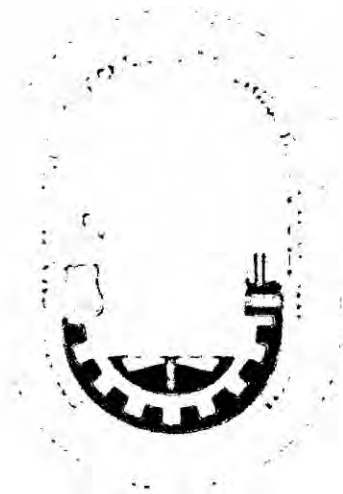


UNIVERSIDAD NACIONAL DEL CALLAO
FACULTAD DE INGENIERIA ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA
Escuela Profesional de Ingeniería Eléctrica



TESIS

**“PRUEBAS ELÉCTRICAS COMO FACTOR DE AJUSTE EN
LA COORDINACIÓN DE PROTECCIONES, CASO: RED MT
20kV- METRO DE LIMA”**

AUTORES:

- **Espinoza Tambracc, Miguel Angel**
- **Gomez Mego, Magno Sócrates**
- **Vilcapoma Bohorquez, Wilmer Daniel**

ASESOR:

- **Dr. Juan Herber Grados Gamarra**

Callao - 2016



**FACULTAD DE INGENIERÍA ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA ELÉCTRICA**

TESIS PARA OBTENER EL TITULO PROFESIONAL DE INGENIERO ELECTRICISTA

**“PRUEBAS ELECTRICAS COMO FACTOR DE AJUSTE EN LA COORDINACIÓN DE
PROTECCIONES, CASO: RED MT 20 KV – METRO DE LIMA”**

**PRESENTADO POR LOS BACHILLERES:
ESPINOZA TAMBRACC MIGUEL ANGEL**

**GÓMEZ MEGO MAGNO SÓCRATES
VILCAPOMA BOHORQUEZ WILMER DANIEL**

ASESOR:

DR. ING. JUAN HERBER GRADOS GAMARRA

CALIFICACIÓN:

15(QUINCE)



**Dr. Ing. SANTIAGO LINDER RUBIÑOS
JIMENEZ**
Presidente de Jurado



**Mg. Ing. CESAR AUGUSTO SANTOS
MEJIA**
Secretario



Ing. ERNESTO RAMOS TORRES
Suplente

**CALLAO – PERÚ
2016**

DEDICATORIA

Dedicamos la presente tesis a todos aquellos que creyeron en nosotros; a nuestros padres quienes nos brindaron la educación necesaria para poder salir adelante en la vida; a nuestro asesor Juan Herber Grados Gamarra, que sin su apoyo, nunca hubiésemos podido realizar la presente tesis, y por último a la Universidad Nacional del Callao, por ser cuna de todos nuestros conocimientos y habernos albergado en sus aulas durante nuestra etapa universitaria.

PRÓLOGO

Cuando nos propusimos realizar el presente trabajo de investigación, consideramos que era la oportunidad idónea para investigar sobre un tema novedoso y que paulatinamente está tomando gran importancia en cuanto al desarrollo del transporte en nuestro país. Este tema se centra fundamentalmente en la Línea 1 del Metro de Lima, que es la primera Línea en construirse de las seis que conforman la red básica del Metro de Lima.

En el 2012, la Línea 1 entró en operación comercial, operando desde la estación Villa El salvador hasta la estación Miguel Grau y con la culminación de la construcción del tramo 2 de la Línea 1, en julio del 2014, se completó el total

del recorrido, uniendo así los distritos de Villa El Salvador y San Juan de Lurigancho.

En la presente tesis nos basaremos específicamente en analizar el sistema eléctrico de MT, que es la principal fuente de suministro de energía para la operación de los trenes y los servicios auxiliares que corresponden a las 26 estaciones. Por tal motivo surge el tema de nuestra tesis, el cual se titula: "Pruebas eléctricas como factor de ajuste en la coordinación de protecciones, caso: red MT 20 Kv- Metro de Lima".

El trabajo de investigación que presentamos está básicamente estructurado en tres grandes partes. En la primera parte se realiza una presentación del marco teórico, donde se desarrolla todo lo referente al sistema eléctrico de la Línea 1; en la segunda parte se realiza una descripción de las pruebas ejecutadas, junto con el análisis de las corrientes máximas registradas durante estas pruebas; en la tercera parte se explica el factor de corrección aplicado a los valores de corriente registrados durante las pruebas para que los resultados analizados sean los más precisos y finalmente se realizará la presentación de las conclusiones y recomendaciones.

Estamos plenamente seguros que el tema tratado va a ser de gran utilidad para orientar e impulsar a la futura generación de estudiantes de ingeniería eléctrica a investigar con respecto al sistema eléctrico en el transporte ferroviario, tema que con el pasar de los años será de gran importancia para el desarrollo del transporte en nuestro país.

Finalmente queremos agradecer a quienes hicieron posible la realización de la presente tesis, principalmente, a nuestra familia que sin su apoyo incondicional, nada de esto hubiese sido posible, y a Dios por iluminar cada uno de nuestros pasos en nuestra vida profesional.

RESUMEN

El objetivo de la presente tesis es determinar mediante un conjunto de pruebas realizadas con la circulación de los trenes, si el equipamiento del sistema de MT del tramo antiguo de la Línea 1 del Metro de Lima, se encuentra en condiciones de ofrecer las garantías necesarias para operar satisfactoriamente en las condiciones más exigentes, siendo esta la circulación de los trenes al intervalo de tres minutos, la frecuencia de circulación de diseño en operación comercial.

La necesidad de verificar las condiciones en la red del MT del tramo antiguo surgió durante los primeros años de operación en los que se presentaron diferentes tipos de anomalías durante la operación comercial como sobrecargas y aperturas de los dispositivos de protección de sobrecorriente. Por ello que se considera la antigüedad de este tramo del año 1990, comparándolo con el tramo 1 y 2 culminados en el 2012 y 2014, presenta una brecha tecnológica al momento de analizar la confiabilidad en la operación.

Se instalaron equipos analizadores de calidad de energía en puntos estratégicos de la red de MT; estos registraron las corrientes máximas en la red de MT, debido a que las pruebas se realizaron sin pasajeros, se calculó un factor de ajuste.

Finalmente, se determinó que la adquisición de nuevos trenes y el uso de frecuencia de diseño, superará la capacidad del equipamiento antiguo, y será necesario realizar un proyecto con el reemplazo de este, especialmente de la totalidad de cables MT de este tramo, celdas MT y dispositivos de protección.

Palabras claves: Factor de ajuste, condiciones del sistema eléctrico, trazado antiguo de la Línea 1, circulación de trenes, corriente máxima, red de MT.

ABSTRACT

The aim of this thesis is determine through a set of tests done with trains in motion, if the equipment of the medium voltage (MV) system of the old section of the Línea 1 del Metro de Lima, has the required conditions to guarantee the successful operation of trains in the most demanding conditions, it means that trains must go over each three-minutes. This is the frequency design of time of trains in motion that was designed for the commercial operation of this transport system.

The need to verify the conditions in the MV network of the old section of the Línea 1 came up during the early years of operation. In these years various types of irregularities were presented in the power supply during the commercial operation of trains. Between the main irregularities we have: overloads in the MV system and opens of the overcurrent protection devices. These irregularities took place with more frequency in the rectifier substations and electricity cabinets of the old section of the Línea 1. We must have in mind that the equipment of the section is old, it dates from 1990. If we compared the equipment of the section 1 and section 2, which was finished in 2012 and 2014 respectively, it is perceived an enormous technological gap when analyzing the reliability of the operation.

Nowadays is essential to check the conditions of the old section, as we can see the great success that Línea 1 has received as a system of transportation. The current user demand has exceeded the average that has been considered, which basically is established on the number and capacity of trains, that is why

the consortium that holds the concession for Línea 1 is talking with the government in order to acquire 20 additional trains and thus the system can operate at the frequency of the set design; this means, at a frequency of three minutes. In order to establish whether the MV system conditions were the precise ones during the tests were done, analyzers equipment of power quality were installed in strategic points of the MV network; these analyzers registered the maximum currents and events in the MV network when the trains were in motion according to the frequency design. In addition, as the tests were done without passengers and after the hours of commercial operation, the calculation of an adjustment factor was performed using measurements that were done previous days of the testing; these measurements were done during commercial hours, making it possible to establish accurate magnitudes of current levels of MV network.

After incorporating the calculated adjustment factor at current values were obtained in the tests, it was possible to make contrasts with the technical specifications of the equipment that constitute the MV system of the old section, focusing mainly on MV cables and protection devices of overcurrent.

Finally, it was determined through the analysis of the tests that the acquirer of new trains and the implementation of the frequency design, will exceed the capacity of the old section's equipment so it will be necessary to make a project containing the replacement of this old equipment in MV system, especially the replacement of all the MV cables, MV cells and protection devices of this section.

Key words: Adjustment factor, electrical system conditions, old section of the Línea 1, trains in motion, maximum currents, MV network.

INDICE

HOJA DE REFERENCIA DEL JURADO Y APROBACIÓN;Error! Marcador no definido.

DEDICATORIA	II
PRÓLOGO	II
ABSTRACT	2
I. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN	9
1.1 DETERMINACIÓN DEL PROBLEMA	9
1.2 FORMULACIÓN DEL PROBLEMA	10
1.3 OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN	11
1.4 JUSTIFICACIÓN DEL TRABAJO DE INVESTIGACIÓN	11
1.5 DELIMITACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN	11
II. MARCO TEÓRICO	13
2.1 DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA ELÉCTRICO	13
2.2 OPERACIÓN DEL SISTEMA ELÉCTRICO	15
2.3. FRECUENCIA DE PASO DE LOS TRENES	16
2.4 CANTIDAD DE TRENES EN LA VÍA	17
2.5. PARÁMETROS ELÉCTRICOS DEL SISTEMA DE MT	18
2.5.1 BARRAS	18
2.5.2 CABLES	19

2.5.3 TRANSFORMADORES	20
2.5.4 RELES DE PROTECCIÓN	22
III. VARIABLES E HIPOTESIS	25
3.1 OPERACIONALIZACIÓN DE LAS VARIABLES	25
3.2.1 Indicadores	25
3.3 HIPÓTESIS	25
3.3.1 HIPÓTESIS PRINCIPAL	25
3.3.1 HIPÓTESIS ESPECÍFICA	25
IV METODOLOGIA DE LA INVESTIGACIÓN	26
4.1 Tipo de Investigación.	26
4.2 Diseño de la Investigación.	26
4.3. Población y Muestra.	27
4.4 Técnicas e instrumentos de recolección de datos.	27
4.5. Plan de análisis estadísticos de datos.	28
4.6 DETERMINACIÓN DE LOS NIVELES DE CORRIENTE	28
4.6.1 ANTECEDENTES	28
4.6.2 DESCRIPCIÓN DE LAS PRUEBAS REALIZADAS	28
4.6.3 EQUIPOS UTILIZADOS Y SU PROGRAMACIÓN	34
4.6.4 RESULTADOS DE LAS MEDICIONES	37

4.6.5 ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS	44
4.6.5.b Comparación de los resultados con los valores de diseño	46
4.6.6 CÁLCULO DEL FACTOR DE CORRECCIÓN CONSIDERANDO TRENES CON PASAJEROS	49
4.6.6.c Resultados SEAT Grau	53
4.6.7 NIVELES DE CORRIENTE CONSIDERADOS	59
4.7 ANÁLISIS DE CORTOCIRCUITO	62
4.7.1 CONSIDERACIONES	62
4.7.2 ESCENARIOS DE OPERACIÓN	62
4.7.3 PODER DE RUPTURA DE INTERRUPTORES Y CAPACIDAD DE CORTOCIRCUITO DE LOS CABLES	63
4.7.4 RESULTADOS Y ANÁLISIS DEL CÁLCULO	64
4.8 EVALUACIÓN DE LOS RESULTADOS	68
4.9 ANÁLISIS DE LA COORDINACIÓN DE LAS PROTECCIONES	68
4.10 EQUIPOS DE PROTECCIÓN CONSIDERADOS	69
4.11 ESTADO ACTUAL DE LOS EQUIPOS DE PROTECCIÓN	69
4.12 CRITERIOS DE AJUSTE	70
4.13 COORDINACIÓN DE LOS EQUIPOS DE PROTECCIÓN	71
4.13.2 Protección y selectividad de los transformadores de rectificadores	78
4.13.3 Protección y selectividad de los transformadores de SS.AA	81

4.14 RESUMEN DE AJUSTES DE LOS RELÉS	81
V. CONCLUSIONES	82
VI. RECOMENDACIONES	83
VII. REFERENCIAS	84
VIII. MATRIZ DE CONSISTENCIA	86

I. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN

1.1 DETERMINACIÓN DEL PROBLEMA

Desde el inicio de la operación comercial de la LÍNEA 1 en el 2012 hasta la actualidad, el sistema de transporte viene operando bajo la frecuencia de circulación de seis minutos en hora punta y diez minutos en hora valle; sin embargo, durante los primeros años de operación se evidenciaron diversos factores que pusieron en cuestionamiento la capacidad del sistema eléctrico del tramo antiguo. El primer factor fue la sobrecarga del sistema de MT cuando se realizaba la alimentación completa del tramo 1 desde la SEAT PATIO (subestación de AT del tramo antiguo que abarca desde la estación patio hasta la estación atocongo), de acuerdo a las simulaciones del contratista del proyecto esto no debería ocurrir, ya que la totalidad del sistema eléctrico debería estar preparado para suministrar energía a toda la red eléctrica con la alimentación de dos de las tres SEAT con la que cuenta el sistema eléctrico de la LÍNEA 1 en caso de contingencia. El segundo factor fue que se vinieron presentando aperturas eventuales de los dispositivos de protección de sobrecorriente, principalmente en la estación Parque Industrial, estación que pertenece también al tramo antiguo. Estos dos factores generaron una gran interrogante respecto a si la red de MT del sistema eléctrico del tramo antiguo tiene las condiciones de fiabilidad y seguridad para operar cuando las exigencias del sistema sean mayores, esto en vista de la necesidad de incorporar mayor cantidad de trenes y reducir la frecuencia de circulación comercial entre trenes de seis a tres minutos (frecuencia de diseño del sistema) en hora punta, como respuesta a la excesiva demanda de usuarios. Para

resolver esta interrogante, se decidió realizar un conjunto de pruebas con los trenes circulando a las condiciones de diseño. Para ello con la finalidad de obtener datos precisos de las pruebas, los cuales podamos analizar y de esta manera emitir conclusiones con mayor credibilidad, se instalaron equipos analizadores de redes en puntos de medición estratégicos de las SEAT y SER del tramo 1, de esta manera se pudo registrar las corrientes máximas en la red de MT y los eventos suscitados durante las pruebas.

Por razones prácticas del servicio, las pruebas se realizaron con trenes sin pasajeros; es decir, fuera del horario de operación comercial, por lo que se determinó un factor de ajuste el cual se aplicó a los valores de corrientes máximas registrados por los equipos analizadores de redes y de esta forma obtener valores de corriente con un mayor grado de precisión.

1.2 FORMULACIÓN DEL PROBLEMA

1.2.1 PROBLEMA GENERAL

El problema de la presente tesis lo formularemos mediante la siguiente pregunta:

¿De qué manera la falta de las pruebas eléctricas como factores de ajuste sobre el sistema eléctrico en MT del tramo antiguo de la LÍNEA 1 impide operar a las máximas condiciones de operación del sistema eléctrico?

1.2.2 PROBLEMAS ESPECÍFICOS

La falta de pruebas eléctricas como factores de ajuste en la *LÍNEA 1 del metro de lima*, genera problemas en la operación a las máximas condiciones los cuales formulamos a través de la siguiente pregunta:

P1. ¿De qué manera mejorando las pruebas eléctricas permitiremos tener un mejor ajuste en las coordinaciones de la protección en la línea de MT 20Kv?

1.3 OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN

1.3.1 Objetivos generales

Proponer un modelo de pruebas eléctricas a las condiciones máximas de operación para obtener un factor de ajuste sobre el sistema eléctrico en MT del tramo antiguo de la LÍNEA 1.

1.3.2 Objetivos específicos

Describir, analizar y precisar un mejor ajuste en la coordinación de protección en la línea de MT 20 kV del tramo 1 de la LÍNEA 1.

1.4 JUSTIFICACIÓN DEL TRABAJO DE INVESTIGACIÓN

El presente proyecto de tesis se justifica pues con las pruebas eléctricas realizadas en el Tramo 1 de la Línea 1 de la red de MT en 20kV del metro de Lima. Se podrá comprobar si el sistema eléctrico podrá operar en las condiciones de diseño, lo que significa operar con 44 trenes a una frecuencia de 3 minutos, una vez que se incorporen 20 trenes adicionales a los 24 ya existentes.

1.5 DELIMITACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN

1.5.1 Alcances

- Determinación de la corriente máxima y del reparto de la corriente en las SER.

- Análisis de cortocircuito máximo y mínimo.
- Coordinación de la protección de sobrecorriente de SER y Cabinas eléctricas.
- Dar los valores de ajuste de los relés de protección.

1.5.2 Limitaciones

Una de las principales limitaciones es lo difícil de hacer pruebas en el horario de operación comercial de la Línea 1, para esto se hicieron pruebas en horarios que no afecten este periodo, obteniendo valores de corrientes, con el tren operando sin pasajeros, no siendo suficientes los valores obtenidos se tuvieron que realizar pruebas en condiciones normales (con pasajeros) para analizar la energía consumida en las distintas pruebas y determinar un factor de proporción.

II. MARCO TEÓRICO

2.1 DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA ELÉCTRICO

2.1.1 Subestación de Alta Tensión (SEAT)

El sistema eléctrico actual de la Línea 1 del Metro de Lima posee tres subestaciones de alta tensión (SEAT). La primera SEAT se encuentra ubicada en el Patio Taller de Villa el Salvador, la cual recibe el suministro eléctrico de la SET San Juan en 60 kV por medio de una línea aérea de transmisión. Luego la tensión es reducida a 21.6 kV por medio de dos transformadores de 20 MVA cada uno. La segunda SEAT se encuentra ubicada en la estación Grau, la cual recibe el suministro eléctrico de la SET Santa Rosa en 60 kV por medio de cable subterráneo. Luego de la misma forma que la SEAT Patio, la tensión es reducida a 21.6 kV por medio de dos transformadores de 20 MVA cada uno. La tercera SEAT se encuentra ubicada en el Patio Taller de Bayovar, la cual recibe el suministro de la SET Mirador en 60 kV por medio de dos tramos, el primero tramo mediante una línea aérea y el segundo por una línea subterránea, la tensión es reducida a 21.6 kV por medio de dos transformadores de 20 MVA cada uno.

