



Universidad
Técnica de
Cotopaxi

UNIVERSIDAD TÉCNICA DE COTOPAXI

FACULTAD DE CIENCIAS DE LA INGENIERÍA Y APLICADAS

CARRERA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA EN SISTEMAS ELÉCTRICOS DE POTENCIA

PROYECTO DE INVESTIGACIÓN

“ANÁLISIS DE LA INFLUENCIA SOBRE LOS ALIMENTADORES PRIMARIOS 23/13.8 KV DEBIDO AL INGRESO EN EL SISTEMA DE CARGAS DE TRACCIÓN (METRO)”.

Proyecto de investigación presentado previo a la obtención del Título de Ingeniero Eléctrico en
Sistemas Eléctricos de Potencia

Autores:

Caguana Lalaleo Hugo Daniel

Peña Pavón Angel Homero

Tutor:

Ing. Edwin Marcelo Lema Guamán

M.sc.

LATACUNGA- ECUADOR

2019



Universidad
Técnica de
Cotopaxi



Ingeniería
Eléctrica

DECLARACIÓN DE AUTORÍA

Nosotros, **CAGUANA LALALEO HUGO DANIEL** y **PEÑA PAVÓN ANGEL HOMERO**, declaramos ser autores del presente proyecto de investigación: **"ANÁLISIS DE LA INFLUENCIA SOBRE LOS ALIMENTADORES 23/13.8KV DEBIDO AL INGRESO EN EL SISTEMA DE CARGAS DE TRACCIÓN (METRO)"**, siendo ING. EDWIN MARCELO LEMA GUAMAN M.SC. tutor del presente trabajo; y eximo expresamente a la Universidad Técnica de Cotopaxi y a sus representantes legales de posibles reclamos o acciones legales.

Además, certifico que las ideas, conceptos, procedimientos y resultados vertidos en el presente trabajo investigativo, son de mi exclusiva responsabilidad.

HUGO DANIEL CAGUANA LALALEO
C.I.: 180438879-9

ANGEL HOMERO PEÑA PAVÓN
C.I.: 180339690-0



AVAL DEL TUTOR DE PROYECTO DE TITULACIÓN

En calidad de Tutor del Trabajo de Investigación sobre el título:

"ANÁLISIS DE LA INFLUENCIA SOBRE LOS ALIMENTADORES 23/13.8KV DEBIDO AL INGRESO EN EL SISTEMA DE CARGAS DE TRACCIÓN (METRO)", de CAGUANA LALALEO HUGO DANIEL y PEÑA PAVÓN ANGEL HOMERO, de la carrera de INGENIERÍA ELÉCTRICA, considero que dicho Informe Investigativo cumple con los requerimientos metodológicos y aportes científico-técnicos suficientes para ser sometidos a la evaluación del Tribunal de Validación de Proyecto que el Consejo Directivo de la FACULTAD DE CIENCIAS DE LA INGENIERÍA Y APLICADAS de la Universidad Técnica de Cotopaxi designe, para su correspondiente estudio y calificación.

Latacunga, Julio 2019



Firma

Tutor: Ing. Edwin Marcelo Lema Guamán M.sc.

APROBACIÓN DEL TRIBUNAL DE TITULACIÓN

En calidad de Tribunal de Lectores, aprueban el presente Informe de Investigación de acuerdo a las disposiciones reglamentarias emitidas por la Universidad Técnica de Cotopaxi, y por la **FACULTAD DE CIENCIAS DE LA INGENIERÍA Y APLICADAS**; por cuanto, el o los postulantes: **CAGUANA LALALEO HUGO DANIEL** y **PEÑA PAVÓN ANGEL HOMERO** con el título de Proyecto de titulación: **"ANÁLISIS DE LA INFLUENCIA SOBRE LOS ALIMENTADORES 23/13.BKV DEBIDO AL INGRESO EN EL SISTEMA DE CARGAS DE TRACCIÓN (METRO)"** han considerado las recomendaciones emitidas oportunamente y reúne los méritos suficientes para ser sometido al acto de Sustentación de Proyecto.

Por lo antes expuesto, se autoriza realizar los empastados correspondientes, según la normativa institucional.

Latacunga, Julio 2019

Para constancia firman:



Lector 1 (Presidente)

Nombre: Ing. Wilian Guamán M.Sc.

CC: 060357895-6



Lector 2

Nombre: Phd. Eliana Gonzales

CC: 1757707065-9



Lector 3

Nombre: Ing. Xavier Proaño

CC: 050265642 - 4

AGRADECIMIENTO

Lo más importante que uno tiene es la vida, por eso mi agradecimiento al Divino Niño, dueño de todo lo que existe y por haberme regalado la dicha de tener a los mejores padres quien siempre me han apoyado para cumplir cada una de mis metas propuestas. Finalmente, un eterno agradecimiento a la Universidad Técnica de Cotopaxi y a la carrera de Ingeniería Eléctrica por darme la oportunidad de prepararme de forma profesional y personal.

A cada uno de mis docentes gracias por su tiempo, por su apoyo, por su sabiduría que me transmitieron en el desarrollo de mi formación profesional y en especial a mi tutor Ing. Edwin lema M.Sc., a cada uno de mis lectores por su valiosa guía y asesoramiento en el desarrollo del proyecto de tesis. En general agradezco a todas las personas que hicieron posible la presente tesis, con su tiempo, colaboración y apoyo incondicional.

HUGO.

DEDICATORIA

Este proyecto es dedicado con mucho amor a mis queridos padres, Hugo Caguana y Ana Lalaleo quienes han sido un pilar fundamental en mi vida, me enseñaron el valor de luchar por mis sueños con mucho esfuerzo, perseverancia, responsabilidad, y dedicación, inculcándome buenos valores gracias padres por dar una profesión para mi presente, mi futuro y por creer en mí y ser los ejes fundamentales de mi vida.

A mi hermano Bryan Caguana por darme ese impulso y ese cariño durante toda mi carrera profesional. A mis amigos/as quienes fueron un apoyo y una alegría en el proceso de mis estudios en la universidad.

HUGO.

AGRADECIMIENTO

Agradezco a Dios por protegerme durante mi sendero de vida, a mis padres que son el pilar fundamental y apoyo en mi formación académica, me han dado todo lo que soy como persona, mis valores, mis principios, mi perseverancia, y todo ello de una manera desinteresada sabiéndome aconsejar y guiar de la mejor manera cuando más lo he necesitado.

A mis hermanas que han sido mi ejemplo de lucha para alcanzar mis metas; a mi abuelito materno, familiares y amigos cercanos quienes supieron tenderme la mano de la mejor manera y con quienes he compartido alegrías y tristezas.

Gracias a cada profesor que hizo parte de este proceso integral de formación, y a cada persona quien lee esta tesis por permitir ser parte de su conocimiento e incurrir dentro de su repertorio de información mental.

Finalmente a la universidad, carrera por acogerme; y permitirme culminar mis estudios brindándome así el título de Ingeniero Eléctrico en Sistemas Eléctricos de Potencia.

ANGEL.

DEDICATORIA

Esta tesis va dedicada con amor y cariño, y de manera muy especial a mi madre, y a mi recordada abuelita materna que han sido mi refugio y fuente de inspiración durante los momentos más duros de mi vida, ya que con sus palabras de aliento me motivaron a seguir adelante, superando así cada uno de los obstáculos que se han presentado durante mi trayectoria estudiantil como profesional.

Además a todas aquellas personas que confiaron y estuvieron a mi lado en las buenas y las malas apoyándome.

ANGEL.

