar cada una de las especificaciones de las estaciones de bombeo que tienen una gran antigüedad, para realizar los ajustes de protecciones eficaces. Aun así, era un trabajo necesario y muy importante para la gente que opera la planta, ya que este análisis es una apertura para brindar mayor seguridad a la red actual, un respaldo de información que precisaban y que en un futuro este estudio sirva de base para otros tipos de procedimientos que se requieran implementar en las estaciones de bombeo. Los resultados mostrados en la sección anterior han sido exitosos puesto que presentan actuaciones correctas por parte de los relés de protección en tiempos óptimos, lo cual ha sido el principal objetivo de este proyecto y que se ha cumplido. A continuación, se presentarán las conclusiones y recomendaciones del estudio realizado.

4.1. Conclusiones

- Los resultados derivados de las pruebas de cortocircuito realizadas en las estaciones de bombeo dos y tres demuestran que los motores contribuyen a la disrupción eléctrica, específicamente en el momento inicial del aumento repentino de la corriente de cortocircuito generada.
- Mediante el uso del software de diseño DigSilent, se llevó a cabo la representación de cada una de las estaciones de bombeo dentro de la red eléctrica de la planta La Toma, comenzando desde el punto de conexión a su línea de suministro de 69 KV proporcionada por la subestación de Pascuales.

- Se realizó la coordinación de las protecciones pertinentes en las estaciones 2 y 3 de la planta “La Toma”, exhibiendo los tiempos de respuesta ante posibles fallas eléctricas, tanto en los motores como en las barras del sistema.
- Se generaron las gráficas que representan las respuestas de sobre corriente en sus modalidades temporizada e instantánea para las barras, así como para cada uno de los motores presentes en las estaciones de bombeo 2 y 3.
- Se examinó el desempeño individual de los motores durante su proceso de arranque, enfatizando que su corriente inicial está influenciada por elementos externos, como la turbidez del río.
- Se tomó en cuenta la curva que describe el límite de capacidad del cable eléctrico utilizado para conectar los motores al momento de sincronizar las medidas de protección contra sobrecorriente en cada uno de los motores eléctricos presentes en las estaciones de bombeo 2 y 3.

4.2. **Recomendaciones**

- Llevar a cabo pruebas eléctricas en cada uno de los relés utilizados en la planta “La Toma”, con el propósito de verificar y asegurar el correcto desempeño de todas las salvaguardias implementadas para la planta.
- Realizar una evaluación proyectada sobre posibles escenarios de cortocircuito y la correcta sincronización de los mecanismos de protección en las estaciones de bombeo restantes, con el propósito de actualizar los parámetros de ajuste en los dispositivos de relé de protección. Este análisis tiene la finalidad de asegurar que el sistema esté preparado para eventuales situaciones de emergencia, manteniendo al mismo tiempo un nivel elevado de funcionamiento confiable y eficiente en las instalaciones.

- Actualizar el esquema unifilar de la red eléctrica incorporando la información proporcionada, con el propósito de obtener una representación visual más precisa y comprensible del sistema en su conjunto. Esta acción permitirá obtener una visión detallada y completa de la disposición y conexiones de los componentes eléctricos, lo que resulta esencial para comprender y gestionar de manera efectiva la estructura eléctrica en su totalidad.

Referencias

- [1] F. J. R. Reyes, R. G. Hernández y J. S. García, «Coordinación de protecciones para un sistema eléctrico industrial,» México , 2009.
- [2] IEEE. std. 551-2006, IEEE Recommended Practice for Calculating Short-Circuit in Industrial and Commercial Power Systems., New York, 2006.
- [3] IEC. 60909-0, Short-Circuit currents in three-phase a.c. systems, 2016.
- [4] IEEE. std. 242-2001, «IEEE Recommended Practice for Protection and Coordination of Industrial and Commercial Power Systems.,» New York, 2001.
- [5] J. C. B. Quesada, «Estudio de cortocircuito y coordinacion de protecciones en CVG ALUNASA.,» 2014.
- [6] R. T. AMADOR, «PROTECCIONES ELECTICAS,» BOGOTA , 2007.
- [7] H. E. Reyes, «electricaltopics.info,» 16 Abril 2021. [En línea]. Available: <https://www.electricaltopics.info/2021/04/abc-de-los-reles-direccionales-de.html>. [Último acceso: 5 Junio 2023].
- [8] Y. C. R.-. F. P. Yauli, «Estudio de coordinacion de protecciones en Subtransmision de la Empresa Electrica Quito,» IEEE, Quito , 2018.
- [9] ABB, «Tecnicas avanzadas de selectividad,» ABB, 2018.
- [10] R. d. J. G. Morales, «Principio de proteccion diferencial de transformadores aplicando redes neuronales de base radial,» Nuevo Leon , 2004.
- [11] S. ELeCtric, «Protección de infratensión (ANSI 27),» 2017. [En línea]. Available:<https://www.productinfo.schneider-electric.com/micrologicxuserguide/doc/a0102-micrologic->