2.1.2 Subestaciones rectificadoras (SER)

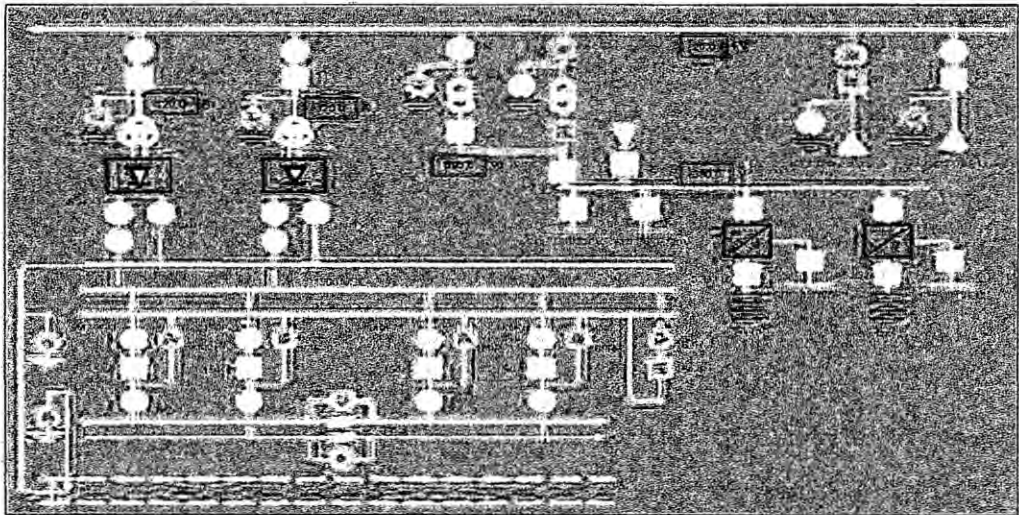
El sistema eléctrico actual del Tramo 1 de la Línea 1 del Metro de Lima posee siete subestaciones rectificadoras (SER) cada una de las cuales se encarga de realimentar el sistema DC de tracción de los trenes. Las SER en el tramo 1 se encuentran ubicadas en el Patio Taller y en las estaciones Parque Industrial, Villa María, Atocongo, Los Cabitos, La Cultura y Gamarra. Estas estaciones rectificadoras poseen dos transformadores de 100 kVA para sus servicios

auxiliares (0.40 kV) y dos (tres en la SER Patio) transformadores rectificadores que alimentan al sistema DC en 1500 Vdc. Asimismo, estas SER se alimentan en forma compartida desde la SEAT Patio y SEAT Grau en forma radial, seccionado eléctricamente al nivel de MT en un interruptor normalmente abierto.

Figura N° 1

Esquema de subestación de rectificación de la Línea 1 del Metro de Lima

Fuente: Línea 1



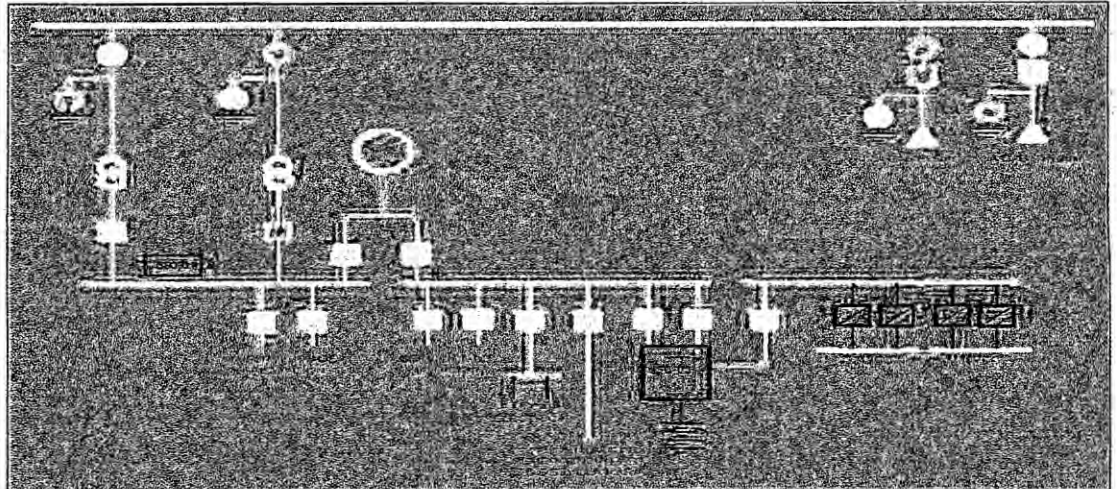
2.1.3 Cabinas eléctricas (CAB)

El sistema eléctrico actual del Tramo 1 de la Línea 1 del Metro de Lima posee diecisiete cabinas eléctricas cada una de las cuales se encarga de brindar la alimentación a los servicios auxiliares de cada una de las estaciones de pasajeros así como a los servicios del Patio Taller por medio de dos transformadores de 160 kVA.

Estas cabinas eléctricas se alimentan desde las SEAT Patio y la SEAR GRAU en interruptor normalmente abierto forma radial, seccionado eléctricamente al nivel de MT en un interruptor normalmente abierto.

Figura N° 2

Esquema de subestación de rectificación de la Línea 1 del Metro de Lima



Fuente: Línea 1

2.2 OPERACIÓN DEL SISTEMA ELÉCTRICO

Para el suministro de energía y potencia del sistema eléctrico del tramo 1 de la Línea 1, se cuenta con dos sistemas de suministro en 60 kV el cual tiene una potencia contratada de 7 MVA tanto con Luz del Sur como con Edelnor, para poder suministrar potencia que requieren los trenes actual del sistema eléctrico funciona como dos subsistemas de suministro eléctrico independientes, donde cada subsistema es el respaldo del otro.

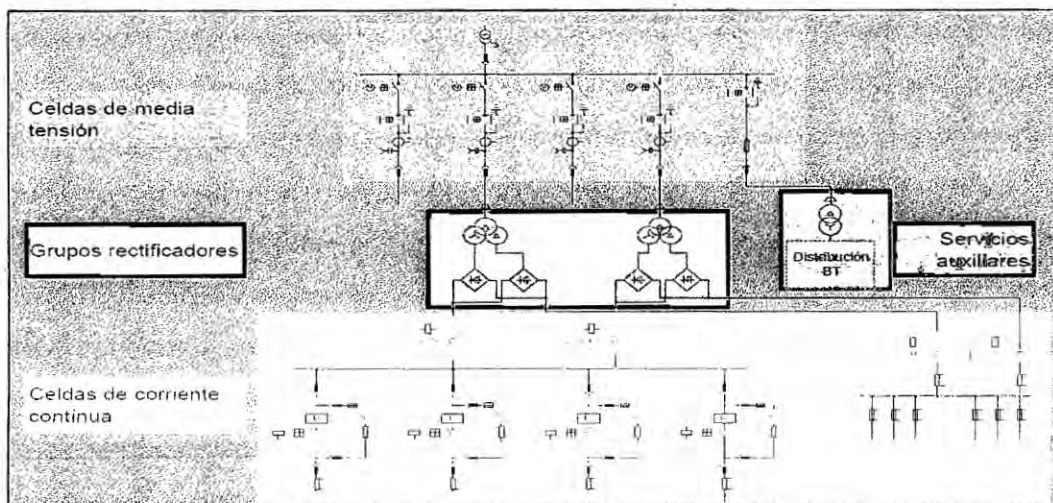
El primer subsistema parte desde la SEAT Patio y comprende las SER de Patio, Parque Industrial, Villa María, Atocongo y Los Cabitos. También comprende las cabinas de las estaciones Patio, Villa el Salvador, Parque Industrial, Pumacahua, Villa María, María Auxiliadora, San Juan, Atocongo, Jorge Chávez, Ayacucho y Cabitos. El segundo subsistema parte desde la SEAT Grau y comprende las SER de Gamarra y La Cultura. También comprende las cabinas de las estaciones Grau, Gamarra, Nicolás Arriola, La Cultura, San Borja Sur y Angamos.

De la misma forma, ante un evento de contingencia, el sistema puede operar según el diseño, sin presentar problemas de operación, en las siguientes condiciones:

- Alimentación total del sistema desde la SEAT Patio por salida de la SEAT Grau y viceversa
- Alimentación de todas las cabinas de manera radial y de las SER propias de cada subsistema por salida de servicio del enlace entre la SER Patio y la Cabina Patio o de la SER Gamarra y la Cabina Grau

Figura N° 3

Componentes de una subestación rectificadora



Fuente: Línea 1

2.3. FRECUENCIA DE PASO DE LOS TRENES

2.3.1 En operación normal

En la operación normal del sistema, se garantiza una frecuencia de paso de los trenes de tres minutos teniendo la alimentación solo desde la SEAT Patio, desde la SEAT Grau o teniendo una alimentación compartida entre las dos SEAT.

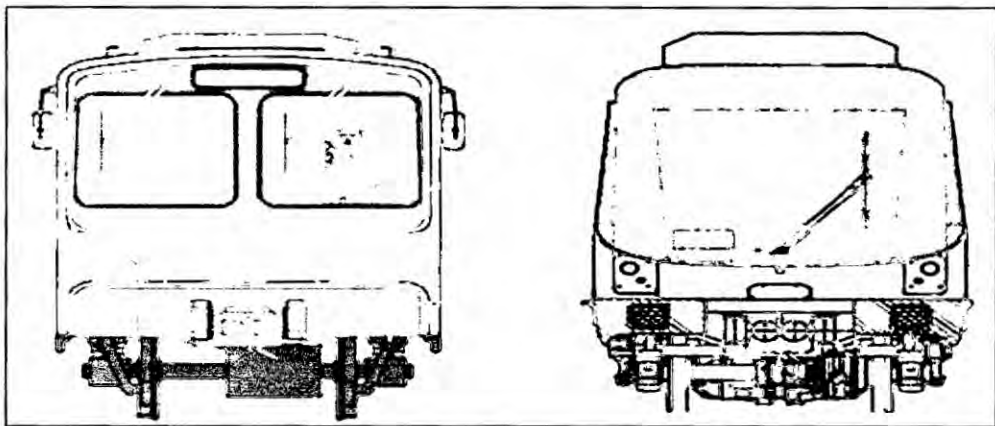
En condición de contingencia por salida de alguna SER, se garantiza una frecuencia de paso de los trenes de cuatro minutos bajo las mismas condiciones de alimentación del sistema tal y como se mencionó en el acápite anterior.

2.4 CANTIDAD DE TRENES EN LA VÍA

El diseño del sistema eléctrico no indica una cantidad de trenes presentes en la vía; sin embargo, el área de operaciones de la Línea 1 del Metro de Lima indicó que para el tramo 1, la frecuencia de tres minutos se alcanza con veinticuatro trenes en la vía. Además, la operación actual del sistema indica la presencia de catorce trenes en la vía para una frecuencia de seis minutos.

Figura N° 4

Trenes que conforman el material rodante de la Línea 1 del Metro de Lima



Fuente: Línea 1

2.5. PARÁMETROS ELÉCTRICOS DEL SISTEMA DE MT

Se describe brevemente los parámetros eléctricos considerados en la presente tesis.

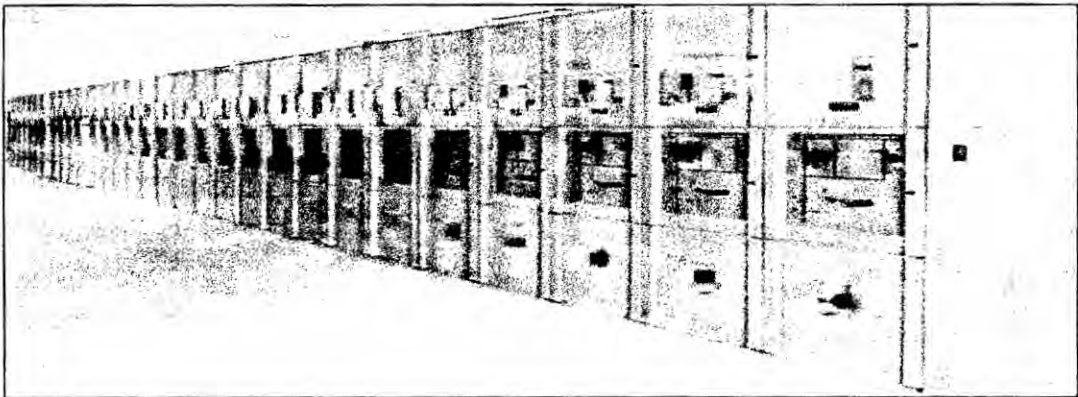
2.5.1 BARRAS

Las barras que entran en el análisis del sistema eléctrico se encuentran con Niveles de tensión de 60 kV y 21.6 kV

Figura N° 5

Celdas de M.T (Siemens) tramo 1 del Metro de Lima

Fuente:



Línea 1

Fuente: Línea 1

Figura N° 6

Celdas de media tensión del tramo antiguo



Figura N° 8
Barras de Media Tensión



Fuente: Línea 1

2.5.3 TRANSFORMADORES

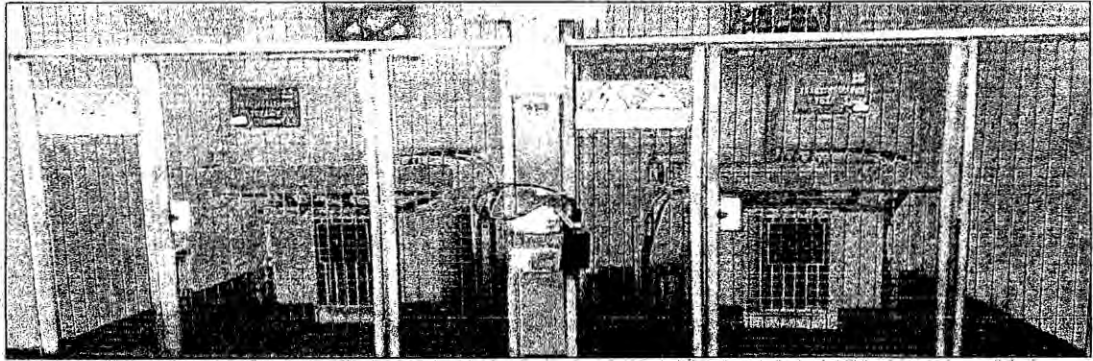
Los transformadores que se considerarán en el presente estudio incluyen:

- Los cuatro transformadores de 20 MVA de potencia con relación de transformación de 60/21.6 kV.
- Los catorce transformadores de 100 kVA de potencia con relación de transformación de 21.6/0.40 kV
- Los treinta y tres transformadores de 160 kVA de potencia con relación de transformación de 21.6/0.38 kV.
- Al igual que en el proyecto, los transformadores de rectificadores de 3.8MVA se modelan como una carga concentrada en el nivel de 21.6 kV.



Figura N° 9

Transformador SS.AA del tramo antiguo de la Línea 1

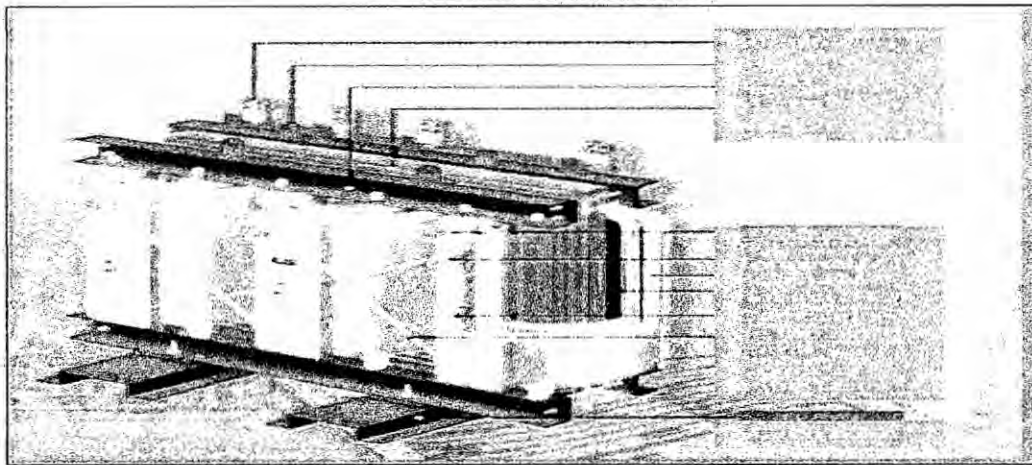


Fuente: Línea 1

Figura N° 10

Transformador de Seco de SS.AA tramo nuevo de la Línea 1

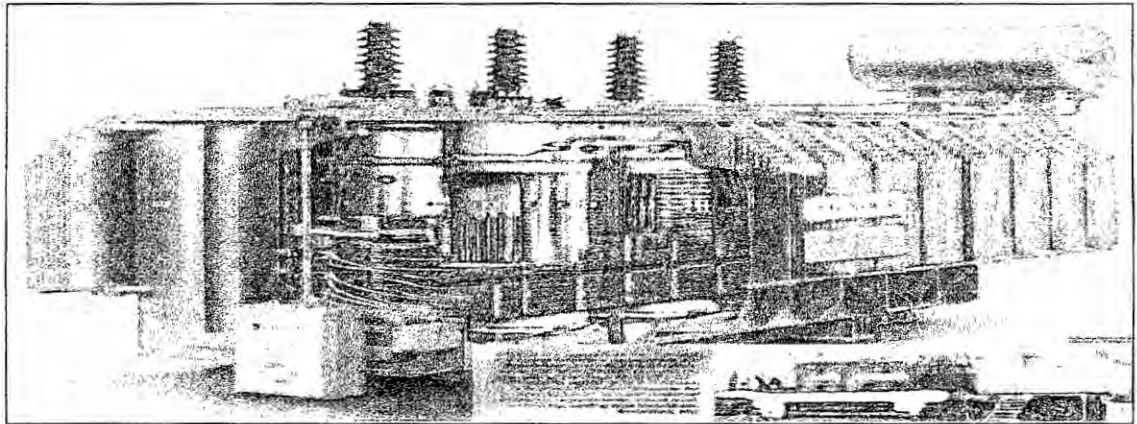
Características	
Fabricante	Industrial
Potencia nominal	250 KVA
	200 KVA en P.V.
Aplicación	
Con Carrito	
Eléctrico	Medio
Externo	
Tensión primaria	15
Tensión secundaria	20120
Def. Lad. de T.omas	
Sin carga	
Enlace de conexión	10mm