ÍNDICE GENERAL

DECLARACIÓN DE AUTORÍA	¡Error! Marcador no definido.
AVAL DEL TUTOR DE PROYECTO DE TITULACIÓN	¡Error! Marcador no definido.
AGRADECIMIENTO	v
DEDICATORIA	ii
AGRADECIMIENTO	iii
DEDICATORIA	ii
ÍNDICE GENERAL	iii
ÍNDICE DE FIGURAS	vii
ÍNDICE DE TABLAS	ix
RESUMEN	vi
ABSTRACT	vii
1. INFORMACIÓN DEL PROYECTO	1
2. DESCRIPCIÓN DEL PROYECTO	3
3. JUSTIFICACIÓN DEL PROYECTO	4
4. BENEFICIARIOS DEL PROYECTO	4
5. EL PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN:	4
5.1. Planteamiento del problema	4
5.2. Formulación del problema.....	5
6. OBJETIVOS:	5
6.1 Objetivo General.....	5
6.2 Objetivos Específicos	5
7. ACTIVIDADES Y SISTEMA DE TAREAS EN RELACIÓN A LOS OBJETIVOS PLANTEADOS:	6
8. FUNDAMENTACIÓN CIENTÍFICO TÉCNICA	7
8.1. Tracción eléctrica	7

8.2. Sistemas de Transporte eléctricos masivos	8
8.3. El metro	8
8.3.1. Definiciones relacionadas al metro.....	9
8.3.2. Características de los trenes:.....	9
8.3.3. Aspectos sobre alimentación eléctrica de sistemas ferroviarios de transporte urbano...	10
8.3.4. Funcionamiento del metro.	10
8.3.5. Alimentación A.C.....	11
8.3.6. Subestación de Rectificación o de tracción.	13
8.4. Peso de trenes en vacío.	16
8.5. Transformadores de Tres devanados	17
8.6. Parámetros de Calidad de energía.	18
8.6.1. Calidad de Voltaje.	19
8.6.2. Factor de Potencia	20
8.7. Perturbaciones armónicas	20
8.7.1. Distorsión Armónica.	20
8.7.2. Contaminación de armónicas en sistemas de tracción.....	22
8.7.3. Variadores.....	23
8.7.4. Análisis Directo	29
8.7.5. Distorsión de voltaje y distorsión de corriente	30
8.7.6. Índices de armónicos	31
8.7.6.1. Corriente y Voltaje Armónico Relativo.....	31
9. HIPÓTESIS:	34
9.1. VALIDACIÓN DE LAS PREGUNTAS CIENTÍFICAS O HIPÓTESIS	34
10. METODOLOGÍA Y DISEÑO EXPERIMENTAL	35
10.1. Métodos de investigación	35
10.2. Método inductivo – deductivo.....	35
10.3. Método analítico y sintético	35

10.4. Tipos de Investigación.....	35
10.4.1. Investigación Bibliográfica.....	35
10.4.2. Investigación Exploratoria.....	36
10.4.3. Investigación descriptiva	36
10.5. Técnicas de Investigación:.....	36
10.5.1. Observación Directa y Participativa	36
11. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS.....	36
11.1. Descripción de las subestaciones de estudio	36
11.2. Características de las Subestaciones.....	37
11.2.1. Descripción de la Subestación 1.....	37
11.2.2. Descripción de la Subestación 3.....	38
11.3. Características técnicas del metro.....	39
11.4. Número de trenes operando en la línea del metro.	41
11.5. Cálculo de la Potencia Mecánica y Potencia Eléctrica.....	44
11.6. Demanda de las subestaciones proyectadas.	47
11.6.1. Análisis de los perfiles de voltaje.....	53
11.6.2. Análisis de cargabilidad de los Transformadores.....	56
11.6.3. Análisis de cargabilidad de los Conductores.....	56
11.6.4. Análisis de factor de Potencia	57
11.7. Análisis del estudio de Armónicos.....	57
11.7.1. Análisis de Armónicos con metro.	64
11.7.2. Análisis de Armónicos con rectificadores de 12 pulsos.....	73
12. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	75
12.1. CONCLUSIONES:.....	75
12.2. RECOMENDACIONES:	76
13. BIBLIOGRAFÍA:.....	76
14. ANEXOS	79

14.1. Diagrama esquemático del metro para alimentación e interconexión.....	79
14.2. Diagrama unifilar eléctrico del metro para alimentación e interconexión	80
14.3. Diagrama eléctrico del metro con subestaciones.....	81
14.4. Diagrama de estudio de flujos de potencia sin metro.....	82
14.5. Diagrama de estudio de flujos de potencia con metro.....	83
14.6. Diagrama de estudio de flujos de armónicos con metro.....	84
14.7. Datos del metro para cada subestación.....	85
14.8. Datos para curva total con residencial y metro.....	93
14.9. Datos para el comportamiento de carga del metro.	103

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Esquema simplificado del sistema de alimentación del metro	7
Figura 2: Constitución de un tren del SEM.....	10
Figura 3: Circuito de tracción.	10
Figura 4: Esquema simplificado del sistema de alimentación del metro.	11
Figura 5: Anillo abierto alimentado desde los extremos	12
Figura 6: Anillo abierto alimentado desde los extremos.....	12
Figura 7: Anillo abierto alimentado desde los extremos.....	13
Figura 8: Esquema de Conexión típica entre subestaciones de tracción.....	14
Figura 9: Rectificador de 12 pulsos.....	14
Figura 10: Circuito de alimentación DC.	15
Figura 11: Diagrama unifilar del ondulator autónomo.....	16
Figura 12: Transformador de tres devanados	18
Figura 13: Distinción de corriente causada por elemento no lineal	21
Figura 14: Representación de las series de Fourier de una onda distorsionada.	22
Figura 15: Variador simplificado	23
Figura 16: Subestación de tracción con rectificador hexafásico	24
Figura 17: Variador de 6 pulsos	24
Figura 18: Variador de 12 pulsos	25
Figura 19: Salida de corriente	25
Figura 20: Espectro de frecuencias en un rectificador de 12 pulsos	26
Figura 21: Modelo de un rectificador de 12 pulsos	27
Figura 22: Rectificador de 12 pulsos en serie	27
Figura 23: Rectificador de 12 pulsos en paralelo	28
Figura 24: Rectificador de 12 pulsos en paralelo y en serie	29
Figura 25: Diagrama Unifilar eléctrico de la Subestación 1	38
Figura 26: Diagrama Unifilar eléctrico de la Subestación 2	38
Figura 27: Diagrama Unifilar eléctrico de la Subestación 3	39
Figura 28: Diagrama del recorrido total del metro.....	43
Figura 29: Curva típica del recorrido total del metro.....	44
Figura 30: Curva de demanda total solo con cargas de distribución para la S/E 1	48
Figura 31: Curva de demanda de la subestación 1 cuando ingresa el metro.....	49