x/Spanish/BM_MasterPact%20MTZ%20MicroLogic%20X_b5effd44_es_T001597810.xml/\$/TPC_UndervoltageProtection_b5effd44_es_T001598265

- [12] A. Rusinol, 21 05 2009. [En línea]. Available: <https://electricidad-viatger.blogspot.com/2009/05/desequilibrios-de-tension-e-intensidad.html>.
- [13] J. G. Gomez, «VyP Hidro Asesores,» 06 08 2020. [En línea]. Available: <https://vyphidroasesores.com/el-efecto-de-la-variacion-del-voltaje-en-los-motores-electricos/>.

Apéndice A

Anexo 1

Estudio de cortocircuito proporcionado por la planta "La Toma".

CASO 1							
Bus - Line to Ground Fault - kAmps - ANSI/IEEE							
Bus Name	Pre-Fit kV	SC kA at the following Times					
		1/2-Cycle		5-Cycle		Steady	
		X/R	I _{sym}	X/R	I _{sym}	X/R	I _{sym}
300 kW	4	15,05	21	15,05	20	15,05	19
ALTR	2	4,633	2	4,633	2	4,633	2
A_M_1	4	8,430	20	8,430	19	8,430	17
A_M_2	4	8,430	20	8,430	19	8,430	17
A_M_3	4	8,430	20	8,430	19	8,430	17
BUS_001	14	21,09	4	21,09	4	21,09	4
BUS_002	14	24,13	4	24,13	3	24,13	3
BUS_0021	14	20,16	4	20,16	4	20,16	4
BUS_0023	14	20,16	4	20,16	4	20,16	4
BUS_003	4	16,81	22	16,81	21	16,81	19
BUS_006	4	14,61	21	14,61	20	14,61	18
BUS_007	4	14,3	22	14,3	21	14,3	19
BUS_00P1	68	9,587	7	9,587	7	9,587	6
BUS_00P2	68	9,585	7	9,585	7	9,585	6
BUS_2_Ref	68	9,585	7	9,585	7	9,585	6
BUS_ALTR	2	4,636	2	4,636	2	4,636	2
BUS_AUX_2_1	4	15,25	21	15,25	20	15,25	19
BUS_AUX_2_2	4	15,18	21	15,18	20	15,18	19
BUS_AUX_2_3	4	15,18	21	15,18	20	15,18	19
BUS_AUX_2_4	4	15,11	21	15,11	20	15,11	18
BUS_N	4	15,46	21	15,46	20	15,46	19
CAP_1	4	14,55	21	14,55	20	14,55	18
CAP_2	4	14,55	21	14,55	20	14,55	18
CAP_3	4	14,55	21	14,55	20	14,55	18
CAP_3_1	4	14,24	22	14,24	21	14,24	19
CAP_3_2	4	14,24	22	14,24	21	14,24	19
CAP_3_3	4	14,24	22	14,24	21	14,24	19
CAP_3_4	4	16,7	22	16,7	21	16,7	19
CAP_6	4	15,38	21	15,38	20	15,38	19
CAP_7	4	15,38	21	15,38	20	15,38	19
CAP_AUX	4	15,11	21	15,11	20	15,11	18
Cap_001	14	20,09	4	20,09	4	20,09	4
Cap_003	14	22,81	4	22,81	3	22,81	3
Cap_004	14	22,81	4	22,81	3	22,81	3
Cap_005	4	16,45	22	16,45	21	16,45	19
Cap_006	4	16,45	22	16,45	21	16,45	19
Cap_007	4	16,45	22	16,45	21	16,45	19
Cap_008	4	16,45	22	16,45	21	16,45	19
M-101-A1	14	19,39	4	19,39	4	19,39	3
M-101-A2	14	19,17	4	19,17	4	19,17	3
M-101-B1	14	21,43	3	21,43	3	21,43	3
M-101-B2	14	21,42	3	21,42	3	21,42	3
M-101-B3	14	21,39	3	21,39	3	21,39	3
M_Q1	4	8,595	21	8,595	20	8,595	18
M_Q2	4	8,595	21	8,595	20	8,595	18
M_Q3	4	8,595	21	8,595	20	8,595	18
M_Q4	4	8,595	21	8,595	20	8,595	18
PLANTA DE TRATAMIENT	14	19,96	3	19,96	3	19,96	3
S/E_PASCUALES LA TOM	68	20,14	12	20,14	12	20,14	11
SERVICIOS_AUXILIARES	0	3,296	6	3,296	6	3,296	6