Fuente: Línea 1

Figura N° 11

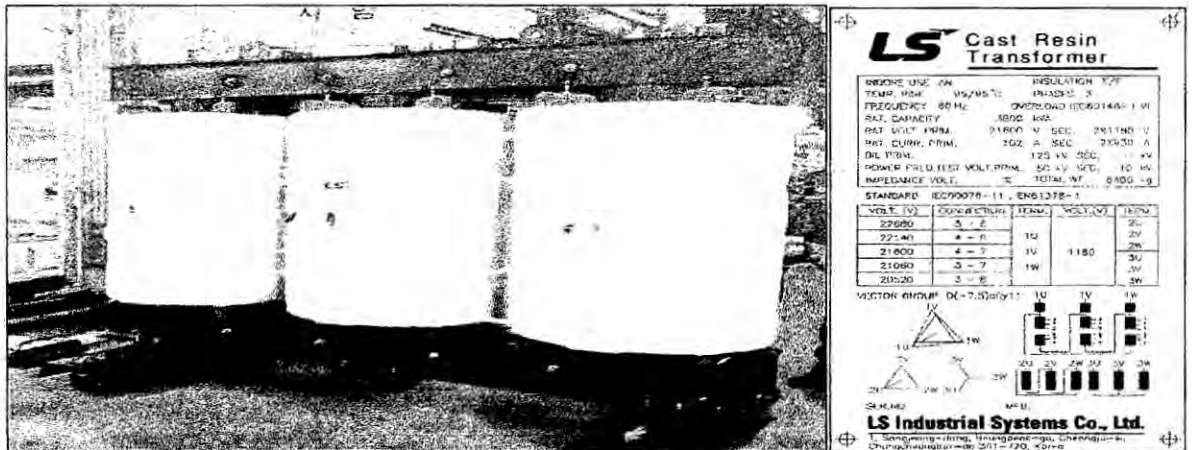
Transformador de potencia de 20 MVA de la Línea 1



Fuente: Línea 1

Figura N° 12

Transformador de 3.8 MVA de la SER de la Línea 1



Fuente: Línea 1

2.5.4 RELES DE PROTECCIÓN

En todas las celdas de interconexión de 21.6 kV de las cabinas eléctricas del tramo nuevo, a las que llegan o de las que parten los cables de 21.6 kV, como también en las dos celdas de la SEAT Grau de donde parten los cables de 21.6 kV hacia la SER Mayorista, se instalarán relés SIPROTEC 4 del tipo 7SJ64.

Los equipos SIPROTEC 4 son equipos de protección de servicio digital, que cumplen también funciones de mando y supervisión. En estos relés se utilizarán las funciones sobrecorriente 51(N), CORTOCIRCUITO 50(N), direccional 67(N) y tensión (27). Los relés de protección instalados en los extremos de un tramo de cable 21.6 kV.

Los relés del tramo antiguo son relés electromecánicos del tipo FIR, los cuales están desfasados tecnológicamente de los relés SIPROTEC, estos relés son individuales por cada función de protección a comparación de los relés multifuncionales SIPROTEC.

Figura N° 13

Esquema de instalación de los relés SIPROTEC 7SJ64 en los alimentadores de MT

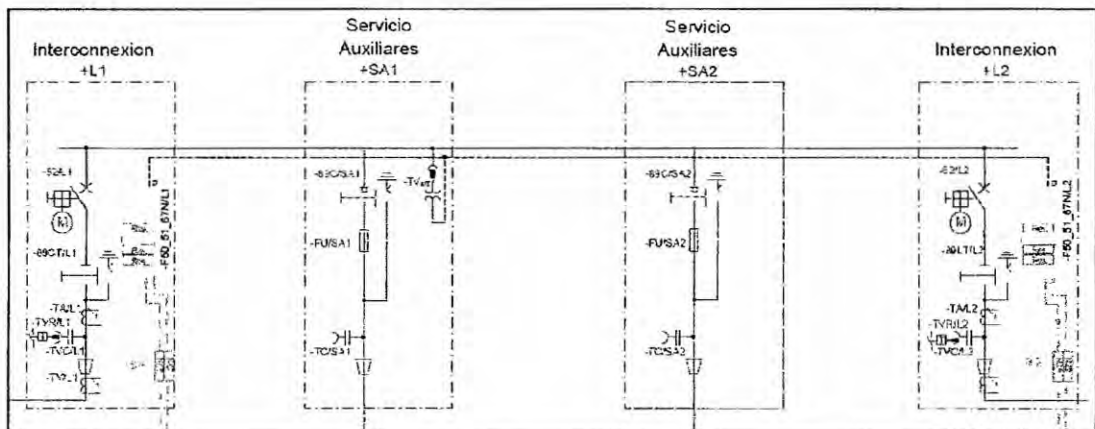


Figura N° 14

Relés electromecánicos modelo FIR (tramo antiguo)

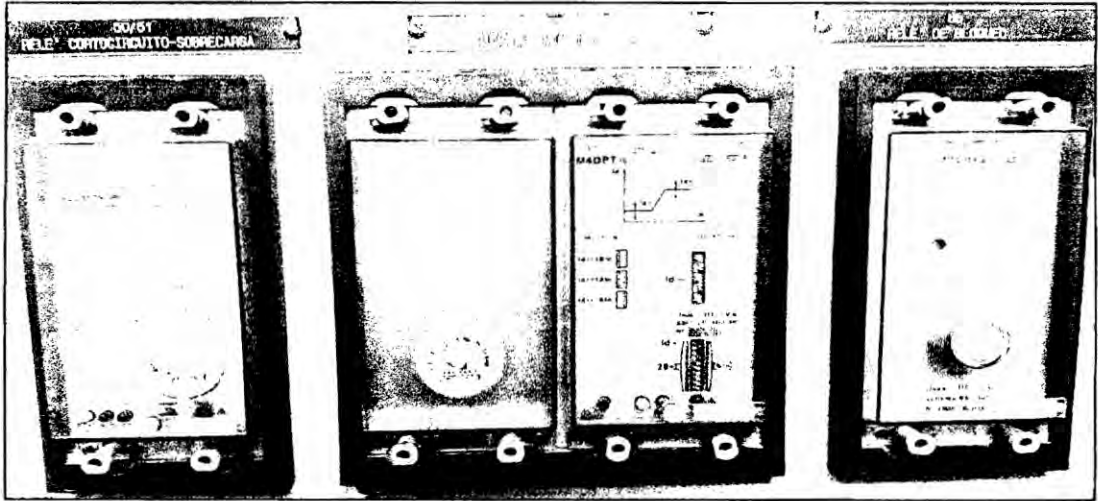
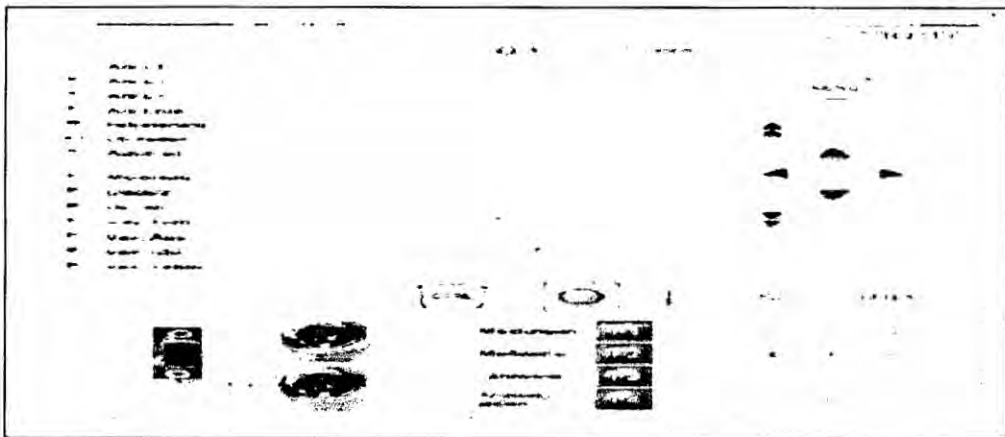


Figura N° 15

Relé de protección multifuncional siprotec 4 7SJ64 (tramo nuevo)



Fuente : Línea 1

III. VARIABLES E HIPOTESIS

3.1 OPERACIONALIZACIÓN DE LAS VARIABLES

3.2.1 Indicadores

a) De Variable Independiente

Modelo de pruebas eléctricas

b) De Variables Dependientes

Coordinación de las protecciones.

3.3 HIPÓTESIS

3.3.1 HIPÓTESIS PRINCIPAL

Es posible la operación del sistema eléctrico de MT del tramo antiguo de la LÍNEA 1 a las máximas condiciones de diseño sin que esto afecte la operación comercial del servicio de pasajeros.

3.3.1 HIPÓTESIS ESPECÍFICA

HS1: Describiendo, analizando y simulando en las pruebas eléctricas las máximas condiciones de operación del sistema eléctrico se podrá realizar la coordinación de las protecciones adecuada para la línea de MT 20 kV de la LÍNEA 1.

IV. METODOLOGIA DE LA INVESTIGACIÓN

4.1 Tipo de Investigación.

Este trabajo de investigación está enmarcado dentro del Método descriptivo-evaluativo, puesto que por las características de las instalaciones eléctricas existentes en el Tramo 1 de la Línea 1 del Metro de Lima no damos cuenta que existen diferencias tanto cronológicas, tecnológicas y de configuración de los equipos de protección, por lo cual hacemos una evaluación de los equipos e instalaciones describiendo el estado de ellos y como afecta a la operación del sistema del Tren Eléctrico.

Por el alcance de los resultados, el tipo de estudio que se realiza es analítico-explicativa, el cual busca por medio de pruebas eléctricas calcular un factor de ajuste para poder determinar los nuevos valores máximos de corrientes para la correcta operación de Sistema Eléctrico del Tren, evitando así las paradas por falla en los equipos de protección.

4.2 Diseño de la Investigación.

La Investigación será ejecutada en tres etapas:

1. **La Primera Etapa.-** Se realizara un levantamiento de información de las Instalaciones eléctricas existentes, las cuales nos brindara las posibles causas de las fallas existentes.
2. **La Segunda Etapa.-** Se realizaran pruebas eléctricas con analizadores de redes, los cuales se ubicaran en puntos estratégicos

para un buen procesamiento de la información, para luego ser analizadas y así poder evaluar los datos obtenidos de todos ellos.

3. **La Tercera Etapa.-** Se determina el factor de corrección aplicado a los valores de corriente registrados durante horarios de operación comercial, para luego aplicarlas a los valores de corriente de las pruebas para que los resultados analizados sean los más precisos y así determinar los nuevos valores para el ajuste de los relés de protección de sobrecorriente.

4.3. Población y Muestra.

El tramo 1 de la LÍNEA 1 cubre una ruta de 21.48 kilómetros, mediante tramos de viaducto a nivel y otro elevado, comprendiendo 16 estaciones. Para el estudio los trenes inician su recorrido en la Estación de Villa El Salvador, y lo finaliza en la Estación Miguel Grau, en un lapso de 32 minutos como máximo. Se consideró en el estudio la cantidad de 24 trenes operativos que circulan a una frecuencia de 3 minutos y los mismos que en horarios de operación comercial transportan aproximadamente 140 mil personas al día.

4.4 Técnicas e instrumentos de recolección de datos.

La información requerida se adquirirá empleando las siguientes técnicas de recolección de datos:

- Analizadores de Redes DRANETZ modelo PG 4400.
- Mediciones directas.
- Registros estadísticos de la empresa encargada de la operación de la LÍNEA 1.

- Revisión de documentación y bibliografía.
- Estudios hechos por empresas que prestan servicio de ingeniería a la LÍNEA 1.
- Internet (página web de LINEA 1 y demás reportes periodísticos).

4.5. Plan de análisis estadísticos de datos.

Las herramientas informáticas para el procesamiento de datos serán:

- Autocad® 2015
- Digsilent 14.1
- Microsoft Office Excel 2013

4.6 DETERMINACIÓN DE LOS NIVELES DE CORRIENTE

4.6.1 ANTECEDENTES

Debido a que durante la operación normal del sistema; es decir, operando catorce trenes a una frecuencia de 360 segundos en hora punta y 600 segundos en hora valle se han presentado sobrecargas y aperturas del sistema de protección en la estación Parque Industrial, entonces se vio en la necesidad de realizar una comprobación del sistema eléctrico operando a niveles de diseño, con la finalidad de medir el nivel máximo de corriente durante su operación. Por razones prácticas del servicio, estas pruebas se realizaron con los trenes sin pasajeros.

4.6.2 DESCRIPCIÓN DE LAS PRUEBAS REALIZADAS

Como parte de los datos a registrar durante las pruebas, se instalaron nueve analizadores en los sistemas de protección para el registro de la corriente

durante la operación normal de la Línea 1. Estos equipos se encontraron instalados desde los días 28 de octubre hasta el 4 de noviembre, sumando ocho días de medición; sin embargo, debido a que se realizaron ajustes en la sincronización y seteo de los equipos, el periodo válido de medición fue desde el 30 de octubre hasta el 04 de noviembre.

Las pruebas, a frecuencia de tres minutos, se realizaron el día 01 de noviembre del 2013 desde la 01:00 a.m. hasta las 05:30 a.m. realizándose un total de cuatro pruebas o fases.

Las fases se detallan a continuación.

- a) **Fase 1:** Operación del sistema con veinticuatro trenes a una frecuencia de tres minutos y alimentando el total de la red solo desde la SEAT Grau.
- b) **Fase 2:** Operación del sistema con veinticuatro trenes a una frecuencia de tres minutos y operando en condiciones normales; es decir, cinco SER alimentadas desde SEAT Patio y dos SER alimentadas desde SEAT Grau.
- c) **Fase 3:** Operación del sistema con veinticuatro trenes a una frecuencia de tres minutos y alimentado el total de la red solo desde la SEAT Patio.
- d) **Fase 4:** Operación del sistema con catorce trenes a una frecuencia de 360 segundos y operando en condiciones normales; es decir, cinco SER alimentadas desde SEAT Patio y dos SER alimentadas desde SEAT Grau.

Adicionalmente se realizó una variación temporal en los ajustes de los relés correspondientes al tramo antiguo, elevando su ajuste por sobrecorriente a 450 A durante las pruebas.

Los esquemas de cada una de las pruebas realizadas se muestran en las figuras N° 16, N° 17 y N° 18.

Figura N° 16
 Fase 1 – Alimentación desde la SEAT Grau (Edelnor)

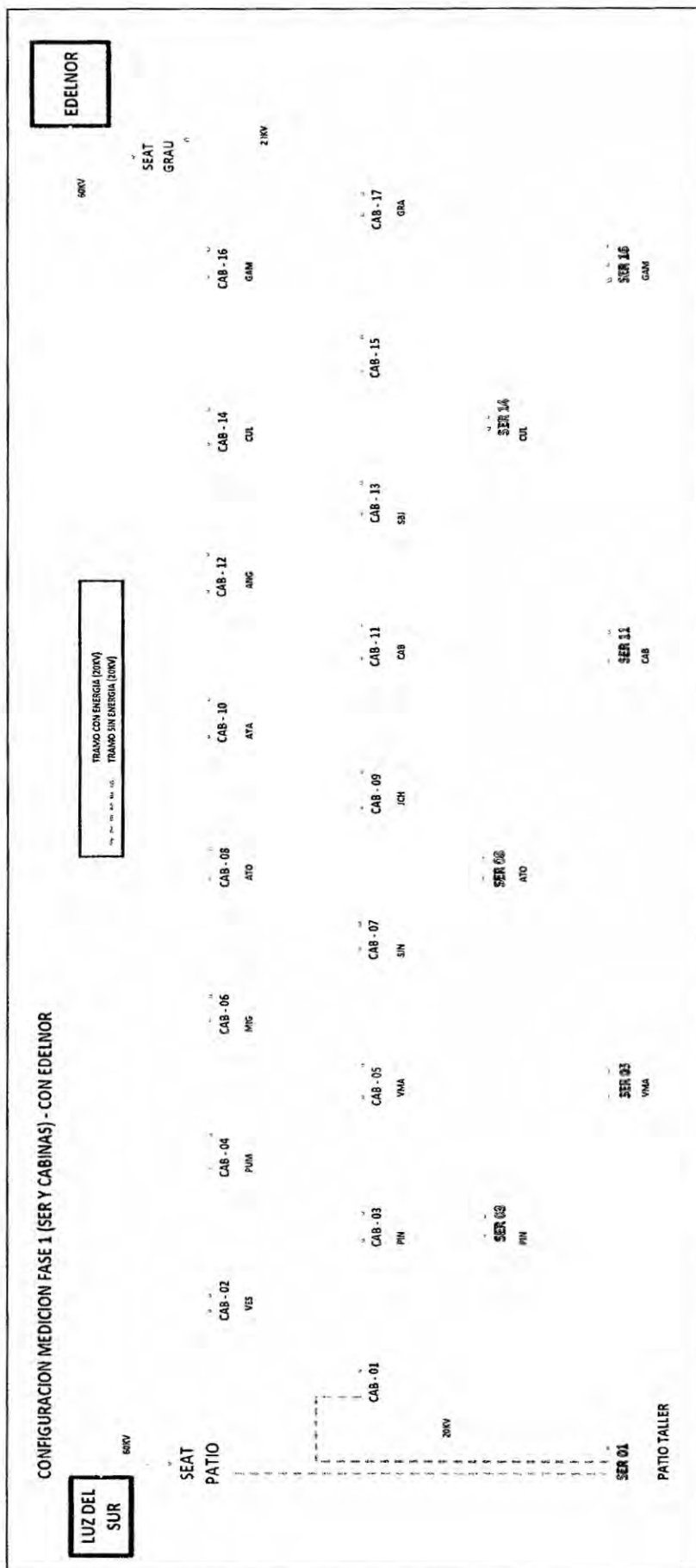
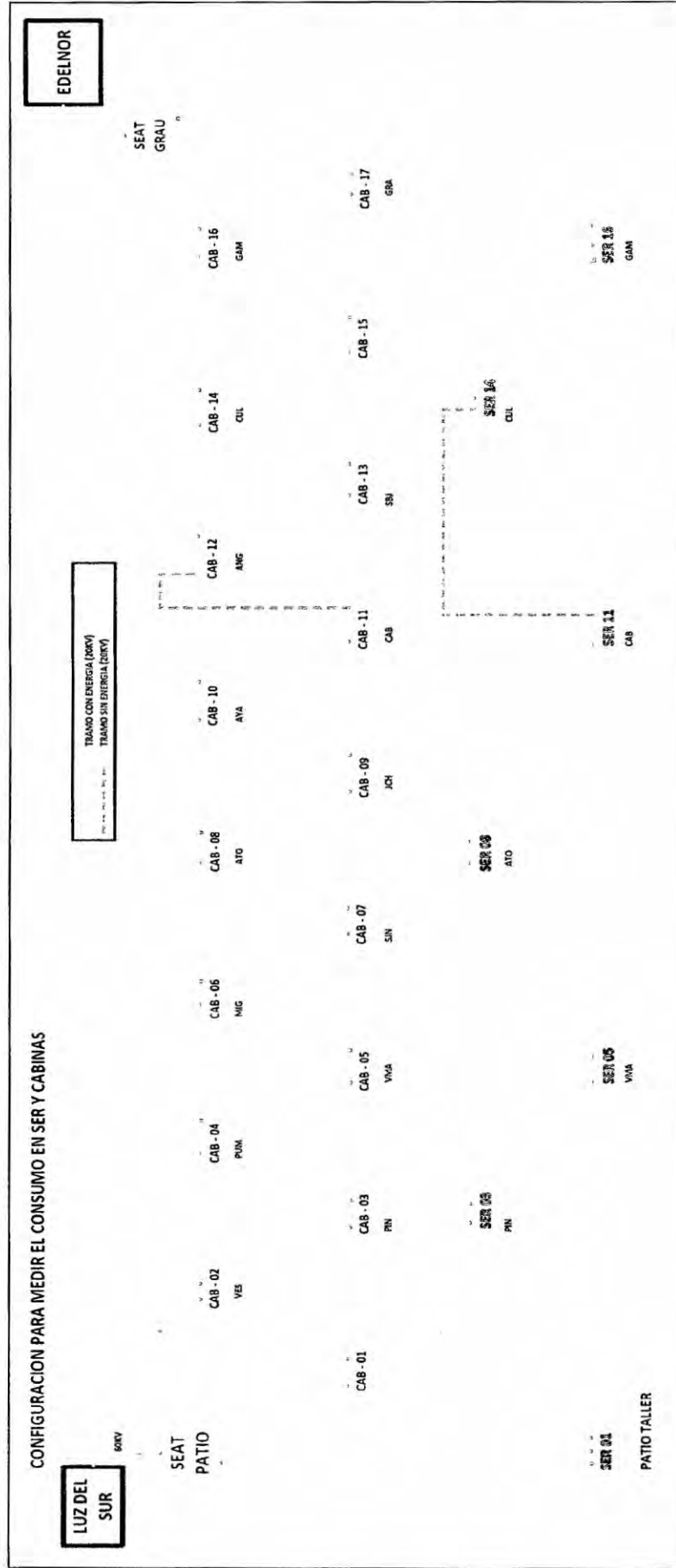