Figura 32: Curva de demanda total solo con cargas de distribución para la S/E 2.....	49
Figura 30: Curva de demanda de la subestación 2 cuando ingresa el metro.....	50
Figura 34: Curva de demanda total solo con cargas de distribución para la S/E 3	51
Figura 35: Curva de demanda de la subestación 3 cuando ingresa el metro.....	51
Figura 36: Flujos de potencia sin metro	52
Figura 37: Flujos de potencia con metro	53
Figura 38: Flujos de armónicos sin metro	58
Figura 39: Armónicos de voltaje de Subestación 1	59
Figura 40: Armónicos de voltaje de Subestación 1	60
Figura 41: Armónicos de voltaje de Subestación 1	61
Figura 42: Armónicos de voltaje de Subestación 1	62
Figura 43: Armónicos de voltaje de Subestación 1	63
Figura 44: Armónicos de voltaje de Subestación 1	64
Figura 45: Rectificador puente trifásico de 6 pulsos.....	65
Figura 46: Flujos de armónicos sin metro	66
Figura 47: Armónicos de voltaje de Subestación 1	67
Figura 48: Armónicos de voltaje de Subestación 2.....	68
Figura 49: Armónicos de voltaje de Subestación 3.....	69
Figura 50: Armónicos de voltaje de Subestación 1	70
Figura 51: Armónicos de voltaje de Subestación 2.....	71
Figura 52: Armónicos de voltaje de Subestación 3.....	72
Figura 53: Comparación del nivel de armónicos.	73
Figura 54: Rectificador de 12 pulsos.....	74
Figura 55: Espectro de frecuencias con Rectificador de 12 pulsos.....	75
Figura 56: Datos del metro para la subestación 1	86
Figura 57: Datos del metro para la subestación 2	89
Figura 58: Datos del metro para la subestación 3	92
Figura 59: Datos de residencial y metro para la subestación 1	96
Figura 60: Datos de residencial y metro para la subestación 2	99
Figura 61: Datos de residencial y metro para la subestación 3	102
Figura 62: Datos de residencial y metro para la subestación 3	103

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Áreas del conocimiento del proyecto	3
Tabla 2: Áreas del conocimiento del proyecto	6
Tabla 3: Características técnicas de los coches motores.....	16
Tabla 4: Parámetros de Calidad de Energía.....	18
Tabla 5: Límites para el índice de nivel de voltaje.....	20
Tabla 6: Límites de la distorsión armónica de voltaje para sistemas de distribución según la norma IEEE.....	32
Tabla 7: Límites de inyección de corriente armónico según la IEEE 519 – 1992.....	33
Tabla 8: Operacionalización de la variable independiente.....	34
Tabla 9: Operacionalización de la variable dependiente.....	34
Tabla 10: Características de las subestaciones utilizadas para la alimentación del metro	37
Tabla 11: Características técnicas del transformador de tracción para el metro	37
Tabla 12: Características técnicas del transformador de tracción para el metro	40
Tabla 13: Características técnicas del transformador de tracción para el metro	40
Tabla 14: Períodos de trabajo del metro.....	41
Tabla 15: Número y horario de los trenes.....	41
Tabla 16: Paradas del metro	42
Tabla 17: Tiempo de recorrido en la hora pico de la mañana	43
Tabla 18: Tiempo de recorrido en la hora pico de la mañana	44
Tabla 19: Cálculo de la velocidad lineal entre paradas	45
Tabla 20: Cálculo de la velocidad lineal entre paradas	45
Tabla 21: Cálculo de la velocidad lineal entre paradas	46
Tabla 22: Potencia de transformador para cargas de distribución en cada subestación.....	47
Tabla 23: Potencia de transformador para cargas de tracción en cada subestación.....	47
Tabla 24: Perfiles de Voltaje – Subestación 1.....	53
Tabla 25: Variaciones de voltaje – Subestación 1.....	54
Tabla 26: Perfiles de Voltaje – Subestación 1.....	54
Tabla 28: Variaciones de voltaje – Subestación 2.....	55
Tabla 28: Perfiles de Voltaje – Subestación 1.....	55
Tabla 29: Variaciones de voltaje – Subestación 2.....	55
Tabla 30: Cargabilidad de transformadores	56
Tabla 31: Cargabilidad de transformadores	56

Tabla 32: Cargabilidad de transformadores	57
Tabla 33: Contenido de armónicos de Voltaje	59
Tabla 34: Contenido de armónicos de Voltaje	60
Tabla 35: Contenido de armónicos de Voltaje	61
Tabla 36: Contenido de armónicos de Corriente.....	62
Tabla 37: Contenido de armónicos de Corriente.....	63
Tabla 38: Contenido de armónicos de Corriente.....	64
Tabla 39: Contenido de armónicos de Voltaje de la S/E 1.....	66
Tabla 40: Contenido de armónicos de Voltaje de la S/E 2.....	67
Tabla 41: Contenido de armónicos de Voltaje de la S/E 3.....	68
Tabla 42: Contenido de armónicos de Corriente.....	69
Tabla 43: Contenido de armónicos de Corriente.....	70
Tabla 44: Contenido de armónicos de Corriente.....	71
Tabla 45: Comparación de niveles de armónicos.....	72

UNIVERSIDAD TÉCNICA DE COTOPAXI

FACULTAD DE CIENCIAS DE LA INGENIERÍA Y APLICADAS

TITULO: “ANÁLISIS DE LA INFLUENCIA SOBRE LOS ALIMENTADORES PRIMARIOS 23/13.8 kV DEBIDO AL INGRESO EN EL SISTEMA DE CARGAS DE TRACCIÓN (METRO)”

Autor/es:

Caguana Lalaleo Hugo Daniel

Peña Pavón Angel Homero

RESUMEN

El presente proyecto de titulación tiene como finalidad el estudio del comportamiento eléctrico de los alimentadores de 23/13.8 kV ante el ingreso del sistema de tracción metro. El suministro de energía para el sistema eléctrico metro se realizara a nivel de 13.8 kV, desde tres subestaciones, los mismos que constan de transformadores de tres devanados y de rectificadores que provee corriente continua de 1 kV para la alimentación del sistema de tracción.

En el presente estudio técnico se realiza una modelación detallada del sistema eléctrico del metro, considerando dos escenarios básicos antes y después del ingreso del metro, con el objetivo de realizar estudios de flujos de potencia y de armónicos, obteniendo así los perfiles de voltaje, cargabilidad de transformadores y conductores de los alimentadores de estudio. Como resultados del estudio de cargabilidad de estableció que el Sistema metro con los 0,45 MVA de demanda requerido, incrementaría en un 20% la demanda proyectada del sistema eléctrico, en consecuencia el sistema de 13.8 kV, podrá abastecer a largo plazo la alimentación requerida por el metro.

Finalmente se obtiene que la cargabilidad de los conductores y de los transformadores se encuentra dentro del rango permitido con una reserva del 25%, sin presentar ninguna sobrecarga. Las variaciones de voltaje se encuentran dentro del 8% permitido por la regulación CONELEC 005/18. Otro de los resultados que se obtuvo con el presente estudio, es determinar el contenido de armónicos presentes en la red al ingresar el metro, llegando a la conclusión que debido a la presencia de los rectificadores de 12 pulsos no presentan porcentajes de armónicos fuera de los niveles establecidos por la regulación IEEE – 519.

Palabras clave: sistema de tracción, cargabilidad, demanda, armónicos, rectificador.

UNIVERSITY TECHNICAL OF COTOPAXI

THEME:

“ANALYSIS OF THE INFLUENCE ON PRIMARY FEEDERS 23 / 13.8 kV DUE TO ENTRY IN THE SYSTEM OF TRACTION LOADS (SUBWAY)”

Authors:

Caguana Lalaleo Hugo Daniel

Peña Pavón Angel Homero

ABSTRACT

The purpose of this titling project is to study the electrical behavior of the 23 / 13.8 kV feeders before the entry of the underground traction system. The power supply for the subway electrical system will be carried out at a 13.8 kV level, from three substations, which consist of three winding transformers and rectifiers that provide 1 kV direct current for the supply of the traction system.