Anexo 2

Estudio de cortocircuito proporcionado por la planta "La Toma"- Caso: Falla línea a línea.

CASO 1							
Bus - Line to Line Fault - kAmps - ANSI/IEEE							
Bus Name	Pre-Fit KV	SC kA at the following times					
		1/2-Cycle		5-Cycle		Steady	
		X/R	I _{sym}	X/R	I _{sym}	X/R I _{sym}	
300 kW	4	15,05	19	15,05	18	15,05	15
ALTR	2	4,633	2	4,633	2	4,633	2
A_M 1	4	8,430	18	8,430	17	8,430	15
A_M 2	4	8,430	18	8,430	17	8,430	15
A_M 3	4	8,430	18	8,430	17	8,430	15
BUS 001	14	21,09	8	21,09	7	21,09	6
BUS 002	14	24,13	8	24,13	7	24,13	6
BUS 0021	14	20,16	8	20,16	7	20,16	6
BUS 0023	14	20,16	8	20,16	7	20,16	6
BUS 003	4	16,81	20	16,81	19	16,81	16
BUS 006	4	14,61	18	14,61	17	14,61	15
BUS 007	4	14,3	20	14,3	18	14,3	6
BUS 00P1	68	9,587	7	9,587	7	9,587	6
BUS 00P2	68	9,585	7	9,585	7	9,585	6
BUS 2 Ref	68	9,585	7	9,585	7	9,585	2
BUS ALTR	2	4,636	2	4,636	2	4,636	2
BUS_AUX 2_1	4	15,25	19	15,25	18	15,25	16
BUS_AUX 2_2	4	15,18	19	15,18	17	15,18	15
BUS_AUX 2_3	4	15,18	19	15,18	17	15,18	15
BUS_AUX 2_4	4	15,11	18	15,11	17	15,11	15
BUS_N	4	15,46	19	15,46	18	15,46	15
CAP 1	4	14,55	18	14,55	17	14,55	15
CAP 2	4	14,55	18	14,55	17	14,55	15
CAP 3	4	14,24	19	14,24	18	14,24	15
CAP 3_1	4	14,24	19	14,24	18	14,24	15
CAP 3_2	4	14,24	19	14,24	18	14,24	15
CAP 3_3	4	14,24	19	14,24	18	14,24	15
CAP 3_4	4	16,7	20	16,7	18	16,7	16
CAP 6	4	15,38	19	15,38	17	15,38	15
CAP 7	4	15,38	19	15,38	17	15,38	15
CAP_AUX	4	15,11	18	15,11	17	15,11	15
Cap_001	14	20,09	8	20,09	7	20,09	6
Cap_003	14	22,81	8	22,81	7	22,81	5
Cap_004	14	22,81	8	22,81	7	22,81	5
Cap_005	4	16,45	20	16,45	18	16,45	16
Cap_006	4	16,45	20	16,45	18	16,45	16
Cap_007	4	16,45	20	16,45	18	16,45	16
Cap_008	4	16,45	20	16,45	18	16,45	16
M-101-A1	14	19,39	8	19,39	7	19,39	6
M-101-A2	14	19,17	8	19,17	7	19,17	6
M-101-B1	14	21,43	8	21,43	7	21,43	5
M-101-B2	14	21,42	8	21,42	7	21,42	5
M-101-B3	14	21,39	8	21,39	7	21,39	5
M_Q1	4	8,595	19	8,595	18	8,595	15
M_Q2	4	8,595	19	8,595	18	8,595	15
M_Q3	4	8,595	19	8,595	18	8,595	15
M_Q4	4	8,595	19	8,595	18	8,595	15
PLANTA DE TRATAMEN	14	19,96	8	19,96	7	19,96	5
S/E PASCUALES LA TOM	68	20,14	9	20,14	9	20,14	8
SERVICIOS AUXILIARES	0	3,296	5	3,296	5	3,296	5