Figura N° 18

Fase 2 y 4 – Alimentación compartida del tramo 1 desde las SEAT Patio (Luz del Sur) y SEAT Grau (Edelnor)



4.6.3 EQUIPOS UTILIZADOS Y SU PROGRAMACIÓN

4.6.3.a Equipos Utilizados

Dos analizadores portátiles de cantidad y calidad de energía eléctrica DRANETZ modelo PG 4400.

Estos analizadores fueron instalados en la SEAT Patio y en la SER Patio con un tiempo de registro de 1 segundo.

- Precisión: $\pm 0.1\%$ para la tensión
 $\pm 0.1\%$ para la corriente + 1% (Pinza)
 $\pm 0.2\%$ para la frecuencia
- Rango de operación: De 10 a 600 Vrms para la tensión, de 0 hasta 3000 Arms para corriente.

Un analizador portátil de cantidad y calidad de energía eléctrica DRANETZ modelo Power Visa.

Este analizador fue instalado en la SER Parque Industrial con un tiempo de registro de 1 segundo.

- Precisión: : $\pm 0.1\%$ para la tensión
 $\pm 0.1\%$ para la corriente + 1% (Pinza)
 $\pm 0.2\%$ para la frecuencia
- Rango de operación: 10 - 600 Vrms (tensión)
0 - 3000 Arms (corriente)

Seis analizadores portátiles de cantidad y calidad de energía eléctrica POWER STANDARD LAB modelo PQUBE.

Estos analizadores fueron instalados en cada una de las SER restantes; es decir, Villa María, Atocongo, Los Cabitos, La Cultura y Gamarra y en la llegada de la SEAT Grau. El tiempo de registro de estos equipos fue de 1 minuto que es el mínimo disponible.

- Precisión : $\pm 0.05\%$ para la tensión
 $\pm 0.2\%$ para la corriente + 0.5% (Pinza)
- Rango de operación: De 100 a 690 Vrms para tensión, de 0 hasta 100 Arms, CT440 a 70 Hz para la frecuencia.

4.6.3.b Programación y ubicación

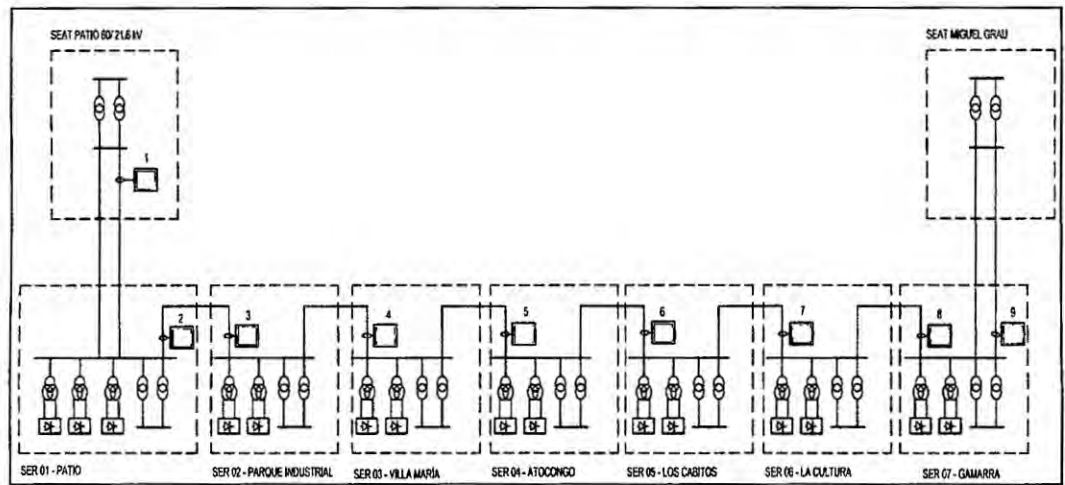
Los nueve analizadores se colocaron en el circuito de protección de los alimentadores L1 de cada una de las SER desde la SER 03 hasta la SER 14. Asimismo en el alimentador L2 de la SER Patio, la llegada de la SEAT Patio y la SEAT Grau. La ubicación de los equipos se muestra en la figura N° 19.

Estos equipos se programaron para la medición de tensiones y corrientes durante las pruebas, bajo las siguientes consideraciones:

- Para los equipos Dranetz, la toma de datos se realizó cada segundo. Se seteo el registro de eventos para verificar si la corriente superaba los 450A.
- Para los equipos PSL, la toma de datos se realizó cada minuto. Se seteo el registro de eventos para verificar si la corriente superaba los 400 A.

Figura N° 19

Ubicación de los equipos de medición en la red eléctrica de la Línea 1



Fuente: Elaboración propia

4.6.4 RESULTADOS DE LAS MEDICIONES

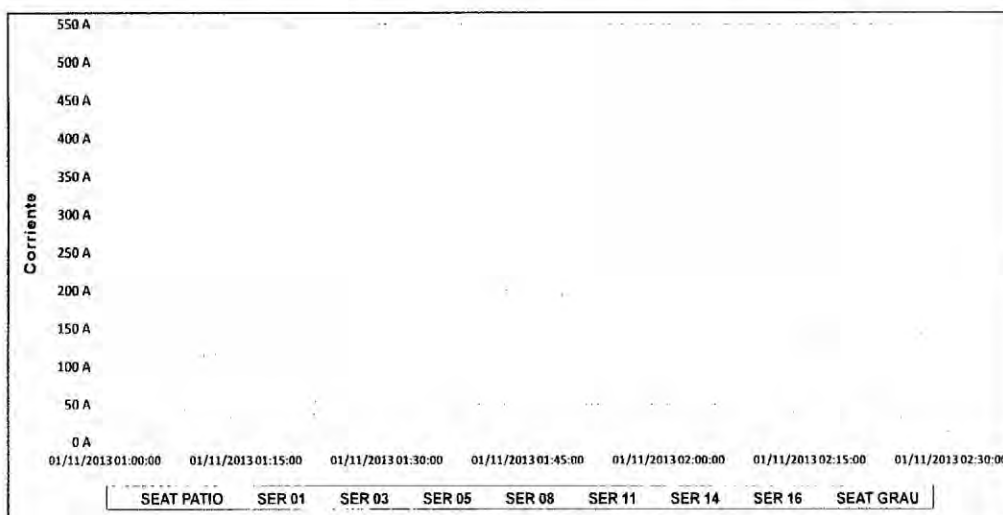
4.6.4.a Resultados de la fase 1

Con el sistema operando según las condiciones establecidas en la fase 1, las corrientes máximas registradas desde la 01:00 a.m. hasta las 02:25 a.m. se muestran en la figura N° 20 y en la tabla N° 2.

Estas son las corrientes máximas registradas en la red de MT de la Línea 1 durante la fase con la alimentación total del tramo 1 desde la SEAT Grau.

Figura N° 20

Diagrama de corrientes – Fase 1 alimentación SEAT Grau



Fuente: Elaboración propia

Tabla N° 2

Corrientes registradas en la red de M.T (fase 1)

SEAT/SER	Fase	Corrientes Registradas en las Pruebas		
		Min	Max	Max. Prom
Patio	R	0.00	1.45	1.29
	S	0.00	1.04	0.95
	T	0.00	0.51	0.45
Patio	R	5.04	74.25	30.07
	S	5.10	74.84	30.33
	T	5.05	74.47	29.98
Parque Industrial	R	4.99	74.29	30.22
	S	4.96	75.37	30.56
	T	5.03	74.62	30.23
Villa María	R	14.44	162.84	65.65
	S	13.55	159.34	64.27
	T	12.43	163.71	65.90
Atocongo	R	50.49	256.64	122.95
	S	21.96	255.24	116.69
	T	23.71	250.60	114.32
Los Cabitos	R	26.40	304.20	164.68
	S	26.70	304.50	166.14
	T	26.70	306.20	166.40
La Cultura	R	42.20	380.80	215.27
	S	41.90	381.70	216.29
	T	43.60	382.10	216.17
Gamarra	R	59.10	460.90	262.09
	S	51.80	462.60	262.15
	T	53.10	461.60	261.15
Grau	R	65.70	502.80	301.03
	S	65.30	502.80	302.19
	T	66.00	503.20	301.14

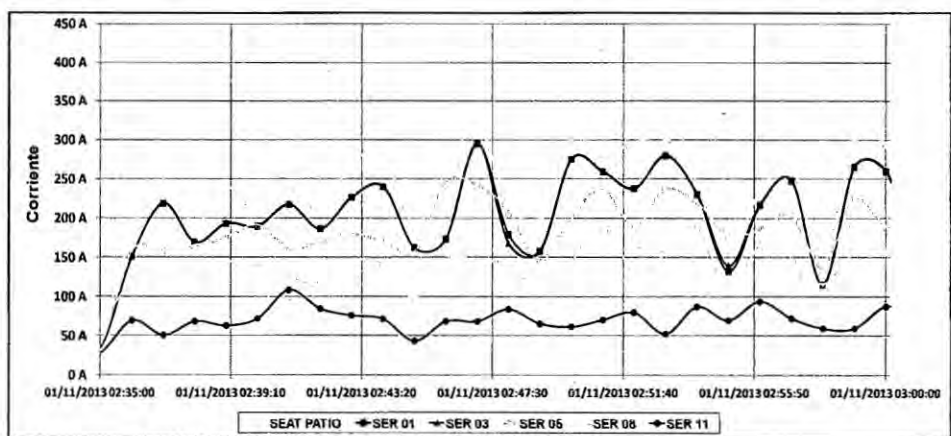
Fuente: Elaboración propia

4.6.4.b Resultados de la fase 2

Con el sistema operando según las condiciones dadas para la fase 2, las corrientes máximas registradas en la red de MT desde la 02:35 a.m. hasta las 03:05 a.m. se muestran en las figura N° 21, Figura N° 22 y en la tabla N°3.

Figura N° 21

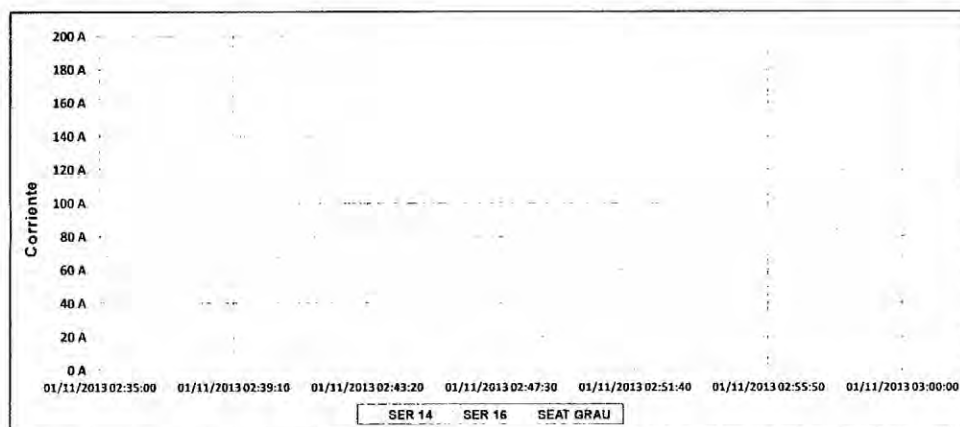
Diagrama de corrientes – Fase 2 Alimentación desde SEAT Patio



Fuente: Elaboración propia

Figura N° 22

Diagrama de corrientes- Fase 2 alimentación desde SEAT Grau



Fuente: Elaboración propia

Tabla N° 3

Corrientes Máximas registradas en la red de Media Tensión- Fase 2

SEAT/SER	Fase	Corrientes Registradas en las Pruebas		
		Min	Max	Max. Prom
Patio	R	52.59	332.70	235.71
	S	51.82	337.80	238.48
	T	51.95	333.50	235.46
Patio	R	36.28	305.15	203.68
	S	36.25	307.39	205.05
	T	35.89	305.74	203.81
Parque Industrial	R	35.96	305.87	204.00
	S	36.10	311.52	207.29
	T	35.36	307.01	204.44
Villa María	R	38.41	254.63	180.74
	S	37.28	249.46	176.67
	T	38.15	256.38	181.62
Atocongo	R	65.80	189.70	134.25
	S	47.03	182.18	123.53
	T	45.06	181.30	122.32
Los Cabitos	R	28.70	108.60	70.09
	S	28.70	107.90	69.87
	T	29.70	107.90	70.88
La Cultura	R	5.30	16.50	5.89
	S	4.90	18.50	5.71
	T	5.60	18.50	6.52
Gamarra	R	42.60	113.80	79.83
	S	37.60	112.20	77.02
	T	37.90	112.20	77.14
Grau	R	74.90	175.90	123.11
	S	75.20	176.20	125.50
	T	75.60	175.20	123.40

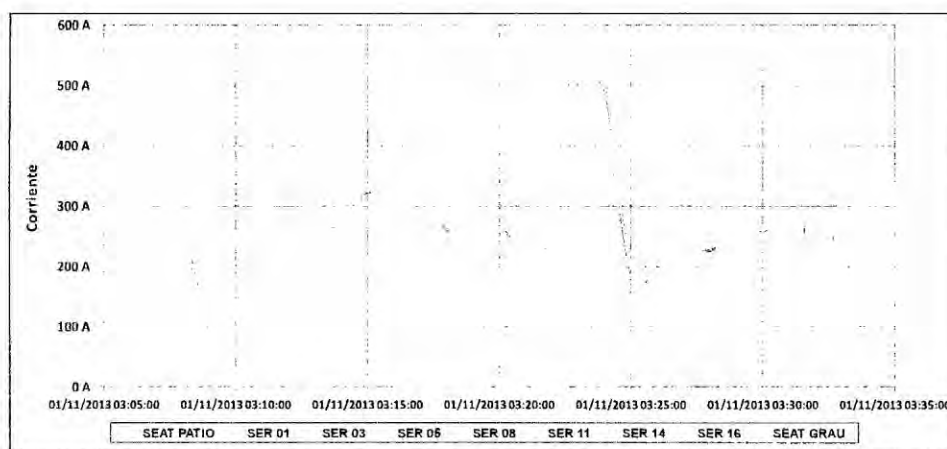
Fuente: Elaboración propia

4.6.4.c Resultados de la fase 3

Con el sistema operando según las condiciones dadas para la fase 3, las corrientes máximas registradas desde la 03:05 a.m. hasta las 03:35 a.m. se muestran en la Figura. N° 23 y en la tabla N° 4.