In the present technical study a detailed modeling of the electrical system of the subway is carried out, considering two basic scenarios before and after the entry of the subway, with the aim of conducting studies of power flows and harmonics, thus obtaining the profiles of voltage, chargeability of transformers and conductors of the study feeders. As a result of the chargeability study, it was established that the Subway System with the 0.45 MVA of required demand, would increase the projected demand of the electrical system by 20%, consequently the 13.8 kV system, will be able to supply the required power in the long term by the subway

Finally, it is obtained that the chargeability of the conductors and of the transformers is within the allowed range with a reserve of 25%, without presenting any overload. The voltage variations are within the 8% allowed by the CONELEC 005/18 regulation. Another result that was obtained with the present study, is to determine the content of harmonics present in the network when entering the subway, reaching to the conclusion that due to the presence of the



CENTRO DE IDIOMAS

AVAL DE TRADUCCIÓN

En calidad de Docente del Idioma Inglés del Centro de Idiomas de la Universidad Técnica de Cotopaxi, en forma legal **CERTIFICO** que: La traducción del resumen del Proyecto Investigativo al Idioma Inglés presentado por los señores Egresados: **CAGUANA LALALEO HUGO DANIEL** y **PEÑA PAVÓN ANGEL HOMERO** de la Carrera de **INGENIERÍA ELÉCTRICA** de la **FACULTAD DE CIENCIAS DE LA INGENIERÍA Y APLICADAS**, cuyo título versa: **"ANÁLISIS DE LA INFLUENCIA SOBRE LOS ALIMENTADORES 23/13.8KV DEBIDO AL INGRESO EN EL SISTEMA DE CARGAS DE TRACCIÓN (METRO)"**, lo realizaron bajo mi supervisión y cumple con una correcta estructura gramatical del idioma.

Es todo puedo certificar en honor a la verdad y autorizo a los peticionarios hacer uso del presente certificado de la manera ética que estimaren conveniente.

Latacunga, Julio del 2019.

Atentamente,

A handwritten signature in blue ink, appearing to read 'Estuardo'.

Msc. ESTUARDO VLADIMIR SANDOVAL VIZUETE
DOCENTE CENTRO DE IDIOMAS
C.C. 0502104219



PROYECTO DE TITULACIÓN II

1. INFORMACIÓN DEL PROYECTO

Título del Proyecto:

“Análisis de la influencia sobre los alimentadores primarios 23/13.8 kV debido al ingreso en el sistema de cargas de Tracción (metro)”.

Fecha de inicio:**Fecha de finalización:****Lugar de Ejecución:**

San Felipe, Cantón Latacunga, Provincia Cotopaxi

Facultad que auspicia:

Ciencias de Ingeniería y Aplicadas.

Carrera que auspicia:

Ingeniería Eléctrica

Proyecto de investigación vinculado:

Calidad de Energía en Sistemas Eléctricos Industriales.

Equipo de Trabajo:**TUTOR DEL PROYECTO INVESTIGACIÓN:**

Nombre : Ing. Edwin Marcelo Lema Guamán M.sc.

Fecha de Nacimiento : 06/04/1988

Nacionalidad : Ecuatoriano

Cedula N : 0302264351

Domicilio : Av. Unidad Nacional y Catalina Rivera

Teléfono : 0959046477

e-mail : edwin.lemma@utc.edu.ec

Educación Media : ITS “Ezequiel Cárdenas Espinoza”

Educación Superior : “Universidad de Cuenca”

ESTUDIANTE (I)

Nombre : Caguana Lalaleo Hugo Daniel
 Fecha de Nacimiento : 04 de Enero de 1994
 Estado Civil : Soltero
 Nacionalidad : Ecuatoriano
 Cedula N : 1804388799
 Domicilio : Ambato-Colinas de Ficoa
 Teléfono : 03-2466-290
 e-mail : hugo.caguana9@utc.edu.ec
 Educación Primaria : Instituto Superior Técnico Experimental “Luis A Martínez”
 Educación Media : Instituto Superior Tecnológico Docente “Guayaquil”

ESTUDIANTE (II)

Nombre : Peña Pavón Angel Homero
 Fecha de Nacimiento : 25 de Julio de 1985
 Estado Civil : Soltero
 Nacionalidad : Ecuatoriano
 Cedula N : 1803396900
 Domicilio : Ambato-Ingahurco Bajo
 Teléfono : 0994223729
 e-mail : angel.peña0@utc.edu.ec
 Educación Primaria : Instituto Superior Técnico Experimental “Luis A Martínez”
 Educación Media : Instituto Tecnológico Superior “Bolívar”

Área de conocimiento:

En la tabla 1 se indican las áreas de conocimiento, de acuerdo a los campos de educación y capacitación CINE de la UNESCO

Tabla 1: Áreas del conocimiento del proyecto

Campo Amplio	Campo Específico	Campo detallado
07 Ingeniería industria y construcción	081 Ingeniería y profesiones afines	0711 Ingeniería y procesos químicos 0713 Electricidad y energía 0714 Electrónica y automatización

Fuente: UNESCO (2017)

Línea de Investigación:

Línea de investigación de la Universidad Técnica de Cotopaxi

- Explotación y diseño de Sistemas eléctricos de potencia.

Sub líneas de investigación de la Carrera:

Calidad de energía

2. DESCRIPCIÓN DEL PROYECTO

El constante crecimiento de la población y la necesidad de movilizarse fácilmente han provocado que los sistemas y vías de transporte colapsen, requiriendo nuevos sistemas de transporte masivo. Para enfrentar estos problemas de movilidad dentro de la ciudad, se ha optado por la utilización del transporte subterráneo.

El suministro de energía para el sistema eléctrico metro, se realiza a nivel de voltaje de 23/13.8 kV, desde 3 subestaciones. El enfoque de este proyecto de investigación es el análisis de la influencia que tiene el metro sobre los alimentadores primarios, señalando sus principales características técnicas y realizando el respectivo estudio sobre la calidad de energía del sistema eléctrico ante el incremento de una carga de tracción.

En el presente estudio se realizara una modelación detallada del sistema de tracción metro (STM) en cualquier software eléctrico, con la finalidad de realizar estudios de flujos de potencia y de armónicos en diferentes condiciones de operación para poder determinar el contenido de armónicos, perfiles de voltaje y cargabilidad del sistema de alimentación del metro. Con los resultados obtenidos en las simulaciones se realiza un análisis comparativo del contenido armónico, perfiles de voltaje y cargabilidad de la red eléctrica, antes y después de la incorporación delo STM.

3. JUSTIFICACIÓN DEL PROYECTO

El Sistema de Tracción metro es una obra de gran importancia debido a que este sistema permitirá solucionar los problemas de movilidad masivo. Desde el punto de vista eléctrico, este sistema de movilidad constituye una carga no lineal de alta potencia, ya que para el funcionamiento del metro se necesita el uso de rectificadores e inversores, lo que significa una alta probabilidad de inyección de corrientes armónicas al sistema de distribución y la inestabilidad de los parámetros eléctricos que afectan a la calidad de energía, tales como en las diferentes subestaciones que alimentaran dicho sistema.

Por otro lado, el sistema de tracción metro tiene líneas de distribución adicionales que alimentan al metro. En los sistemas de tracción metro (STM), las cargas de tracción forman parte de los sistemas eléctricos para el transporte masivo de personas, ocasionando al sistema problemas de voltaje, frecuencia, armónicos y confiabilidad.

Con el objetivo de garantizar la calidad del sistema eléctrico, es necesario realizar estudios técnicos que permitan determinar el nivel en que afecta a la red eléctrica por la inserción del metro. La finalidad de realizar el análisis de los alimentadores que alimentaran al STM, es plantear acciones que permitan mitigar los problemas de calidad de energía en dichos alimentadores.

4. BENEFICIARIOS DEL PROYECTO

✓ Directos

Autores del proyecto de investigación.