Anexo 3

Estudio de cortocircuito proporcionado por la planta "La Toma" - Caso: Falla línea a tierra.

CASO 1							
Bus - Line to Ground Fault - kAmps - ANSIEEE							
Bus Name	Pre-Ft kV	SC KA at the following Times					
		1/2 Cycle		5 Cycles		Steady	
		X/R	Isym	X/R	Isym	X/R	Isym
300 kW	4	15.05	21	15.05	20	15.05	19
ALTR	2	4.633	2	4.633	2	4.633	2
A_M_1	4	8.430	20	8.430	19	8.430	17
A_M_2	4	8.430	20	8.430	19	8.430	17
A_M_3	4	8.430	20	8.430	19	8.430	17
BUS_001	14	21.09	4	21.09	4	21.09	4
BUS_002	14	24.13	4	24.13	3	24.13	3
BUS_0021	14	20.16	4	20.16	4	20.16	4
BUS_0023	14	20.16	4	20.16	4	20.16	4
BUS_003	4	16.81	22	16.81	21	16.81	19
BUS_006	4	14.61	21	14.61	20	14.61	18
BUS_007	4	14.3	22	14.3	21	14.3	19
BUS_00P1	68	9.587	7	9.587	7	9.587	6
BUS_00P2	68	9.585	7	9.585	7	9.585	6
BUS_2_Ref	68	9.585	7	9.585	7	9.585	6
BUS_ALTR	2	4.636	2	4.636	2	4.636	2
BUS_AUX_2_1	4	15.25	21	15.25	20	15.25	19
BUS_AUX_2_2	4	15.18	21	15.18	20	15.18	19
BUS_AUX_2_3	4	15.18	21	15.18	20	15.18	19
BUS_AUX_2_4	4	15.11	21	15.11	20	15.11	18
BUS_N	4	15.46	21	15.46	20	15.46	19
CAP_1	4	14.55	21	14.55	20	14.55	18
CAP_2	4	14.55	21	14.55	20	14.55	18
CAP_3	4	14.55	21	14.55	20	14.55	18
CAP_3_1	4	14.24	22	14.24	21	14.24	19
CAP_3_2	4	14.24	22	14.24	21	14.24	19
CAP_3_3	4	14.24	22	14.24	21	14.24	19
CAP_3_4	4	16.7	22	16.7	21	16.7	19
CAP_6	4	15.38	21	15.38	20	15.38	19
CAP_7	4	15.38	21	15.38	20	15.38	19
CAP_AUX	4	15.11	21	15.11	20	15.11	18
Cap_001	14	20.09	4	20.09	4	20.09	4
Cap_003	14	22.81	4	22.81	3	22.81	3
Cap_004	14	22.81	4	22.81	3	22.81	3
Cap_005	4	16.45	22	16.45	21	16.45	19
Cap_006	4	16.45	22	16.45	21	16.45	19
Cap_007	4	16.45	22	16.45	21	16.45	19
Cap_008	4	16.45	22	16.45	21	16.45	19
M-101-A1	14	19.39	4	19.39	4	19.39	3
M-101-A2	14	19.17	4	19.17	4	19.17	3
M-101-B1	14	21.43	3	21.43	3	21.43	3
M-101-B2	14	21.42	3	21.42	3	21.42	3
M-101-B3	14	21.39	3	21.39	3	21.39	3
M_Q1	4	8.595	21	8.595	20	8.595	18
M_Q2	4	8.595	21	8.595	20	8.595	18
M_Q3	4	8.595	21	8.595	20	8.595	18
M_Q4	4	8.595	21	8.595	20	8.595	18
PLANTA DE TRATAMIENT	14	19.96	3	19.96	3	19.96	3
S/E PASCUALES LA TOM	68	20.14	12	20.14	12	20.14	11
SERVICIOS AUXILIARES	0	3.296	6	3.296	6	3.296	6