Figura N° 23

Diagrama de corrientes – Fase 3 tramo alimentado desde SEAT Patio



Fuente: Elaboración propia

Tabla N° 4

Corrientes Máximas registradas en la red de Media Tensión Fase 3

SEAT/SER	Fase	Corrientes Registradas en las Pruebas		
		Min	Max	Max. Prom
Patio	R	223.84	513.60	328.57
	S	226.02	533.70	332.78
	T	223.75	520.20	325.15
Patio	R	200.53	498.20	298.20
	S	202.84	478.90	296.18
	T	201.53	475.20	294.64
Parque Industrial	R	172.35	393.20	255.72
	S	172.59	373.90	250.09
	T	172.45	476.20	254.05
Villa María	R	174.39	440.30	264.71
	S	170.53	417.73	258.91
	T	176.25	421.23	263.20
Atocongo	R	150.41	332.80	231.98
	S	141.18	335.65	227.24
	T	140.61	325.10	224.67
Los Casitos	R	111.20	256.70	179.53
	S	109.90	281.10	175.23
	T	111.80	288.00	183.31
La Cultura	R	8.90	242.80	120.26
	S	21.10	177.20	114.89
	T	23.10	285.70	125.19
Gambarra	R	31.30	123.40	69.89
	S	20.10	175.90	68.00
	T	22.80	111.20	66.42
Grau	R	0.00	10.60	8.60
	S	0.00	5.20	7.90
	T	0.00	8.60	4.04

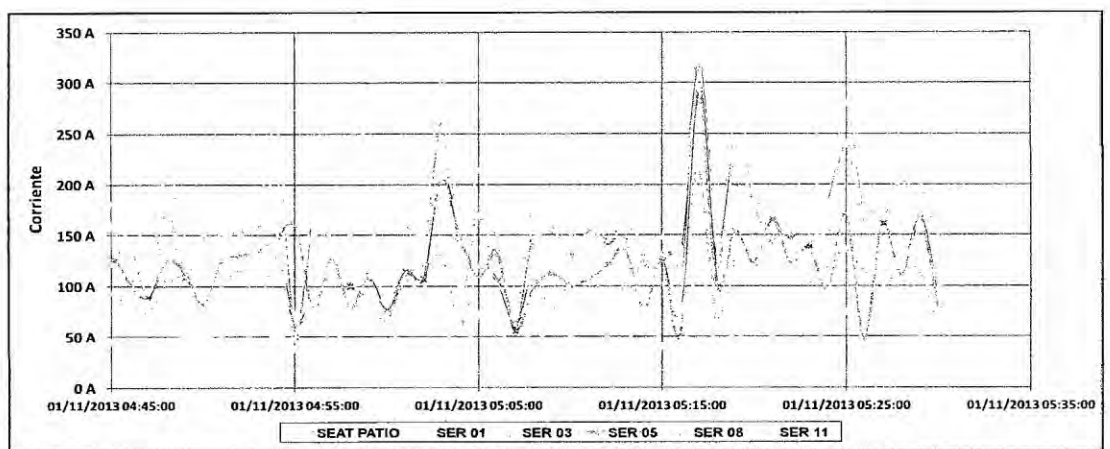
Fuente: Elaboración propia

4.6.4.d Resultados de la fase 4

Con el sistema operando según las condiciones dadas en la fase 4 las corrientes máximas registradas en el periodo desde la 04:45 a.m. hasta las 05:30 a.m. se muestran en las figuras N° 24 y N° 25 y en la tabla N° 5.

Figura N° 24

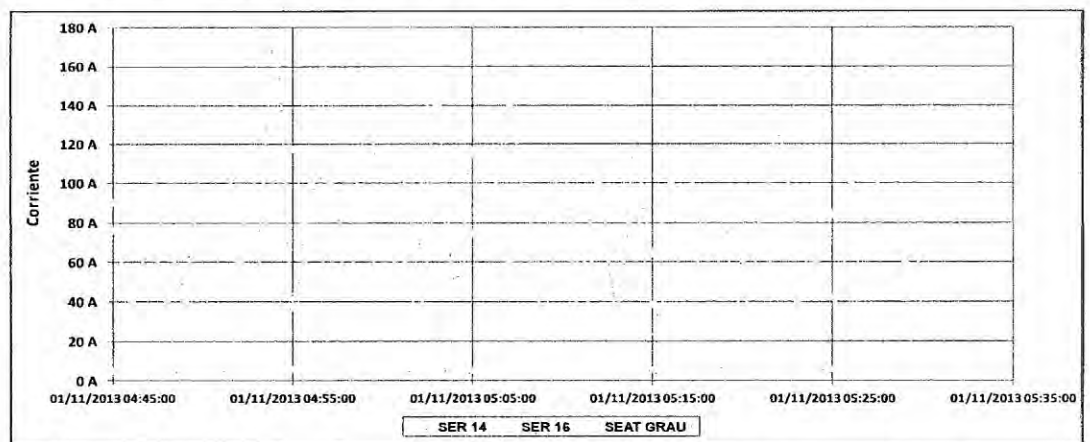
Diagrama de corrientes- Fase 4 alimentado desde la SEAT Patio



Fuente: Elaboración propia

Figura N° 25

Diagrama de corrientes – Fase 4 alimentación desde la SEAT Grau



Fuente: Elaboración propia

Tabla N° 5

Corrientes Máximas registradas en la red de Media Tensión- Fase 4

SEAT/SER	Fase	Corrientes Registradas en las Pruebas		
		Min	Max	Max. Prom
Patio	R	69.85	329.40	175.30
	S	69.82	335.50	176.67
	T	68.84	330.70	174.62
Patio	R	49.59	311.55	143.55
	S	50.07	315.21	144.43
	T	49.73	313.27	143.55
Parque Industrial	R	0.00	312.72	139.15
	S	0.00	318.90	140.87
	T	0.00	314.81	139.20
Villa María	R	49.35	289.01	116.89
	S	47.95	282.89	114.28
	T	48.21	291.55	117.07
Atocongo	R	60.64	216.21	100.04
	S	40.69	209.04	85.49
	T	39.81	207.90	84.25
Los Cabitos	R	21.40	122.70	45.77
	S	21.10	122.10	45.51
	T	22.10	122.40	44.83
La Cultura	R	5.30	6.30	5.52
	S	4.90	6.60	5.63
	T	5.60	7.60	6.32
Gamarra	R	29.40	117.50	57.80
	S	16.20	116.80	54.13
	T	17.80	117.50	54.97
Grau	R	36.00	170.90	86.16
	S	35.60	172.20	86.20
	T	35.60	170.90	85.87

Fuente: Elaboración propia

4.6.4.e Eventos registrados en las pruebas

Durante el desarrollo de la fase 3 de las pruebas se presentaron los siguientes eventos:

- a) Se registró un evento en el analizador instalado en el alimentador P4 de la SEAT Grau durante la fase 1 de las pruebas al sobrepasar los 450A.
- b) Se registraron dos eventos en el analizador instalado en el alimentador L2 de la SER Gamarra durante la fase 1 de las pruebas al superar los 450A.
- c) Se registraron dos eventos en el analizador instalado en el alimentador L1 de la SER Parque Industrial durante la fase 3 de las pruebas al sobrepasar los 450A. Durante este evento, se registró el disparo del relé asociado a la protección del alimentador L1 de la SER Parque Industrial.
- d) Se registraron dos eventos en el analizador instalado en el alimentador L2 de la SER Patio durante la fase 3 de las pruebas al sobrepasar los 450A.
- e) Se registraron tres eventos en el analizador instalado en el alimentador P2 de la SEAT Patio durante la fase 3 de las pruebas al sobrepasar los 450A.

4.6.5 ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS

4.6.5.a Resumen de los máximos registrados en cada fase de la prueba

La tabla N° 6 muestra las máximas corrientes registradas en cada uno de los alimentadores del sistema eléctrico. Durante cada una de las pruebas según los resultados obtenidos desde la tabla N° 2 hasta la tabla N° 5, donde se observa que:

- Bajo la misma topología de la red durante la operación (fase 2 y fase 4) los valores máximos de corriente registrados en la Fase 4 fueron, por lo general, ligeramente más altos que los valores máximos de corriente registrados en la fase 2.
- De la misma forma, bajo la misma topología de la red durante la operación (fase 1 y fase 3), los máximos valores de corriente se presentaron en la fase 3 aun cuando la carga atendida es la misma y solo varía el punto de suministro de la energía.

Tabla N° 6

Máximas corrientes registradas en cada alimentador

Alimentador	24 Trenes a 180 segundos			14 Trenes a 360 segundos
	Fase 1	Fase 2	Fase 3	Fase 4
Desde SEAT Grau	503.20 A	176.20 A	-	172.20 A
SER Gamarra - L2	462.60 A	113.80 A	175.90 A	117.50 A
SER La Cultura - L1	382.10 A	-	286.70 A	-
SER Los Cabitos - L1	306.20 A	108.60 A	289.00 A	122.70 A
SER Atocongo - L1	256.64 A	189.70 A	398.65 A	216.21 A
SER Villa María - L1	163.71 A	256.38 A	440.30 A	291.50 A
SER Parque Industrial - L1	75.37 A	311.52 A	498.20 A	318.90 A
SER Patio - L2	74.84 A	307.39 A	498.20 A	315.21 A
Desde SEAT Patio	-	337.80 A	538.70 A	335.50 A

Las corrientes máximas coincidieron a la misma hora en cada fase de la prueba

La tabla N° 7 muestra el resumen de los valores máximos de corriente registrados en cada una de las SER, cuyos valores se obtuvieron por la diferencia entre el consumo de dos SER consecutivas.

Tabla N° 7

Máximas corrientes registradas en cada SER

Subestación	24 Trenes a 180 segundos			14 Trenes a 360 segundos
	Fase 1	Fase 2	Fase 3	Fase 4
SER 16 - Gamarra	165.30 A	114.90 A	111.20 A	83.10 A
SER 14 - La Cultura	132.00 A	106.60 A	107.90 A	117.50 A
SER 11 - Los Cabitos	117.50 A	108.60 A	125.10 A	122.70 A
SER 08 - Atocongo	106.50 A	119.10 A	95.06 A	109.65 A
SER 05 - Villa María	137.11 A	107.89 A	157.32 A	120.40 A
SER 03 Parque Industrial	119.63 A	85.38 A	139.01 A	118.69 A
SER 01 Patio	74.84 A	87.49 A	59.80 A	93.32 A

Fuente: Elaboración propia

De la misma forma, la tabla N°8 presenta los valores máximos que se presentaron durante las pruebas realizadas de manera consolidada teniendo en cuenta las cuatro fases de las pruebas.

Como caso especial, en las fases 1 y 3 se considera el mismo comportamiento de la corriente; es decir, la SEAT Grau y la SEAT Patio poseen el mismo registro máximo de corriente debido a que es la misma carga alimentada desde dos puntos distintos de la red.

Tabla N° 8

Valores máximos consolidados de las corrientes máximas registradas

SEAT/ SER	Corriente por el Alimentador	Corriente por la SER
Grau	538,70 A	-
Gamarrá	498,20 A	155,30 A
La Cultura	440,30 A	132,00 A
Los Cabitos	398,65 A	125,10 A
Atocongo	398,65 A	119,10 A
Villa María	440,30 A	157,32 A
Parque Industrial	498,20 A	139,01 A
Patio	498,20 A	95,32 A
Patio	538,70 A	-

4.6.5.b Comparación de los resultados con los valores de diseño

En la tabla N° 9 se muestran los resultados al realizar una comparación entre las corrientes máximas registradas mostradas en la tabla N° 8 y las corrientes de diseño según la tabla N° 1 de la presente tesis.

Tabla N° 9

Comparación de los niveles máximos de corriente registrados con los valores de diseño

Alimentador	Corriente Máxima registrada en la Prueba (Imax)	Corriente máxima admisible según diseño (Idis)	% (Imax/Idis)	Ajuste del relé de sobrecorriente 51N (*)	% (Imax/Ajuste)
Desde SEAT Grau	538,70 A	660 A	81,62%	512 A	
SER Gamarrá - L2	498,20 A	442 A		400 A	
SER La Cultura - L1	440,30 A	365 A		400 A	
SER Los Cabitos - L1	398,65 A	385 A	103,55%	400 A	99,66%
SER Atocongo - L1	398,65 A	385 A	103,55%	392 A	101,70%
SER Villa María - L1	440,30 A	365 A		362 A	
SER Parque Industrial - L1	498,20 A	442 A		362 A	
SER Patio - L2	498,20 A	442 A		443 A	
Desde SEAT Patio	538,70 A	660 A	81,62%	912 A	59,07%

Sobrepasa a valor de diseño y/o de Ajuste

* Los ajustes son los que actualmente se encuentran sintonizados en los relés del sistema eléctrico

De la tabla N° 9 se observa que:

- Los ajustes actuales de los relés de los alimentadores son superados, excepto, para los alimentadores de las SER Atocongo, Cabitos y la SEAT Patio.
- El ajuste actual de 392 A en la SER Parque Industrial, difiere de la máxima corriente registrada durante las pruebas en un 27.09% siendo este el caso más crítico.
- El ajuste actual de 392 A en la SER Parque Industrial es incorrecto debido a que la protección por sobrecorriente es la misma tanto para el relé del alimentador L2 de la SER Patio como para el alimentador L1 de la SER Parque Industrial (protegen el mismo cable).

Como consecuencia de lo indicado en el punto b), durante la fase 3 se registró un disparo del relé correspondiente al alimentador L1 del Parque Industrial. Las características del evento fueron las siguientes:

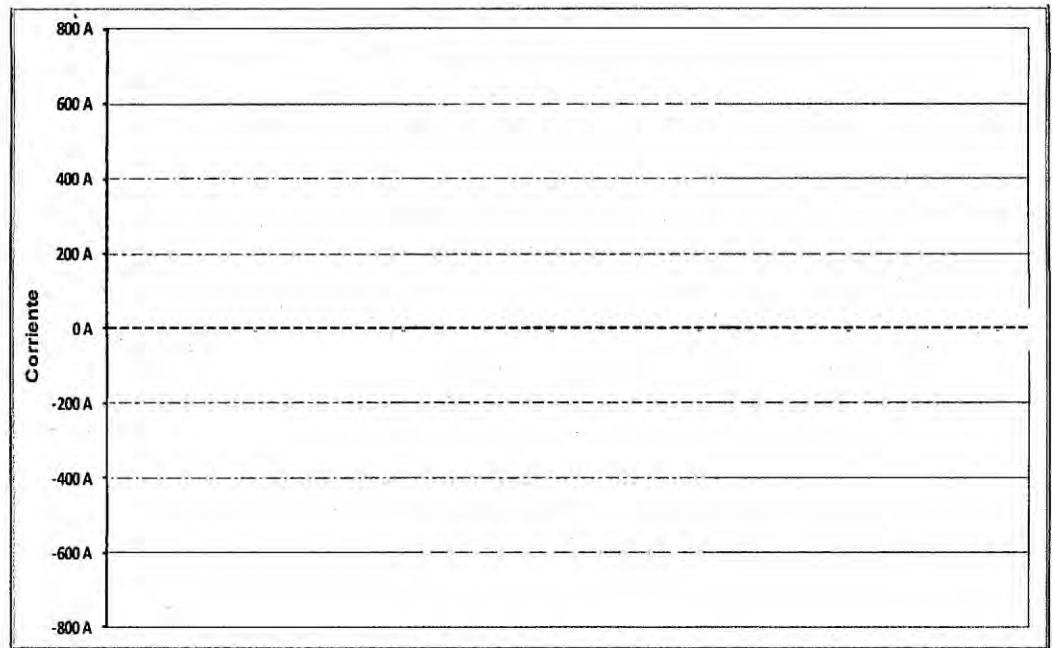
- El evento se registró a las 03:22 a.m aproximadamente, mientras se realizaba la fase 3 de las pruebas. Ver figura N° 26.
- La forma de onda mostrada, indica una reducción de la corriente en el alimentador L1 de la SER 01 (Patio Taller) de 677 A ($\sqrt{2} \cdot 450$ A) a 212 A ($\sqrt{2} \cdot 150$ A) como motivo de la salida en servicio de las SER de Parque Industrial, Villa María, Atocongo y Cabitos.

Según se observa en la tabla N°9, la corriente registrada en el alimentador L1 del Parque Industrial fue de 498.20 A, lo cual supera los 450 A, a los cuales se setearon los relés, lo que conllevó al disparo.

Figura N° 26

Forma de onda de la corriente en el momento de la falla Alimentador L1 de la

SER 01



Fuente: Elaboración propia

4.6.6 CÁLCULO DEL FACTOR DE CORRECCIÓN CONSIDERANDO TRENES CON PASAJEROS

4.6.6.a Consideraciones

Considerando que las pruebas fases 1, 2 y 3 se realizaron con los trenes sin pasajeros, se programó la fase 4 de las pruebas.

La fase 4 consistió en tratar de simular la operación normal de un día en hora punta, cuando los trenes se encuentren operando con pasajeros para realizar una comparación proporcional entre la energía consumida con los trenes en ambas condiciones de operación.

Los dos escenarios a comparar poseen las siguientes características:

Fase 4: Catorce trenes en la vía a una frecuencia de seis minutos. Los trenes están sin pasajeros.

Condición normal: Catorce trenes en la vía a una frecuencia de seis minutos. Los trenes están con pasajeros.

Bajo estas dos condiciones y debido a que los resultados mostraron que la energía consumida no es proporcional con el tiempo ($E_{1hora} \neq 2 * E_{1/2hora}$), se evaluó la energía consumida en un lapso de media hora bajo la siguiente metodología:

a) Para la fase 4, se consideró la energía consumida entre las 05:00 a.m. y las 05:30 a.m. (tiempo de duración de la prueba) del 01 de noviembre del 2013.

b) Para las condiciones normales, se consideraron dos tipos de evaluaciones:

Primera condición de evaluación: Se obtuvo la energía consumida en el periodo desde las 07:00 a.m. hasta las 08:00 a.m. y desde las 06:00 p.m. y las 07:00 pm. escogiéndose en cada intervalo de tiempo la máxima energía consumida en uno de los dos periodos de media hora.

Segunda condición de evaluación: Se obtuvo la máxima energía consumida en una ventana móvil de media hora, entre las 06:30 a.m. y las 09:30 a.m. y entre las 05:30 p.m. y las 08:30 p.m, la cual realizó un barrido cada minuto en cada uno de los dos intervalos de tiempo mencionados.

c) Debido a que la fase 4 simuló un escenario en hora punta, solo se tomaron los consumos de energía de los días 30 y 31 de octubre, 02 y 04 de enero, los cuales coinciden con los días hábiles de la operación.

d) En ambos escenarios la comparación se realizó entre las energías consumidas solo desde la SEAT Patio (los 04 días), solo desde la SEAT Grau (solo los días 02 y 04 de noviembre) y la energía total consumida por el sistema (solo los días 02 y 04 de noviembre).

4.6.6.b Resultados SEAT Patio

Aplicando las condiciones establecidas en la fase realizada, se realizó la evaluación del factor de proporción (f_{pc}) para la energía consumida por el sistema visto desde la SEAT Patio; es decir, el consumo de la SER 01 (Patio) a la SER 11 (Cabitos).