Carrera de Ingeniería Eléctrica

Universidad Técnica de Cotopaxi

✓ Indirectos

Otras instituciones del Ecuador interesadas en el análisis de la influencia sobre los alimentadores primarios 23/13.8 kV debido al ingreso en el sistema de tracción (metro).

5. EL PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN:

5.1.Planteamiento del problema

El crecimiento constante de la población y el incremento del parque automotor han provocado que las vías y los sistemas de transporte colapsen a nivel nacional y a nivel mundial. El problema descrito anteriormente, requiere de la implementación de medios de transporte

alternativos. El metro es un sistema subterráneo de transporte masivo y constituye una de las opciones que ayudaran a la reducción del flujo automovilístico. El metro constituye una carga no lineal y para su funcionamiento necesita de rectificadores e inversores, lo que probablemente significara la inyección de corrientes armónicas a la red de distribución.

La inserción de una carga de tracción al sistema de distribución puede ocasionar la inestabilidad de los parámetros que definen una buena calidad de energía, que son: niveles de voltajes, niveles de corrientes, niveles de potencias, factor de potencia. Por este motivo es necesario realizar estudios de flujos de potencia y de armónicos en diferentes condiciones para determinar los problemas presentes en el sistema eléctrico.

5.2. Formulación del problema

¿Cuál es el comportamiento del sistema eléctrico de los alimentadores primarios de 23/13.8 kV, debido al ingreso de un sistema de tracción?

6. OBJETIVOS:

6.1 Objetivo General

- Analizar los alimentadores primarios de 23/13.8 kV, por medio del modelado y simulación del sistema eléctrico, para entender de qué manera afecta el ingreso de un sistema de tracción metro.

6.2 Objetivos Específicos

- Realizar una revisión bibliográfica concerniente al funcionamiento de los sistemas eléctricos del transporte subterráneo conocido como metro.
- Determinar los problemas existentes de los alimentadores primarios en condiciones actuales y futuras de operación mediante el análisis de los datos obtenidos de simulaciones realizadas.
- Ejecutar estudios de armónicos en los alimentadores primarios considerando la incorporación del metro, con el propósito de analizar el impacto en la calidad del servicio y la posible necesidad de incorporar alternativas para mitigar las perturbaciones armónicas.

7. ACTIVIDADES Y SISTEMA DE TAREAS EN RELACIÓN A LOS OBJETIVOS PLANTEADOS:

Tabla 2: Áreas del conocimiento del proyecto

OBJETIVOS	ACTIVIDAD	RESULTADO DE ACTIVIDADES	DESCRIPCIÓN DE LA ACTIVIDAD
Objetivo 1: Realizar una revisión bibliográfica concerniente al funcionamiento de los sistemas eléctricos del transporte subterráneo conocido como metro.	Investigar la documentación necesaria que servirá para entender el funcionamiento del sistema eléctrico del metro	Datos obtenidos de un estudio preliminar del metro	Se realizará un análisis de los datos obtenidos para comprender el sistema de tracción metro
Objetivo 2: Determinar los problemas existentes de los alimentadores primarios en condiciones actuales y futuras de operación mediante el análisis de los datos obtenidos de simulaciones realizadas.	Recopilación de datos para la modelación y simulación en el software eléctrico.	Obtener las mediciones correspondientes para evaluar el estado de los alimentadores en condiciones actuales y futuras de operación del metro.	Simulación y análisis de flujos de potencia antes y después del ingreso del metro utilizando el software eléctrico EASY POWER.

<p>Objetivo 3: Ejecutar estudios de armónicos en los alimentadores primarios considerando la incorporación del metro, con el propósito de analizar el impacto en la calidad del servicio y la posible necesidad de incorporar alternativas para mitigar las perturbaciones armónicas.</p>	<p>Realizar un análisis técnico en base a los resultados obtenidos en los estudios de flujos de potencia y flujos de armónicos.</p>	<p>Determinar el nivel de contaminación armónica que implica la inserción del motor al sistema eléctrico.</p>	<p>Descripción de los elementos que son utilizados para mitigar los armónicos presentes en el metro</p>
--	---	---	---

8. FUNDAMENTACIÓN CIENTÍFICO TÉCNICA

8.1. Tracción eléctrica

La palabra tracción tiene relación directa con el arrastre, es decir, con la acción de provocar un movimiento en un determinado objeto, ya sea vertical u horizontal, cambiando su energía cinética. Si el cuerpo involucrado debe ser llevado desde A hasta B, su energía cinética debe ser alterada, y para esto se hace necesaria la acción de una fuerza que efectúe un trabajo sobre este cuerpo. En la figura 1 se muestra la situación anterior con la definición matemática del trabajo necesario para realizar dicho movimiento. [5]

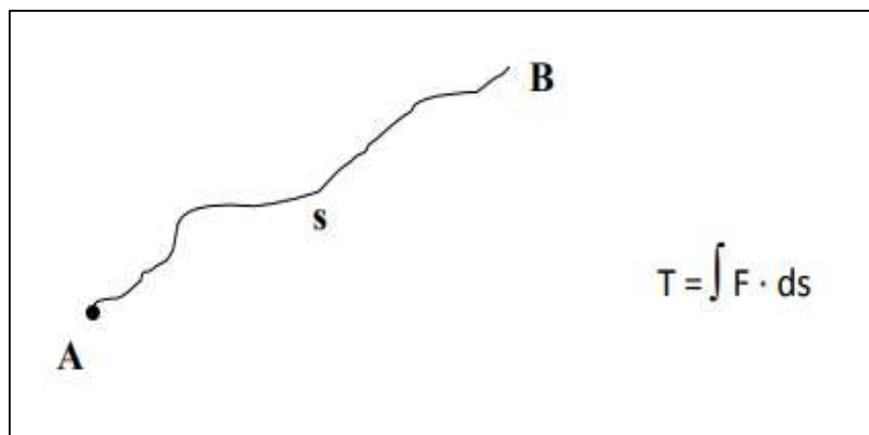


Figura 1: Esquema simplificado del sistema de alimentación del metro. [1]

8.2. Sistemas de Transporte eléctricos masivos

Los sistemas de transporte eléctrico son medios de transporte público de alta calidad orientados al usuario, que ofrecen movilidad urbana, rápida, confortable y de bajo costo. Estos sistemas de transporte se utilizan para desplazar grandes cantidades de personas en lapsos cortos, la finalidad de estos medios de transporte es desplazar grandes cantidades de personas en lapsos cortos y reemplazar la utilización de combustibles fósiles por sistemas que funcionan a base de energía eléctrica. Entre los principales sistemas de transporte eléctricos se puede mencionar a los siguientes:

- **El tranvía:** Es un medio de transporte de pasajeros que circula sobre rieles y por la superficie en áreas urbanas, en las propias calles, sin separación del resto de la vía ni senda o sector reservado
 - **El tren ligero:** Es un sistema de transporte que utiliza el mismo material rodante que el tranvía, pero que incluye segmentos parcial o totalmente segregados por el tráfico, con carriles reservados, vías apartadas y en algunos casos túneles en el centro de la ciudad
 - **El metro:** Es un sistema de transporte más rápido y con mayor capacidad que el tranvía o el tren ligero, pero no es tan rápido ni cubre distancias de largo alcance como el tren suburbano o de cercanías.
 - **El trolebús:** Es un ómnibus eléctrico, alimentado por una catenaria de dos cables superiores desde donde toma la energía eléctrica mediante dos astas. El trolebús no hace uso de vías especiales o rieles en la calzada, por lo que es un sistema más flexible. Cuenta con neumáticos de caucho en vez de ruedas de acero en rieles, como los tranvías.
- [9]

El sistema de transporte eléctrico utilizado en el presente estudio, es el metro por lo tanto se analizará todos los aspectos técnicos eléctricos de este sistema.