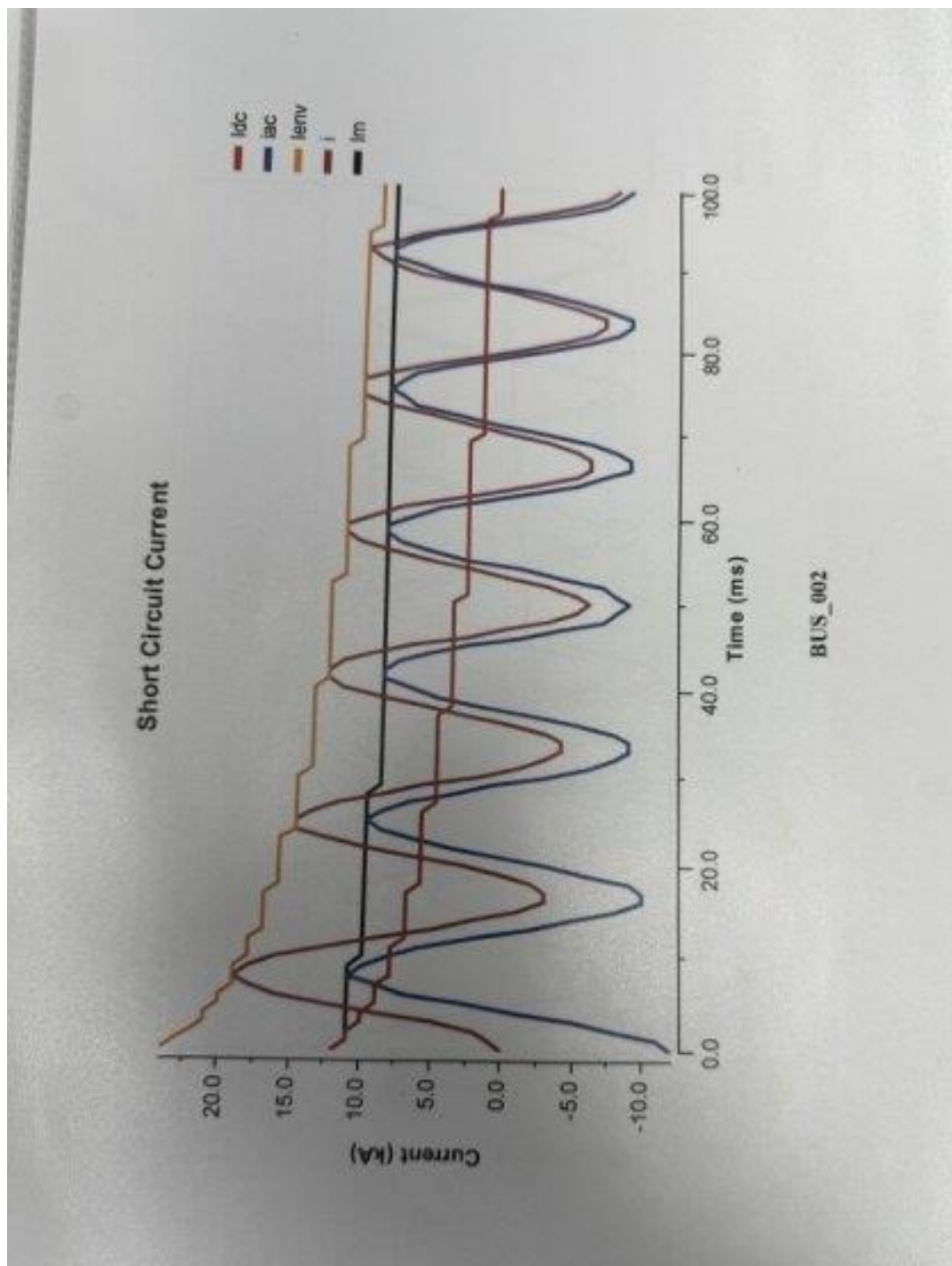
Anexo 4

Estudio de cortocircuito proporcionado por la planta "La Toma" - Caso: Falla trifásica.