La tabla N° 10 y la tabla N° 11 muestran los resultados obtenidos y donde se observó lo siguiente:

- Los consumos bajo la segunda condición de evaluación (barrido de tiempo) muestran mayores consumos en comparación con la primera condición de evaluación (horas fijas).
- El factor de proporción por carga (f_{pc}) en la primera condición de evaluación varía entre 1.11 y 1.292, siendo en promedio 1.217.
- El factor de proporción por carga (f_{pc}) en la segunda condición de evaluación varía entre 1.137 y 1.345, siendo en promedio 1.282.
- Debido a que se desea que los niveles de corriente sean los más conservadores posibles, es necesario tomar en cuenta el máximo factor obtenido, el cual posee un valor de 1.345 para el periodo de las pruebas.

Por tanto, visto desde la SEAT Patio, los trenes con pasajeros consumieron un 34.5% más de energía.

Tabla N° 10

Factor de proporción por carga – SEAT Patio Primera condición de evaluación

Día	Hora Inicio	Hora Fin	Energía (kWh)	Factor
Viernes 01/11/2013	5:00:00	5:30:00	1353.90	
Miércoles 30/10/2013	7:30:00	8:00:00	1617.00	1.194
Miércoles 30/10/2013	18:30:00	19:00:00	1617.30	1.195
Jueves 31/10/2013	7:30:00	8:30:00	1741.20	1.286
Jueves 31/10/2013	18:00:00	18:30:00	1749.00	1.292
Sábado 02/11/2013	7:30:00	8:00:00	1503.00	1.110
Sábado 02/11/2013	18:00:00	18:30:00	1554.00	1.148
Lunes 04/11/2013	7:30:00	8:00:00	1659.90	1.226
Lunes 04/11/2013	18:00:00	18:30:00	1740.00	1.285
Máximo Factor de Proporción por carga				1.292

Fuente: Elaboración propia

Tabla N° 11

Factor de proporción por carga – SEAT Patio Primera condición de evaluación

Día	Hora Inicio	Hora Fin	Máxima Energía en media hora (kWh)	Factor
Viernes 01/11/2013	5:00:00	5:30:00	1353.90	
Miércoles 30/10/2013	8:18:00	8:48:00	1740.00	1.285
Miércoles 30/10/2013	19:21:00	19:51:00	1758.60	1.299
Jueves 31/10/2013	8:15:00	8:45:00	1819.80	1.344
Jueves 31/10/2013	19:27:00	19:57:00	1821.00	1.345
Sábado 02/11/2013	7:41:00	8:11:00	1539.00	1.137
Sábado 02/11/2013	19:19:00	19:49:00	1620.00	1.197
Lunes 04/11/2013	8:00:00	8:30:00	1798.80	1.329
Lunes 04/11/2013	19:25:00	19:55:00	1788.00	1.321
Máximo Factor de Proporción por carga				1.345

Fuente: Elaboración propia

4.6.6.c Resultados SEAT Grau

Aplicando las condiciones establecidas en el fase realizada, se realizó la evaluación del factor de proporción (f_{pc}) para la energía consumida por el sistema visto desde la SEAT Grau; es decir, el consumo de la SER 14 (Cultura) y SER 16 (Gamarra).

La tabla N° 12 y la tabla N° 13 muestran los resultados obtenidos de donde se observó lo siguiente:

- Los consumos bajo la segunda condición de evaluación (barrido de tiempo) dan mayores consumos en comparación con la primera condición de evaluación (horas fijas).
- El factor de proporción por carga (f_{pc}) en la primera condición de evaluación varía entre 0.901 y 1.34, siendo en promedio 1.133.
- El factor de proporción por carga (f_{pc}) en la segunda condición de evaluación varía entre 1.136 y 1.512 siendo en promedio 1.356.
- Debido a que se desea que los niveles de corriente sean los más conservadores posibles, es necesario tomar en cuenta el máximo factor obtenido, el cual posee un valor de 1.512 para el periodo de las pruebas.

Por tanto, visto desde la SEAT Grau, los trenes con pasajeros consumieron un 51.2% más de energía.

Tabla N° 12

Factor de proporción por carga – SEAT Grau Primera condición de evaluación

Día	Hora Inicio	Hora Fin	Energía (kWh)	Factor
viernes 01/11/2013	5:00:00	5:30:00	275.04	
sábado 02/11/2013	7:30:00	8:00:00	247.72	0.901
sábado 02/11/2013	18:00:00	18:30:00	368.55	1.340
lunes 04/11/2013	7:30:00	8:00:00	292.73	1.064
lunes 04/11/2013	18:30:00	19:00:00	337.82	1.228
Máximo Factor de Proporción por carga				1.340

Fuente: Elaboración propia

Tabla N° 13

Factor de proporción por carga- SEAT Grau Segunda condición de evaluación

Día	Hora Inicio	Hora Fin	Máxima Energía en media hora (kWh)	Factor
viernes 01/11/2013	5:00:00	5:30:00	275.04	
sábado 02/11/2013	8:44:00	9:14:00	312.56	1.136
sábado 02/11/2013	17:44:00	18:14:00	380.45	1.383
lunes 04/11/2013	8:09:00	8:39:00	415.83	1.512
lunes 04/11/2013	19:50:00	20:20:00	382.58	1.391
Máximo Factor de Proporción por carga				1.512

Fuente: Elaboración propia

4.6.6.d Resultados del tramo total

Aplicando las condiciones establecidas en fase realizada, se realizó la evaluación del factor de proporción (f_{pc}) para la energía consumida por el sistema visto desde la SEAT Grau es decir el consumo de la SER 14 (Cultura) y SER 16 (Gamarra).

La tabla N° 14 y la tabla N° 15 muestran los resultados obtenidos de donde se observó lo siguiente:

- Los consumos bajo la segunda condición de evaluación (barrido de tiempo) dan mayores consumos en comparación con la primera condición de evaluación (horas fijas).
- El factor de proporción por carga (f_{pc}) en la primera condición de evaluación varía entre 1.075 y 1.272, siendo en promedio 1.181.
- El factor de proporción por carga (f_{pc}) en la segunda condición de evaluación varía entre 1.121 y 1.347, siendo en promedio 1.25.
- Debido a que se desea que los niveles de corriente sean los más conservadores posibles es necesario tomar en cuenta el máximo factor obtenido el cual posee un valor de 1.347 para el periodo de las pruebas.

Por tanto, visto desde la SEAT Grau, los trenes con pasajeros consumieron un 34.7% más de energía.

Tabla N° 14

**Factor de proporción por carga – Consumo total
Primera condición de evaluación**

Día	Hora Inicio	Hora Fin	Energía (kWh)	Factor
viernes 01/11/2013	5:00:00	5:30:00	1628.94	
sábado 02/11/2013	7:30:00	8:00:00	1750.72	1.075
sábado 02/11/2013	18:00:00	18:30:00	1922.55	1.180
lunes 04/11/2013	7:30:00	8:00:00	1952.63	1.199
lunes 04/11/2013	18:30:00	19:00:00	2071.82	1.272
Máximo Factor de Proporción por carga				1.272

Fuente: Elaboración propia

Tabla N° 15

**Factor de proporción por carga – Consumo total
Segunda condición de evaluación**

Día	Hora Inicio	Hora Fin	Máxima Energía en media hora (kWh)	Factor
viernes 01/11/2013	5:00:00	5:30:00	1628.94	
sábado 02/11/2013	7:54:00	8:24:00	1826.25	1.121
sábado 02/11/2013	17:40:00	18:10:00	1968.01	1.208
lunes 04/11/2013	8:05:00	8:35:00	2193.88	1.347
lunes 04/11/2013	19:17:00	19:57:00	2158.93	1.325
Máximo Factor de Proporción por carga				1.347

Fuente: Elaboración propia

Se debe tener en cuenta que estos resultados son referenciales, pudiendo ser el factor incluso mayor, ya que la operación de los trenes no han sido comparadas en dos circunstancias similares; es decir, mismo tiempo de arranque, mismo tiempo de frenado, mismo tiempo de parada entre otros para las condiciones de los trenes con y sin pasajeros.

4.6.6.e Factor de proporción a utilizar

La tabla N° 16 muestra el resumen de los factores de proporción obtenidos de la evaluación donde se observa:

Mediante la comparación de las tablas N° 10 a N° 15 se puede observar que el máximo valor obtenido del factor de proporción por carga en el lado de la SEAT Patio y en el tramo total son similares mientras que en el caso de la evaluación desde el lado de la SEAT Grau el factor se desvía de los valores normales.

Si se toma el segundo valor máximo del factor en el caso de la evaluación desde el lado de la SEAT Grau, este factor se equipara con los factores obtenidos en los otros dos casos evaluados. Por tanto y debido a que la mayor energía se consume desde la SEAT Patio, el valor máximo de 1.512 obtenido en Grau se puede considerar como un valor no representativo para motivos de la evaluación.

Por tanto para escoger el factor de proporción más adecuado, se procedió a realizar un promedio de los tres factores de proporción máximos obtenidos en los tres escenarios teniendo en cuenta el segundo máximo valor del factor de proporción para el caso evaluado desde la SEAT Grau.

Finalmente el factor a ser considerado es de 1.361 es decir, los trenes consumirían un 36.10% más de energía por la presencia de los pasajeros.

Tabla N° 16

Factor de proporción por carga-Segunda condición de evaluación

Factor de proporción	SEAT Patío	SEAT Grau	Total
Factor 1	1.299	-	-
Factor 2	1.344	-	-
Factor 3	1.345	-	-
Factor 4	1.137	1.136	1.121
Factor 5	1.197	1.383	1.208
Factor 6	1.329	1.512	1.347
Factor 7	1.321	1.391	1.325
Factor de Proporción considerado			1.361

Punto no representativo

Valores considerados en el cálculo del factor de proporción

Fuente: Elaboración propia

4.6.7 NIVELES DE CORRIENTE CONSIDERADOS

Luego de realizadas las evaluaciones, es posible aplicar el factor obtenido en las fases a los resultados obtenidos en la tabla N° 9, para así determinar los niveles de corriente que serán considerados en la coordinación de las protecciones.

Los niveles de corriente considerados se muestran en la tabla N° 17

Tabla N° 17

Niveles de corrientes considerados

Alimentador	Corriente Máxima registrada en la prueba (Imax)	Corriente Máxima aplicando el Factor de Proporción
Desde SE AT Grau	538.70 A	733.17 A
SER Gamarra - L2	498.20 A	678.05 A
SER La Cultura - L1	440.30 A	599.25 A
SER Los Cabitos - L1	398.65 A	542.56 A
SER Atocongo - L1	398.65 A	542.56 A
SER Villa María - L1	440.30 A	599.25 A
SER Parque Industrial - L1	498.20 A	678.05 A
SER Patio - L2	498.20 A	678.05 A
Desde SE AT Patio	538.70 A	733.17 A


Fuente: Elaboración propia

De la misma forma en la tabla N° 17 se muestra la comparación de los valores obtenidos en relación con los ajustes actuales de la protección donde se observa que ante una operación con 24 trenes con pasajeros y a una frecuencia de tres minutos, las corrientes máximas presentes superarían los niveles de protección actuales.

Tabla N° 17

Evaluación de las corrientes con los ajustes actuales

Alimentador	Corriente Máxima aplicando el Factor de Proporción	Corriente máxima admisible según diseño (Idis)	Ajuste del relé de sobrecorriente 51N (*)	% (ImaxFactor/Ajuste)
Desde SEAT Grau	733.17 A	660 A	512 A	143.20%
SER Gamarra - L2	678.05 A	442 A	400 A	169.51%
SER La Cultura - L1	599.25 A	385 A	400 A	149.81%
SER Los Cabitos - L1	542.56 A	385 A	400 A	135.64%
SER Atocongo - L1	542.56 A	385 A	392 A	138.41%
SER Villa Mañá - L1	599.25 A	385 A	392 A	152.87%
SER Parque Industrial - L1	678.05 A	442 A	392 A	172.97%
SER Patio - L2	678.05 A	442 A	448 A	151.35%
Desde SEAT Patio	733.17 A	660 A	912 A	80.39%

 Sobrepasa el nivel de ajuste actual

*Los ajustes son los que actualmente se encuentran seteados en los relés del sistema eléctrico

Fuente: Elaboración propia

De la tabla N° 17 se observa que:

- La operación de los 24 trenes a una frecuencia de tres minutos resultaría en un registro de valores máximos de corriente que van desde los 542.56 A hasta los 733.17 A.
- Los valores de ajuste actual de los relés de sobrecorriente del tramo 1 de la Línea 1, son superados en porcentajes que van desde un 35.64% (Los Cabitos) hasta un 72.97% (Parque Industrial).
- Los valores nominales de diseño de los cables son superados en todas las SER y en las SEAT, por lo que deben realizarse análisis más precisos para determinar si el tipo de operación de los trenes con una frecuencia de tres minutos no daña a los cables.

- El sistema eléctrico no operaría de manera confiable en condiciones de diseño.

Finalmente la tabla N° 18 muestra los máximos a presentarse en cada una de las SER por la operación en condiciones máximas de diseño.

Tabla N° 18

Máximas corrientes en cada SER

Subestación/ Subestación Rectificadora	Imáx registrado	Imáx Aplicando fc
Gamarra	165.30 A	224.97 A
La Cultura	132.00 A	179.65 A
Los Cabitos	125.10 A	170.26 A
Atocongo	119.10 A	162.10 A
Villa María	157.32 A	214.11 A
Parque Industrial	139.01 A	189.19 A
Patio	93.32 A	127.01 A

Fuente: Elaboración propia

4.7 ANÁLISIS DE CORTOCIRCUITO

4.7.1 CONSIDERACIONES

Para los análisis de cortocircuito según IEC 60909, se tuvieron las siguientes consideraciones:

Las impedancias de los cables se proyectaron para una temperatura de 80°C. Se tomaron en cuenta los factores de reducción por agrupación, por temperatura y por tipo de tendido de los cables.

No se toma en cuenta la contribución de los motores de las cargas de las cabinas.

4.7.2 ESCENARIOS DE OPERACIÓN

Se realizó un análisis de cortocircuito máximo trifásico para la identificación de los poderes de ruptura de los interruptores y capacidad de cortocircuito de los cables. Para esto, se determinaron los escenarios de operación más desfavorables para las barras como para los cables. Como resultado de estas evaluaciones, el escenario más desfavorable para todas las secciones de cables y para las barras fue:

- Operación del suministro de la SEAT Santa Rosa con los dos transformadores de potencia en paralelo y con la SEAT San Juan fuera de servicio.

Se realizó un análisis de cortocircuito mínimo monofásico a tierra con la finalidad de determinar en qué caso se presenta la menor corriente con la que el relé debe disparar.

4.7.3 PODER DE RUPTURA DE INTERRUPTORES Y CAPACIDAD DE CORTOCIRCUITO DE LOS CABLES

4.7.3.a Poder de ruptura de interruptores

De acuerdo a la información brindada por CONCAR, el poder de ruptura de los interruptores presentes en todo el sistema eléctrico en 21.6 kV es de 12.5 kA.

4.7.3.b Capacidad de Cortocircuito de los cables

Para determinar la capacidad de cortocircuito de los cables es necesario aplicar la siguiente fórmula:

$$t_{max} \leq \left(\frac{I_{th}}{I''_{K3}} \right)^2 * t_{Kr}$$

Donde:

t_{max} : tiempo máximo de duración del cortocircuito

I_{th} : Corriente de cortocircuito nominal a $t_{Kr}=1$ segundo

I''_{K3} : Corriente de cortocircuito calculada

La tabla N° 19 muestra la capacidad de cortocircuito nominal de los cables para las diferentes secciones presentes en el sistema eléctrico de media tensión.

Tabla N° 19

Capacidad de cortocircuito nominal para cables de M.T

Sección del Cable	t_{kr}	I_{th}
70 mm ²	1 seg	10.00 kA
240 mm ²	1 seg	34.30 kA
300 mm ²	1 seg	42.90 kA

Fuente: Elaboración propia

4.7.4 RESULTADOS Y ANÁLISIS DEL CÁLCULO

4.7.4.a Corrientes de cortocircuito trifásico en barras

Los resultados del cálculo realizado para el sistema eléctrico en media tensión (21.6 kV), indican que existe una corriente de cortocircuito trifásico máximo en barras de 10.39 kA (barra de 21.6 kV de la SEAT Grau).

El poder de ruptura de los interruptores presentes en 21.6 kV es de 12.5 kA, se mantiene una holgura de 16.88% como mínimo.

La tabla N° 20 muestra un resumen de los valores encontrados.

Tabla N° 20

Resumen de resultados Corriente de cortocircuito trifásico en barras en la peor condición

SEAT/SER/CAB	$I_{CC3\phi}$	Holgura
SEAT Patio/ SEAT Grau	10.39 kA	16.88%
SER 01 / SER 16	10.30 kA	17.60%
SER 03 - SER 14 Max	8.43 kA	32.56%
SER 03 - SER 14 Min	4.28 kA	65.76%
Cab 01 / Cab 17	9.10 kA	27.20%
Cab 02 - Cab 16 Max	7.78 kA	37.76%
Cab 02 - Cab 16 Min	4.25 kA	66.00%

La holgura se obtiene en relación a los 12.5kA de poder de ruptura nominal de los interruptores en 21.6 kV

Fuente: Línea 1

4.7.4.b Corrientes de cortocircuito trifásico en cables

Los resultados del cálculo realizado para el sistema eléctrico en media tensión (21.6 kV) se presentan para las tres secciones presentes: 300 mm², 240 mm² y 70 mm².

La tabla N° 21 muestra un resumen de los valores encontrados mientras que en el capítulo 2 de la presente tesis se muestran los resultados obtenidos.

Tabla N° 21

Resumen de resultados Corriente de cortocircuito trifásico en cables

Sección del Cable	$I_{CC3\phi}$	t_{max} (según 5.3.2)
Cable de 300 mm ²	8.28 kA	> 26.84 seg
Cable de 240 mm ²	9.07 kA	> 14.30 seg
Cable de 70 mm ²	7.63 kA	> 1.72 seg

Fuente: Línea 1

4.7.4.c Corrientes de cortocircuito bifásico en barras

Los resultados del cálculo realizado para el sistema eléctrico en media tensión (21.6 kV), indican que existe una corriente de cortocircuito bifásico máximo en barras de 9.00 kA (barra de 21.6 kV de la SEAT Grau).