8.3. El metro

Se denomina Metro o ferrocarril metropolitano a los sistemas ferroviarios de transporte masivo de pasajeros que operan en las grandes ciudades para unir diversas zonas de su término municipal y sus alrededores más próximos, con alta capacidad y frecuencia, separados de otros sistemas de transporte, las redes de Metro se construyen frecuentemente de manera subterránea. En rigor, su línea es concebida como un medio de transporte alternativo frente a la congestión vial causada por el desarrollado tránsito vehicular y a los problemas de transporte público.

8.3.1. Definiciones relacionadas al metro.

- a) **Bogie:** Estructura o bastidor donde se acoplan fundamentalmente los ejes con el rodado, la suspensión y los motores de tracción
- b) **Fondo de saco:** Tramo donde se realiza el cambio de sentido del material móvil (retorno de trenes) durante las operaciones de transporte de pasajeros. Además, es considerado como el inicio del recorrido de las unidades.
- c) **Catenaria:** Elemento aéreo conformado por un perfil conductor de aluminio en el que se introduce el hilo de contacto que proporciona la energía eléctrica necesaria para la tracción del material móvil
- d) **Depósito:** Lugar donde se realiza el mantenimiento y estacionamiento del material móvil (trenes). [5]

8.3.2. Características de los trenes:

Un tren del Sistema Eléctrico del metro es impulsado con motores de inducción y el consumo estará dirigido al total de unidades (trenes). Las unidades pueden estar compuestas por seis coches ordenados de la siguiente manera: MC-R-S-S-R-MC [2] :

- MC: coche motor con cabina en extremo libre
- R: coche remolque intermedio sin cabina
- S: coche motor intermedio sin cabina

Además cada coche dispondrá de dos bogies convencionales, un bogie es la estructura donde se acoplan los ejes con el rodado, la suspensión y los motores de tracción. En el caso de ser bogie motorizado este contará con dos motores de inducción por bogie resultando en 16 motores de tracción por tren de acuerdo a la figura 2.

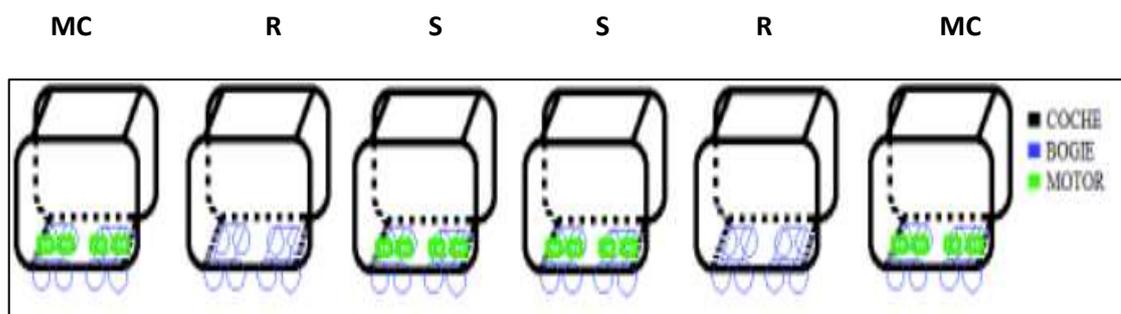


Figura 2: Constitución de un tren del SEM. [1]

8.3.3. Aspectos sobre alimentación eléctrica de sistemas ferroviarios de transporte urbano

Consideremos la figura 3, una fuente de energía (Subestación), una línea de contacto (catenaria), una locomotora que utiliza la corriente del circuito para alimentar a sus motores y poder realizar la tracción eléctrica y un conductor de retorno que cierra el circuito (los rieles).

En cuanto a la fuente de energía, esta será una subestación eléctrica, la cual efectuará una transformación, o sea, una conversión de corriente. Esta subestación que alimenta la línea de contacto estará a su vez alimentada por una línea de alta tensión, a partir de centrales generadoras o de subestaciones transformadoras.

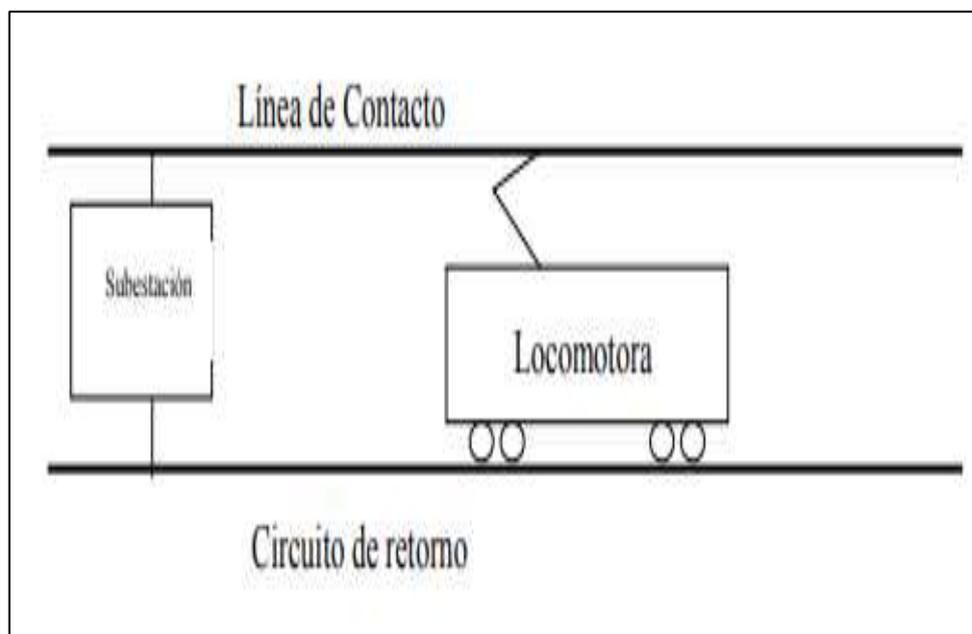


Figura 3: Circuito de tracción [5].

8.3.4. Funcionamiento del metro.

La selección, diseño y evaluación del tipo de alimentación en un proyecto de transporte eléctrico masivo como el Metro es de fundamental importancia, porque permite prever el impacto sobre la red de distribución eléctrica. El esquema simplificado del sistema de alimentación del Metro, se muestra en la figura 4. [5]