CASO 3							
Bus - Three Phase Bolted Fault - kAmps - ANSI/IEEE							
Bus Name	Pre-Fit kV	SC kA at the following Times					
		1/2-Cycle		3-Cycle		Steady	
		X/R	Isym	X/R	Isym	X/R	Isym
300 kW	4	13.74	22	13.30	21	12.37	18
ALTR	2	4.625	2	4.635	2	4.658	2
A_M_1	4	7.151	21	7.090	20	6.878	17
A_M_2	4	7.151	21	7.090	20	6.878	17
A_M_3	4	7.151	21	7.090	20	6.878	17
BUS_001	14	17.72	10	16.61	9	14.01	7
BUS_002	14	17.67	8	16.74	8	14.55	6
BUS_0021	14	17.01	10	16.04	9	13.68	7
BUS_0022	14	17.01	10	16.04	9	13.68	7
BUS_0023	14	17.01	10	16.04	9	13.68	7
BUS_003	4	15.18	23	14.66	22	13.29	18
BUS_006	4	13.01	22	12.6	20	11.56	18
BUS_007	4	13.15	23	12.88	21	12.02	18
BUS_00P1	68	7.509	9	7.323	9	6.803	8
BUS_00P2	68	7.508	9	7.322	9	6.803	8
BUS_2_Ref	68	7.508	9	7.322	9	6.803	8
BUS_ALTR	2	4.628	2	4.638	2	4.661	2
BUS_AUX_2_1	4	13.81	22	13.53	21	12.49	18
BUS_AUX_2_2	4	13.86	22	13.49	20	12.46	18
BUS_AUX_2_3	4	13.86	22	13.49	20	12.46	18
BUS_AUX_2_4	4	13.81	21	13.45	20	12.44	18
BUS_N	4	14.08	22	13.69	21	12.6	18
CAP_1	4	12.98	21	12.57	20	11.54	18
CAP_2	4	12.98	21	12.57	20	11.54	18
CAP_3	4	12.98	21	12.57	20	11.54	18
CAP_3_1	4	13.11	23	12.85	21	12	18
CAP_3_2	4	13.11	23	12.85	21	12	18
CAP_3_3	4	13.11	23	12.85	21	12	18
CAP_3_4	4	15.1	23	14.6	21	13.26	18
CAP_6	4	14.03	22	13.64	20	12.58	18
CAP_7	4	14.03	22	13.64	20	12.58	18
CAP_AUX	4	13.81	21	13.45	20	12.44	18
Cap_001	14	16.96	10	16	9	13.66	7
Cap_002	14	16.96	10	16	9	13.66	7
Cap_003	14	17.02	8	16.2	8	14.22	6
Cap_005	4	14.89	23	14.42	21	13.13	18
Cap_006	4	14.89	23	14.42	21	13.13	18
Cap_007	4	14.89	23	14.42	21	13.13	18
Cap_008	4	14.89	23	14.42	21	13.13	18
M-101-A1	14	15.86	10	15.03	9	12.95	7
M-101-A2	14	15.62	10	14.82	9	12.81	7
M-101-A3	14	15.62	10	14.82	9	12.81	7
M-101-B1	14	15.96	8	15.2	8	13.39	6
M-101-B2	14	15.96	8	15.2	8	13.39	6
M_Q1	4	7.438	22	7.450	21	7.353	18
M_Q2	4	7.438	22	7.450	21	7.353	18
M_Q3	4	7.438	22	7.450	21	7.353	18
M_Q4	4	7.438	22	7.450	21	7.353	18
PLANTA DE TRATAMEN	14	15.53	8	14.94	7	13.39	6
S/E PASCUALES LA TOMA	68	20.09	12	20.23	12	20	11
SERVICIOS AUXILIARES	0	3.288	6	3.293	6	3.304	6

Anexo 5

Curva de corriente de falla en los terminales de los motores proporcionado por la planta "La Toma" – Barra 002.



Anexo 6

Curva de corriente de falla en los terminales de los motores proporcionado por la planta "La Toma" – Barra 003.