La tabla N° 22 muestra un resumen de los valores encontrados mientras que en el capítulo 2 de la presente tesis se muestran los resultados obtenidos.

Tabla N° 22

Resumen de resultados corriente de cortocircuito bifásico en

SEAT/SER/CAB	ICC _{2φ}	Holgura
SEAT Patio/ SEAT Grau	9.00 kA	28.00%
SER 01 / SER 16	8.92 kA	28.64%
SER 03 - SER 14 Max	7.30 kA	41.60%
SER 03 - SER 14 Min	3.63 kA	70.96%
Cab 01 / Cab 17	7.68 kA	38.56%
Cab 02 - Cab 16 Max	6.66 kA	46.72%
Cab 02 - Cab 16 Min	3.27 kA	73.84%

La holgura se obtiene en relación a los 12.5kA de poder de ruptura nominal de los interruptores en 21.6 kV

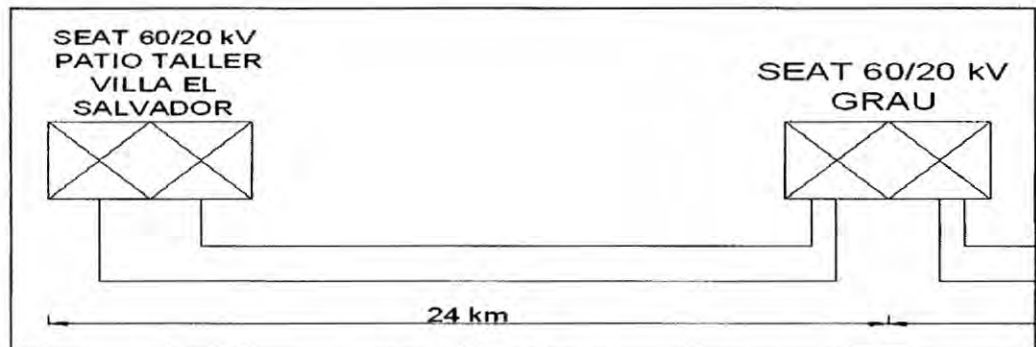
Fuente: Línea 1

4.7.4.d Corrientes de cortocircuito monofásico a tierra en barras

Para determinar el valor de la corriente máxima de falla monofásica a tierra, se toma en cuenta que el cable en media tensión para alimentación de las Cabinas y Subestaciones Rectificadoras interconecta las Subestaciones AT/MT de Patio, y Grau.

Figura N° 27

Esquema recorrido de cables de media tensión



Fuente: Línea 1

Debido a que el sistema de distribución de 21.6kV es de neutro aislado, las corrientes de falla a tierra dependerán de las capacidades homopolares de los cables de 21.6kV.

La máxima capacitancia homopolar que se considera para el circuito en estudio es de 12.83 μ F, lo que resulta para una resistencia de falla a tierra de 0 Ohmios, una corriente homopolar de 180.96 A.

4.8 EVALUACIÓN DE LOS RESULTADOS

De acuerdo a los resultados obtenidos se observó que:

- Los interruptores presentes en el sistema de media tensión (21.6 kV) del Tramo 1 de la Línea 1 del Metro de Lima se encuentran dentro del rango de operación para los poderes de ruptura presentes en la red.
- Las tres secciones de cables presentes en la red no presentan problemas por capacidad de cortocircuito para el tiempo de despeje de falla actual.

4.9 ANÁLISIS DE LA COORDINACIÓN DE LAS PROTECCIONES

De acuerdo con los antecedentes de apertura del sistema eléctrico y con los resultados mostrados en el capítulo 4 de la presente tesis, los ajustes actuales de los equipos de protección no permiten una operación confiable del sistema de protección, motivo por el cual en el presente capítulo se procederá a realizar la coordinación de la protección a fin de determinar los nuevos ajustes en los equipos de protección.

4.10 EQUIPOS DE PROTECCIÓN CONSIDERADOS

El sistema eléctrico en media tensión del Tramo 1 de la Línea 1 del Metro de Lima cuenta con diferentes equipos de protección para la operación confiable del sistema.

Los equipos a ser considerados para la coordinación de protección son los relés de sobrecorriente de fase y de tierra del tipo direccional y no direccional, siendo estos de la marca FIR para el tramo antiguo (desde SEAT Patio hasta SER Atocongo) y de la marca SIEMENS para el tramo nuevo (desde SER Atocongo hasta SEAT Grau).

La ubicación de los equipos de protección considerados se encuentra en el capítulo 2.6.

Los principios de protección de los relés instalados se describen en los documentos "Memoria de Estudio de Selectividad", [5] **"Memoria de Estudio de Protección del Sistema (AT,MT) y [10] "Informe Técnico sobre el Coordinamiento de las Protecciones Eléctricas de la SSE 60/20 kV – Patio Taller"**.

4.11 ESTADO ACTUAL DE LOS EQUIPOS DE PROTECCIÓN

Según el servicio de pruebas de los sistemas de protecciones, se realizaron pruebas a 114 equipos de protección de los cuales noventa fueron de sobrecorriente o direccionales, siendo los veinticuatro restantes otro tipo de protección (sobretensión, corriente continua, entre otros). De los noventa relés que entran en el alcance del servicio, se detectaron como resultado de las pruebas realizadas que quince de ellos requieren ser cambiados pues no

cumplen sus características de operación indicadas en la información técnica del fabricante.

La tabla N° 23 muestra los relés que requieren cambio y que se encuentran ubicados en las SER del Tramo 1, mientras que en el capítulo 2 se muestran los resultados de las evaluaciones realizadas en [9].

Tabla N° 23
Relés defectuosos ubicados en SER

SER	Celda	Tipo
Parque Industrial	L2 Alimentación a la Cabina 05 Villa Mar	67N
	TRG-1-03 Alimentación Transformador	51N
	TRG-2-03 Alimentación Transformador	51N
SEAT Patio	52-P1 Alimentación a la SSE Patio Taller	51-50
	52-L1 Alimentación desde Trafo T1	51N
Villa Maria	L1 Alimentación desde la SSE 03	67N
	L2 Alimentación desde la SSE 08	67N
	TRG-2-05 Alimentación Transformador	51N

Fuente: Línea 1

4.12 CRITERIOS DE AJUSTE

El objetivo principal del sistema de protección es proteger al personal de los efectos de estas fallas, aislar de forma rápida el área de falla de un sistema, minimizar el daño al equipo eléctrico y reducir los costos por salidas de servicio de la carga asociada para poder mantener en funcionamiento la mayor parte del sistema restante. Dentro de este contexto existen seis requerimientos básicos para la aplicación del relé de protección.

- a) **Fiabilidad:** Seguridad de que la protección se llevará a cabo correctamente, tiene dos componentes: confianza y seguridad.
- b) **Selectividad:** Continuidad máxima del servicio con mínima desconexión del sistema.
- c) Inmunidad a interferencias externas.
- d) **Rapidez de Operación:** Duración mínima de una falla, así como un menor daño en los equipos del sistema.
- e) **Simplicidad:** Menor equipo de protección y circuitos asociados para lograr los objetivos de protección
- f) **Economía:** Mayor protección a menor costo total.

4.13 COORDINACIÓN DE LOS EQUIPOS DE PROTECCIÓN

4.13.1 Protección y selectividad de los anillos de cables de 21.6 kV

a) Sobrecorriente de fase

Para evitar que la protección ocasione disparos por las corrientes máximas que normalmente se presentarían durante la operación de los trenes a una frecuencia de tres minutos, es necesario tener en cuenta los resultados mostrados en la tabla N° 17 en donde se determina que el ajuste de los arranques de los relés de sobrecorriente de fase se considera en 1.6 veces la corriente nominal de los cables de 21.6 kV. La tabla N° 25 muestra el resumen de esta evaluación.

Tabla N° 24

Capacidad nominal de los cables alimentadores

Tipo de Cable	Capacidad Nominal (Tabla N°3.1)	Capacidad de lcc (t=1seg)
Cu 70mm ² tendido en aire	167 A	10 kA
Cu 240mm ² tendido en aire	385 A	34.3 kA
Cu 240mm ² tendido en tierra	330 A	34.3 kA
Cu 300mm ² tendido en aire	442 A	42.9 kA

Fuente: Línea 1

Tabla N° 25

Determinación de los arranque de los relés de sobrecorriente de fase

Alimentador	Tipo de Cable	Corriente Máxima aplicando el Factor de Proporción	Corriente Nominal	Arranque por sobrecorriente 1.6 ⁿ
Desde SEAT Grau	2 x 240mm ²	733.17 A	660.00 A	1056 A
SER Gamarra - L2	1 x 300mm ²	678.05 A	442.00 A	707 A
SER La Cultura - L1	1 x 240mm ²	599.25 A	385.00 A	616 A
SER Los Cabitos - L1	1 x 240mm ²	542.56 A	385.00 A	616 A
SER Atocongo - L1	1 x 240mm ²	542.56 A	385.00 A	616 A
SER Villa María - L1	1 x 240mm ²	599.25 A	385.00 A	616 A
SER Parque Industrial - L1	1 x 240mm ²	678.05 A	385.00 A	616 A
SER Patio - L2	1 x 300mm ²	678.05 A	442.00 A	707 A
Desde SEAT Patio	2 x 240mm ²	733.17 A	660.00 A	1056 A
Todas las Cabinas	1 x 70 mm ²	-	167.00 A	268 A

Fuente: Línea 1

Además se considera que para las instalaciones nuevas, que tienen relés de sobrecorriente marca SIEMENS, en el documento CTEL-SIE-ELT-AET-INF-43000, en la página 7 se menciona lo siguiente:

“Para posibilitar una protección selectiva, los relés de protección instalados en los extremos de un tramo de cables de 21.6kV intercambian información sobre los valores de sobrecorriente 51(N), cortocircuito 50(N) y la dirección de flujo 67(N). De esta forma, se excluyen las fallas que se encuentren fuera o por el contrario, despejan la falla si ésta se encuentra dentro del tramo protegido. El intercambio de información se realiza a través de la red OTN.”

Las figura N° 28, N°29 y N°30 muestran las curvas de coordinación para las SER 01-Patio Taller, SER 16-Gamarra y Cabina 17-Grau.

Figura N° 28
 Coordinación de protección sobrecorriente de fase SER 01 – Patio Taller

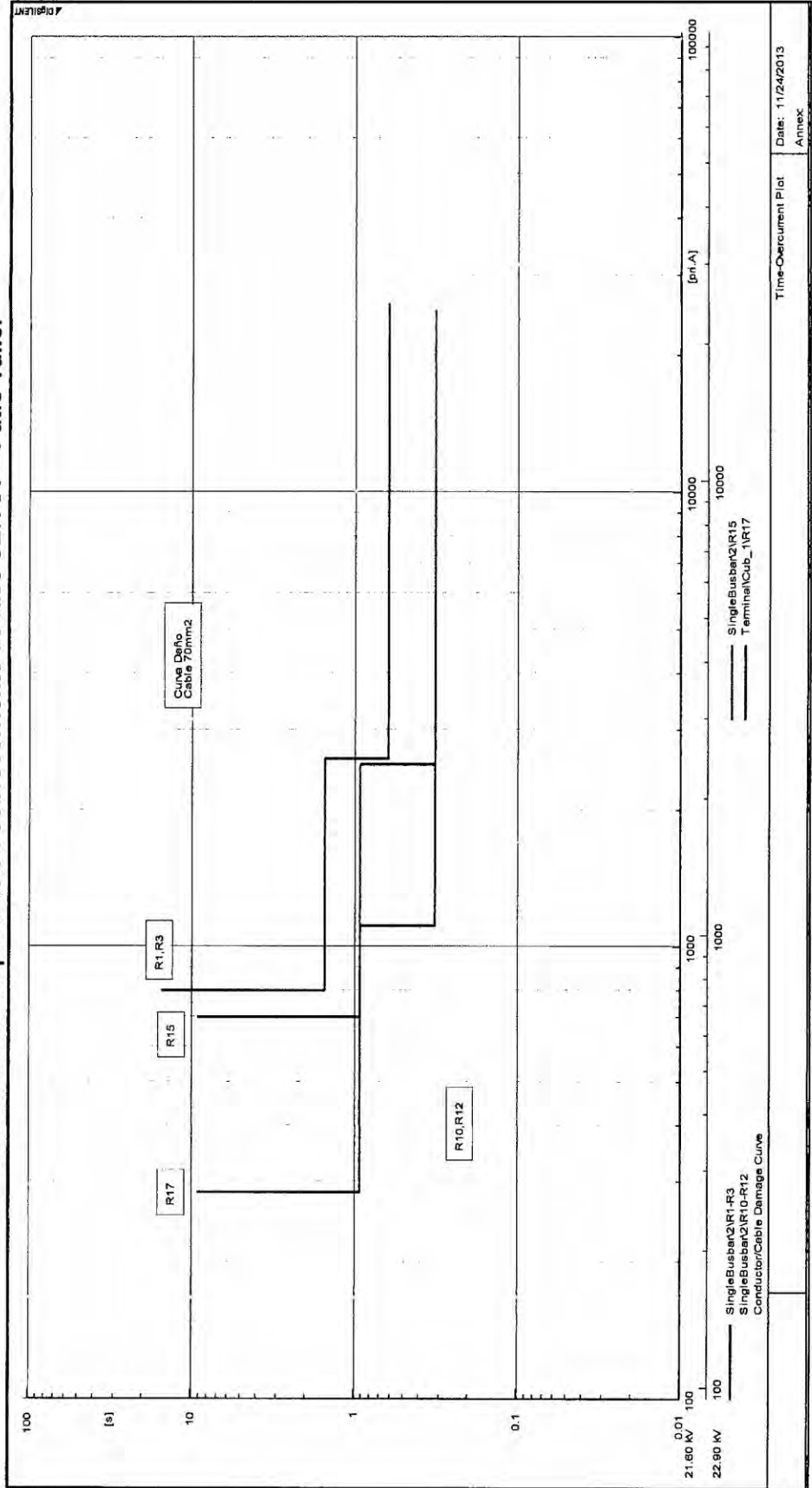


Figura N° 29

Coordinación de protección sobrecorriente de fase SER 16 – Gamarra

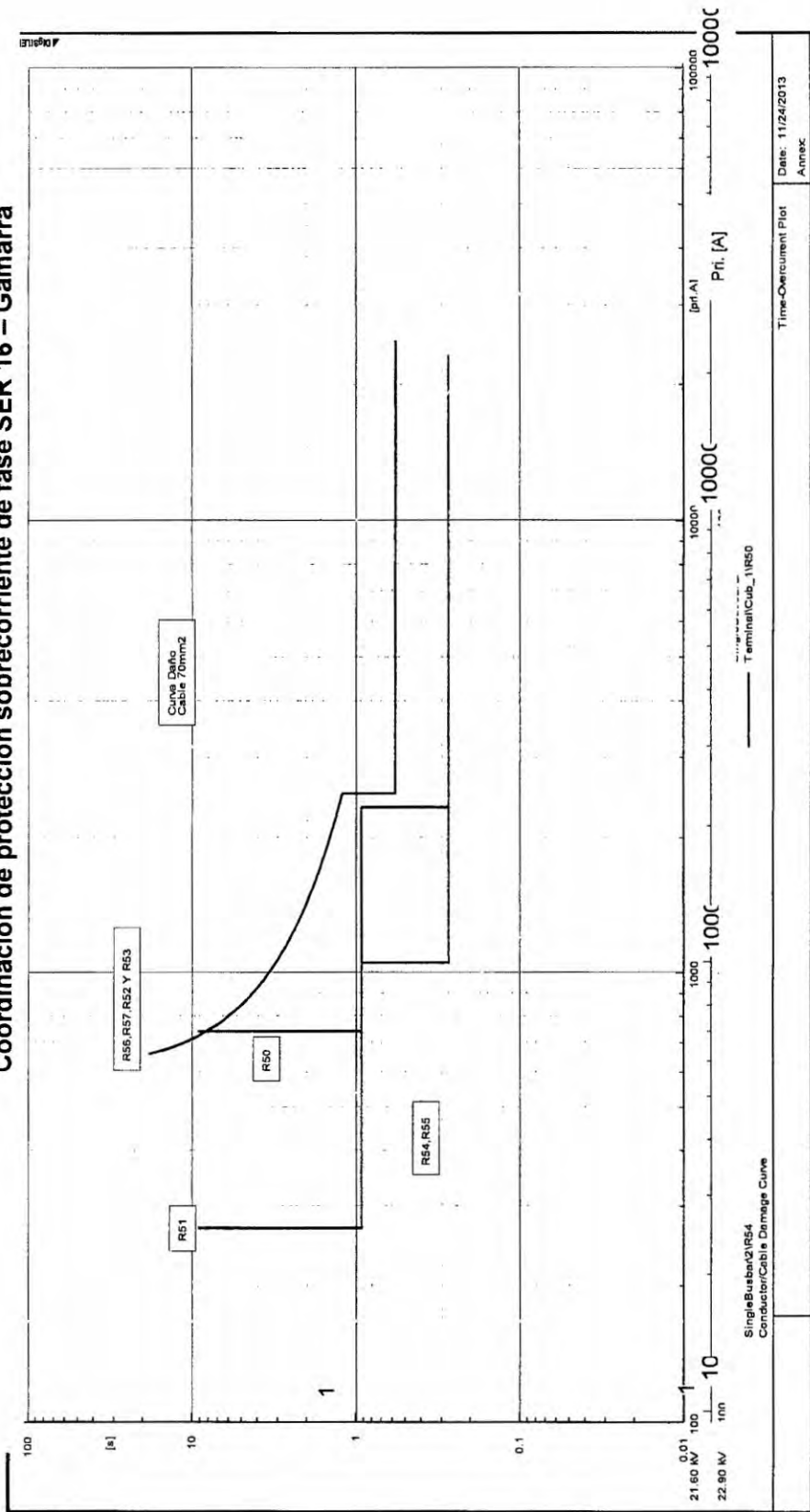
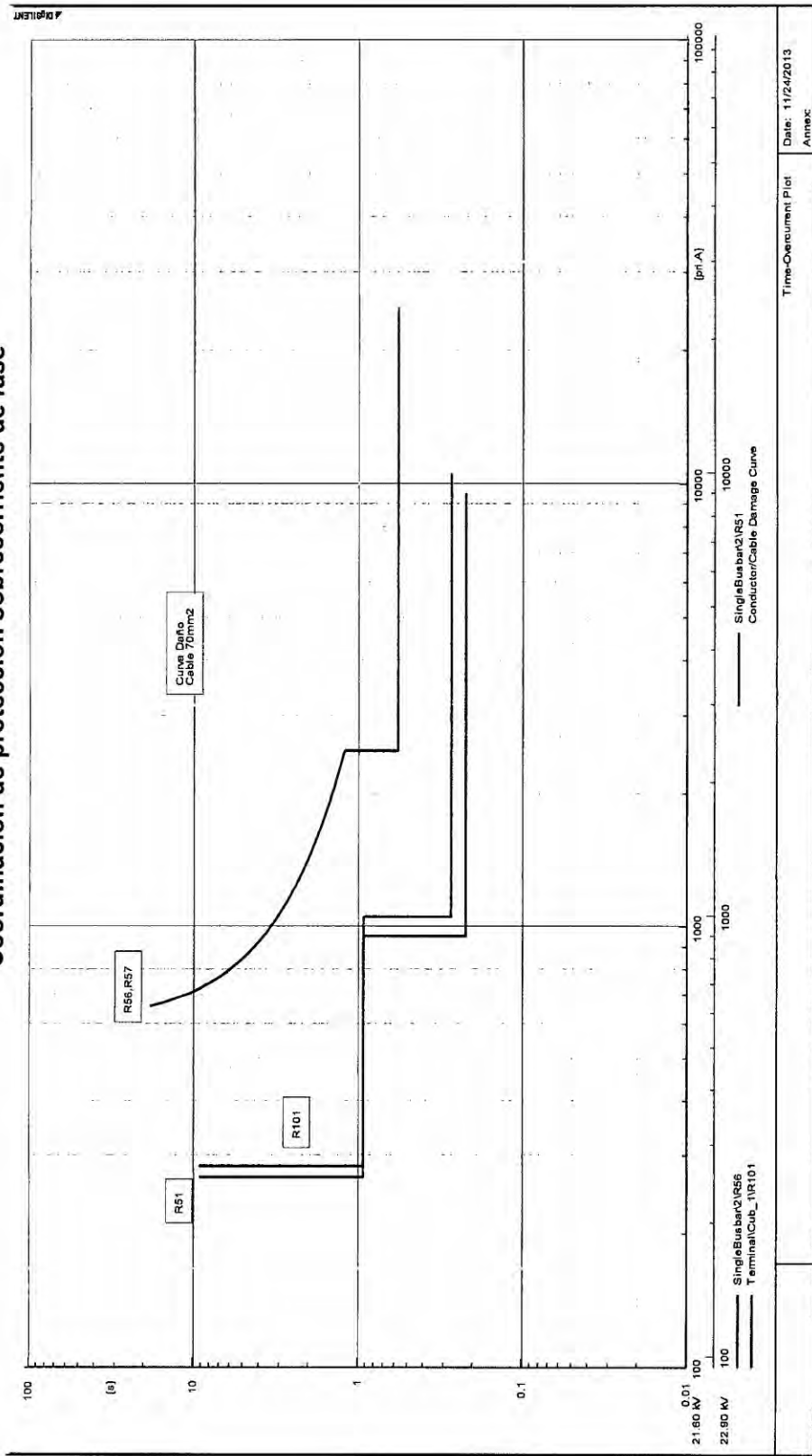