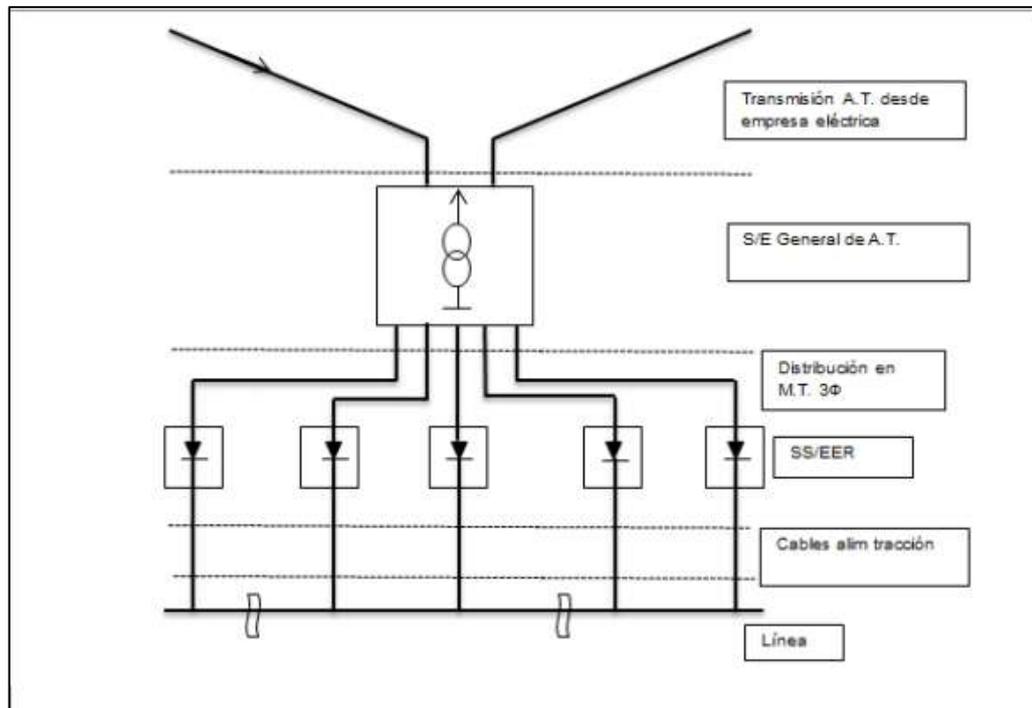


Figura 4: Esquema simplificado del sistema de alimentación del metro. [1]

A continuación se explicara de manera general el sistema de alimentación eléctrica utilizado por sistemas de transporte masivo tipo Metro, para alimentar los motores de tracción utilizados para mover los trenes.

8.3.5. Alimentación A.C.

El sistema eléctrico del Metro, parte con la compra de energía a la empresa eléctrica local en subestaciones generales de alta tensión las cuales proporcionarán la potencia eléctrica necesaria, en este lugar se transforma a niveles de tensión adecuados, para alimentar la carga de tracción que circule por la línea.

Luego ésta se distribuye en media tensión, a cada una de las subestaciones de rectificación a través del túnel, utilizando alimentadores por cada Subestación de rectificación, en general, para sistemas tipo Metro.

La configuración de las subestaciones generales de alta tensión puede ser de diferentes topologías; dependiendo de las características de cada instalación y las ubicaciones de las subestaciones disponibles por la empresa distribuidora. [9]

Entre las topologías más utilizadas se puede mencionar las siguientes:

1. Anillo abierto alimentado desde los extremos.

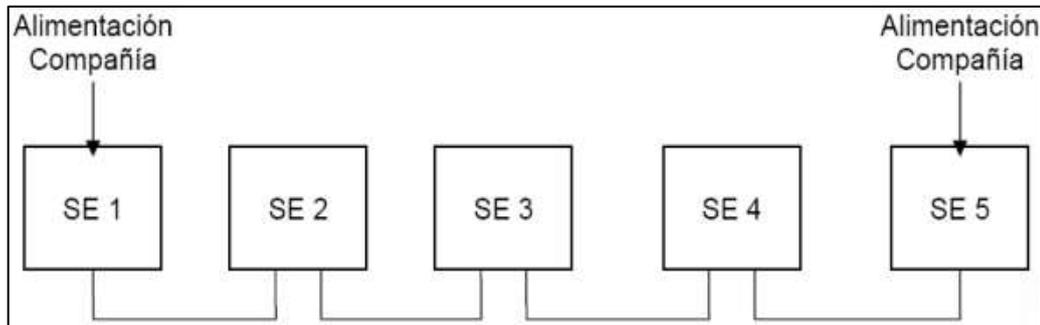


Figura 5: Anillo abierto alimentado desde los extremos [1]

2. Anillo cerrado alimentado desde tres puntos.

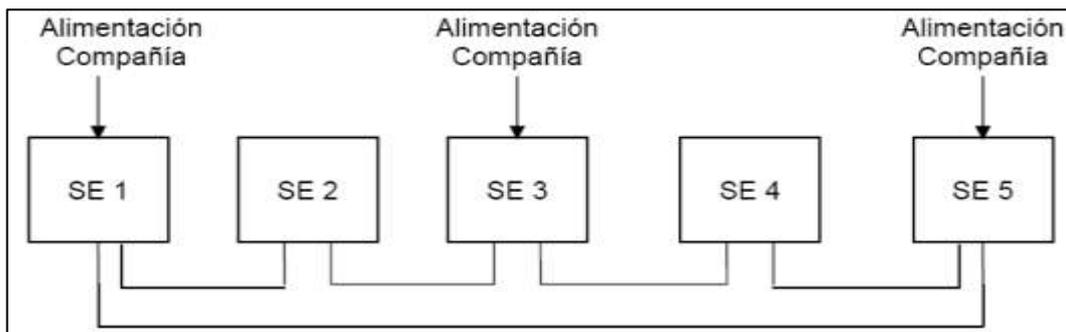


Figura 6: Anillo abierto alimentado desde los extremos [1]

3. Anillo abierto alimentado desde dos puntos.

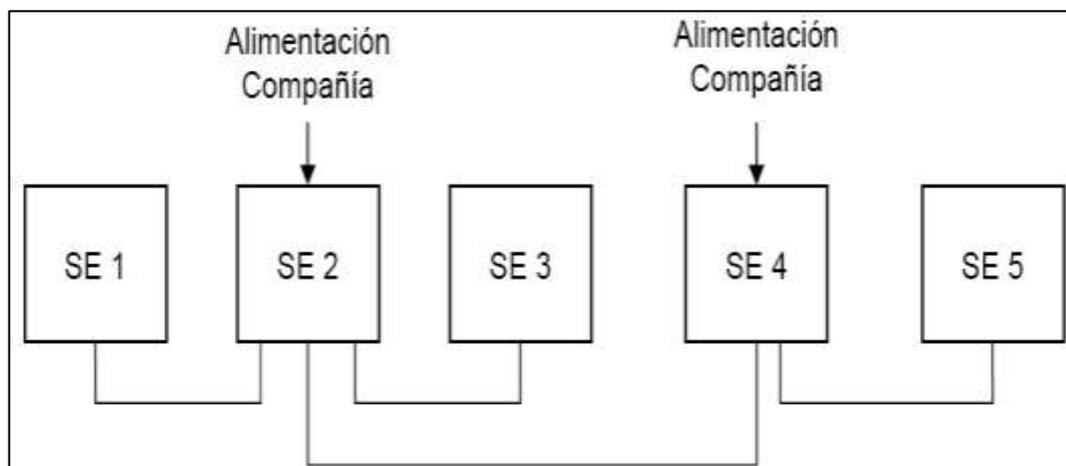


Figura 7: Anillo abierto alimentado desde los extremos.[1]

8.3.6. Subestación de Rectificación o de tracción.

En las subestaciones de rectificación, primero se baja el nivel de tensión a niveles apropiados para los rectificadores, del orden de 600 Vac, y luego gracias a los rectificadores se logra el voltaje de corriente continua nominal que posteriormente alimentará al tercer riel y luego a los motores de tracción eléctrica, que son los que darán la fuerza motriz necesaria para movilizar el tren.

La energía que consume todo el sistema de tracción se alimenta a través de un conjunto de subestaciones rectificadores AC/DC. Cada subestación suministra en un sector determinado una porción de la energía total requerida por el sistema.

Los factores más importantes en el diseño de estas redes es la confiabilidad y disponibilidad del suministro, razón por la cual cada sección debe conectarse a las secciones adyacentes para tener respaldo de alimentación eléctrica, en caso de presentarse algún tipo de falla en el sistema de alimentación principal, y de esta forma prevenir la ausencia de suministro eléctrico en las diferentes partes que conforman la línea. [12]

En la figura 8 se muestra el esquema de una conexión típica desde un par de subestaciones de alimentación adyacentes, donde se destacan los elementos principales que caracterizan cada subestación.