Figura N° 30
Coordinación de protección sobrecorriente de fase



b) Sobrecorriente de tierra

El sistema de distribución 21.6kV es de neutro aislado razón por la cual se obtuvieron las siguientes corrientes de falla a tierra, para las distintas resistencias de falla del terreno según se muestran en la tabla N°26.

Tabla N° 26
Corrientes de falla a tierra

R (ohms)	3* I_o (A)	3* V_o (kV)
0	180.96	37.412
50	146.47	30.282
100	102.69	21.230
200	58.95	12.188
300	40.51	8.376
400	30.72	6.352
500	24.71	5.108
600	20.65	4.269
700	17.73	3.665
800	15.53	3.211
900	13.82	2.856
1000	12.44	2.572
1247	10.00	2.067
1500	8.31	1.717
2000	6.23	1.288
3000	4.16	0.859
4000	3.12	0.644
5000	2.49	0.516

Fuente: Elaboración propia

Para el ajuste de la falla a tierra, se considera una corriente de falla monofásica a tierra mínima de 10 A, considerando una resistencia de falla de 1247 ohm, y de esta manera darle sensibilidad al equipo de protección ante este tipo de falla.

En el capítulo 2.7 de la presente tesis se muestran los ajustes finales propuestos para los equipos de protección analizados.

4.13.2 Protección y selectividad de los transformadores de rectificadores

a) Sobrecorriente de fase

La Tabla N° 27 muestra los valores de ajuste para los transformadores de los rectificadores por sobrecorriente de fase, teniendo en cuenta además los valores obtenidos en la Tabla N° 19.

Se determinó, que el **ajuste de $1.7 \cdot I_n$ para el arranque por sobrecorriente** protege de manera correcta a los transformadores de rectificadores, además se tuvo en cuenta que en el documento [2] "Memoria de Estudio de Selectividad", la protección considerada asume que se pueden presentar casos donde la máxima corriente en servicio llegue a ser de 312 A.

La curva de ajuste para este caso se muestra en la **Figura N° 31**.

Tabla N° 27
Corrientes de arranque para falla entre fases

Subestación/ Subestación Rectificadora	I_{max} Trafo SER	Corriente Nominal	Factor de Sobrecorriente $1.7 \cdot I_n$
Gamarra	112.49 A	104.00 A	177 A
La Cultura	89.83 A	104.00 A	177 A
Los Cabitos	85.13 A	104.00 A	177 A
Atocongo	81.05 A	104.00 A	177 A
Villa María	107.06 A	104.00 A	177 A
Parque Industrial	94.60 A	104.00 A	177 A
Patio	63.50 A	104.00 A	177 A

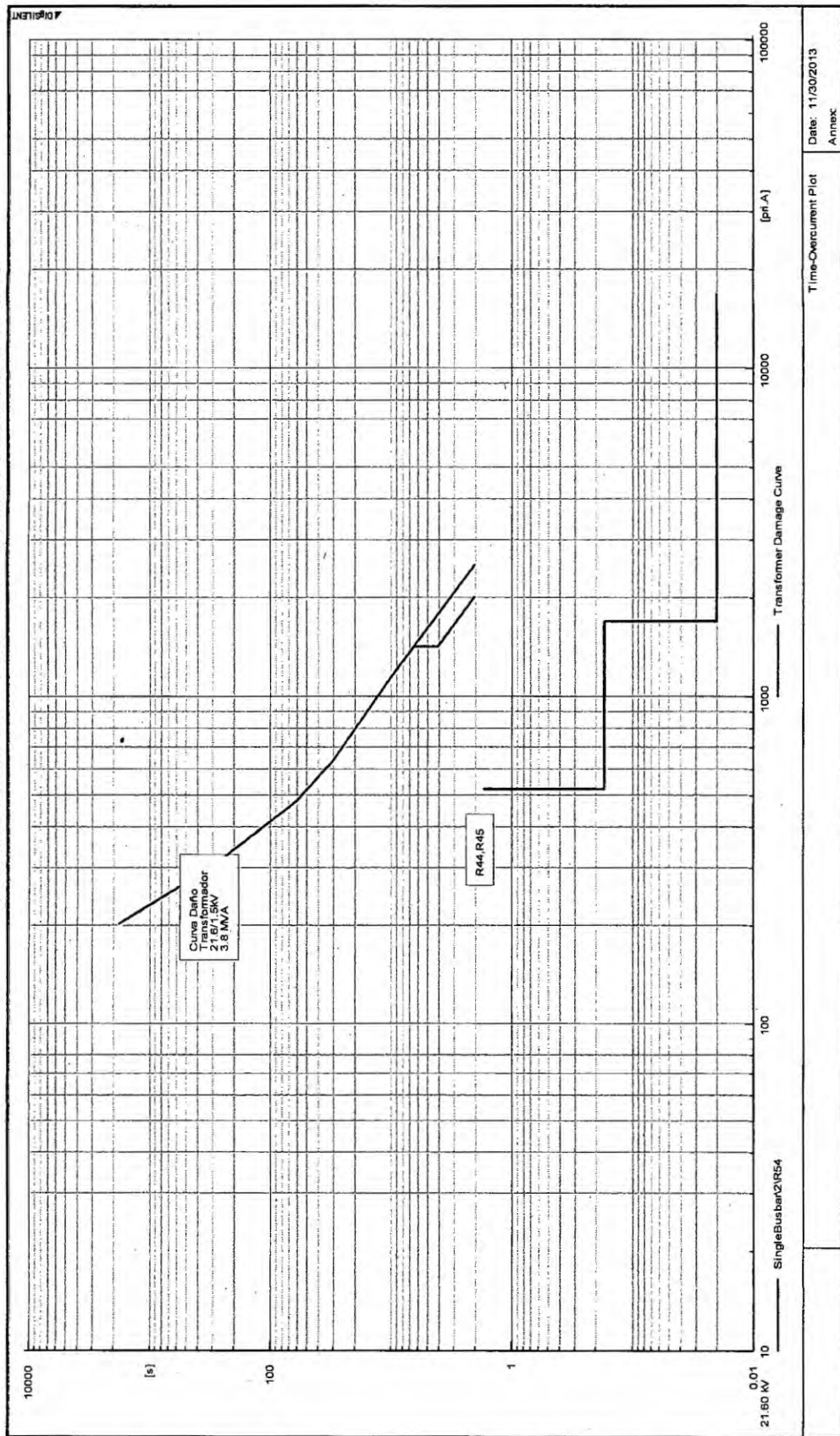
Fuente: Elaboración propia

b) Sobrecorriente de tierra

Para la protección por fallas monofásicas a tierra se considera el mismo ajuste al que se han diseñado las protecciones de los cables de media tensión, es decir, el ajuste se realiza a los 10A de corriente de falla monofásica a tierra.

Figura N° 31

Coordinación de Protección Sobrecorriente de Fase



4.13.3 Protección y selectividad de los transformadores de SS.AA

Según el documento "Memoria de Estudio de Selectividad", la protección contra cortocircuitos de los transformadores auxiliares de 100 kVA y 160 kVA se realizará mediante el uso de seccionadores fusibles bajo carga de alta capacidad de ruptura (fusibles ACR). Para ambas capacidades de los transformadores, los fusibles son de 10 A.

4.14 RESUMEN DE AJUSTES DE LOS RELÉS

Una vez determinados los ajustes finales de los relés, el resumen de los valores considerados para la protección de cada uno de los equipos eléctricos presentes en el sistema eléctrico en media tensión 21.6 kV se detalla a continuación:

Para todos los cables alimentadores de las SEAT, SER y CAB:

- a) Protección 50/51: Ajuste a 1.6 veces la corriente nominal.
- b) Protección 51 N: Ajuste a 10 A de corriente de falla.

Para todos los transformadores de rectificadores

- a) Protección 50/51: Ajuste a 1.7 veces la corriente nominal.
- b) Protección 51 N: Ajuste a 10 A de corriente de falla.

Para todos los transformadores de SSAA

- a) Protección con fusibles ACR de 10

V. CONCLUSIONES

- En función a las pruebas realizadas como consecuencia de la presente tesis se puede evidenciar que el tramo antiguo no estaría preparado para la operación a la frecuencia de circulación de diseño.
- Durante las pruebas se pudo comprobar que el tramo nuevo presenta mayor capacidad a las sobrecargas en la red de media tensión que el tramo antiguo.
- Durante las pruebas realizadas se registraron corrientes que superaban los ajustes de los relés, lo que ocasionó el disparo del relé y apertura del interruptor en la SER Parque Industrial durante la fase 3 de las pruebas, con lo cual el sistema no operó de manera confiable aun cuando los umbrales de sobrecorriente se elevaron en un 15%.
- El factor de proporción calculado indica que la presencia de pasajeros en los trenes aumentaría el consumo de energía en un 36.10%; sin embargo, estos resultados podrían variar debido a la naturaleza de la operación del sistema.
- La operación de los 24 trenes a una frecuencia de tres minutos presentó valores máximos de corriente que van desde los 542.56 A hasta los 733.17A.
- Durante las pruebas realizadas, los valores de corriente máxima superaron los valores nominales de los cables en todas las SER y en las SEAT, por lo que deben realizarse análisis más precisos para determinar si en la operación de los trenes con una frecuencia de tres minutos los cables

no resultarían dañados debido a sobrecargas por la operación propia del sistema.

- Considerando el aumento de energía por la presencia de pasajeros, los valores de corriente nominal de los cables así como los ajustes actuales de los dispositivos de protección son superados ocasionando que el sistema no opere de manera confiable.

VI. RECOMENDACIONES

- Se recomienda realizar una evaluación técnica-económica para determinar la factibilidad de realizar el reemplazo progresivo del equipamiento de Media Tensión perteneciente al tramo antiguo de la Línea 1.
- Se recomienda realizar un estudio integral de la capacidad de corriente de los cables M.T (21.6Kv), tanto para las corrientes de carga normales como para las corrientes máximas presentes en la operación de los trenes, considerando las condiciones de instalación real de los cables.
- Se recomienda renovar los relés del tipo FIR del tramo antiguo (Patio – Atocongo), los cuales tienen más de 20 años de funcionamiento, por relés de protección digitales iguales o similares a los instalados en el tramo nuevo. Estos permitirían que permitan tener una mejor selectividad en la detección de fallas, así como el registro de eventos y oscilografía, lo cual contribuirá a una operación más confiable.

VII. REFERENCIAS

Para el desarrollo del trabajo de Investigación, se tomaron como referencia los siguientes documentos:

- [1] CTEL-SIE-ELT-AET-INF-43000_02 “Simulación Eléctrica de la Línea 1 – Villa el Salvador – Grau” – 20 Octubre del 2010.
- [2] CTEL-SIE-ELT-AET-MDE-52118_02 “Memoria de Estudio de Selectividad” – 20 de Octubre del 2010.
- [3] CTEL-SIE-ELT-AET-MDE-52117_02 “Memoria y Diseño del Sistema Eléctrico de Alimentación Eléctrica”- 20 de Octubre del 2010.
- [4] CTEL-SIE-ELT-AET-MDE-52122_01 “Memoria y Diseño del Circuito de Media Tensión 21.6 kV” – 16 de Agosto del 2010.
- [5] CTEL-SIE-ELT-AET-MDE-52119_01 “Memoria de Estudio de Protección del Sistema (AT, MT) – 10 de Agosto del 2010.
- [6] Proyecto Especial Sistema Eléctrico de Transporte Masivo de Lima y Callao – Primera Fase: Villa el Salvador – Hospital dos de Mayo – Informe Técnico del Dimensionamiento de Cables de Alimentación Primaria M.T – Octubre de 1991.
- [7] Proyecto Especial Sistema Eléctrico de Transporte Masivo de Lima y Callao – Primera Fase: Villa el Salvador – Hospital dos de Mayo – Estudio de Simulación de la Línea Completa Velasco Alvarado – Hospital dos de Mayo / Velasco Alvarado – Atocongo – 4 de Diciembre de 1991.
- [8] Informe Técnico EDP-013-13 Pruebas de Mantenimiento a Interruptores existentes en las instalaciones del Metro de Lima – 05 de Febrero del 2013.

[9] Informe de Resultados EDP-017-13 Servicio de Pruebas de los Sistemas de Protecciones – 01 de Febrero del 2013.

[10] Informe Técnico sobre el Coordinamiento de las Protecciones Eléctricas de la SSE 60/20 kV Patio Taller – 16 de Octubre de 1992.

VIII. MATRIZ DE CONSISTENCIA

TÍTULO DEL PROYECTO: "PRUEBAS ELÉCTRICAS COMO FACTOR DE AJUSTE EN LA COORDINACIÓN DE PROTECCIONES, CASO: RED MT 20KV- METRO DE LIMA				
PROBLEMAS	OBJETIVOS	HIPÓTESIS	VARIABLES	MÉTODOS
<p>GENERAL</p> <p>¿De qué manera el desfasaje tecnológico del equipamiento eléctrico del sistema MT del tramo antiguo de la LINEA 1 impedirá operar a las máximas condiciones de operación del sistema eléctrico?</p> <p>ESPECÍFICOS</p> <p>¿De qué manera realizando las pruebas eléctricas a las máximas condiciones permitiremos tener un mejor ajuste en las coordinaciones de la protección en la línea de MT 20kv?</p>	<p>GENERAL</p> <p>Proponer un modelo de pruebas eléctricas a las condiciones máximas de operación para obtener un factor de ajuste sobre el sistema eléctrico en MT del tramo antiguo de la LINEA 1.</p> <p>ESPECÍFICOS</p> <p>Describir, analizar y precisar un mejor ajuste en la coordinación de protección en la línea de MT 20 kv del tramo 1 de la LINEA 1.</p>	<p>HIPÓTESIS PRINCIPAL</p> <p>Es posible la operación del sistema eléctrico de MT del tramo antiguo de la LINEA 1 a las máximas condiciones de diseño sin que esto afecte la operación comercial del servicio de pasajeros.</p> <p>HIPÓTESIS ESPECÍFICA</p> <p>Describiendo, analizando y simulando en las pruebas eléctricas las máximas condiciones de operación del sistema eléctrico se podrá realizar la coordinación de las protecciones adecuada para la línea de MT 20 kv de la LINEA 1.</p>	<p>VARIABLES INDEPENDIENTES</p> <p>✓ Modelo de pruebas eléctricas.</p> <p>VARIABLES DEPENDIENTES</p> <p>✓ Coordinación de las protecciones del sistema de M. T.</p>	<p>Este trabajo de investigación es enmarcado dentro del Método descriptivo-evaluativo, puesto que un estudio de la gestión instalaciones eléctricas de servicio público, que inicialmente describiremos analizamos y luego la evaluamos.</p> <p>La Investigación será ejecutada en tres etapas:</p> <p>La Primera de Recolección de Información y aplicación de instrumentos diseñados.</p> <p>La segunda de procesamiento de información, el análisis y la evaluación de los datos obtenidos de diferentes fuentes.</p> <p>La tercera etapa será de obtención de los resultados, contrastación de hipótesis y redacción de conclusiones y recomendaciones.</p>