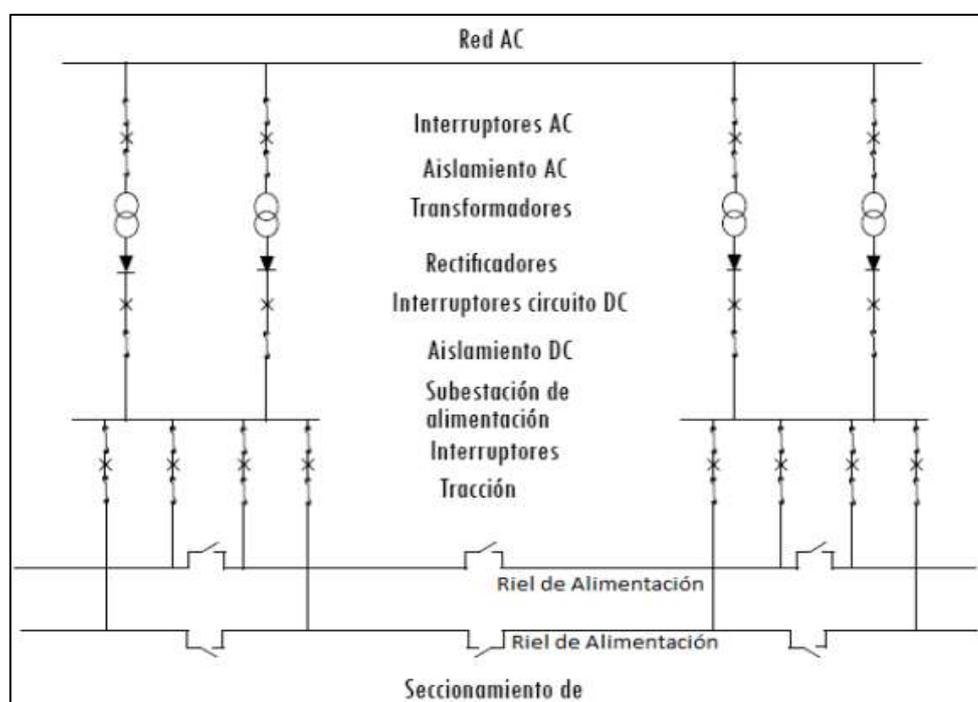


Figura 8: Esquema de Conexión típica entre subestaciones de tracción. [1]

8.3.6.1. Rectificación AC/DC

El procedimiento de rectificación se realiza por medio de puentes rectificadores de 6, 12, 24 o más pulsos. El rectificador más utilizado para transportes tipo Metro es el de 12 pulsos, el cual está conformado por un transformador de tres devanados, cuyos bobinados secundarios están conectados en estrella y el otro en delta, para producir un desfase de 30 grados, tal como lo muestra la figura 9. [12]

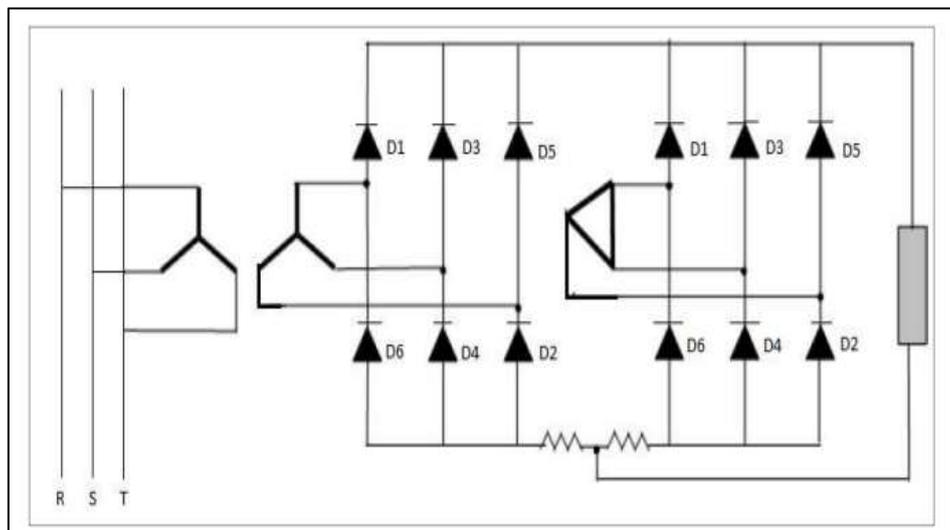


Figura 9: Rectificador de 12 pulsos

Fuente: [1]

8.3.6.2. Riel de Alimentación o barra guía.

Es el denominado tercer riel del Metro, es el encargado de llevar la energía necesaria hacia el motor, en corriente continua. Este sistema de conductor es ideal para Metros subterráneos y cuenta con la ventaja de estar poco expuesto a daños por condiciones atmosféricas y medioambientales, además es apto para trabajar hasta con un nivel de voltaje de 1 kV_{DC} .

8.3.6.3. Alimentación al motor.

Una vez rectificado el voltaje alterno, se conecta a la barra guía a través de cables de alimentación, la conexión del motor hacia la barra guía, se hace gracias a un brazo fijado al tren, y una zapata atada al brazo la cual permite el deslizamiento sobre esta barra.

La barra guía actúa como polo positivo y los rieles principales actúan como polo negativo, tal como lo muestra la figura 10, cerrando así el circuito de alimentación. [14]

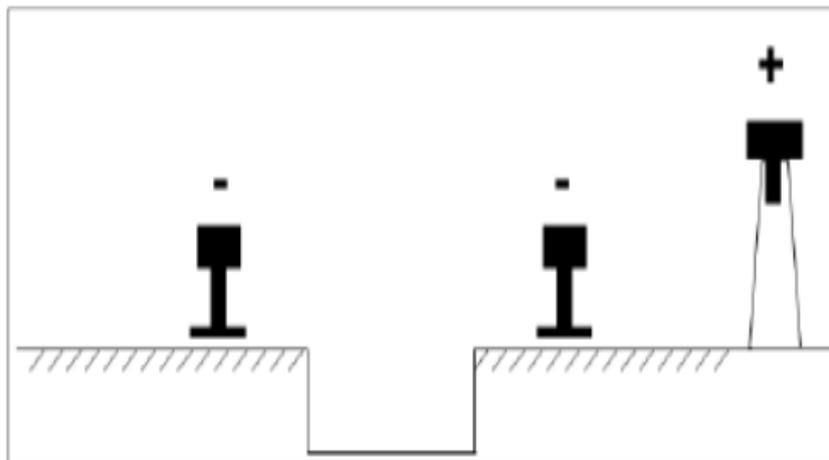


Figura 10: Circuito de alimentación DC. [1]

El motor eléctrico utilizado por los sistemas de transporte masivos, es un motor de inducción, esto se debe a que con el avance de la electrónica de potencia, el control de esta máquina se ha hecho cada vez más sofisticado y preciso, por lo cual ha consolidado el uso de estas máquinas para aplicaciones en tracción eléctrica. La corriente continua que proviene del tercer riel entra a un ondulator autónomo, el cual se encarga de realizar la conversión de corriente continua a alterna con la finalidad de que ésta pueda ser utilizada por el motor de inducción. [8]

El diagrama unifilar del ondulator autónomo más utilizado en los sistemas de transporte tipo Metro es como se muestra en la figura 11.

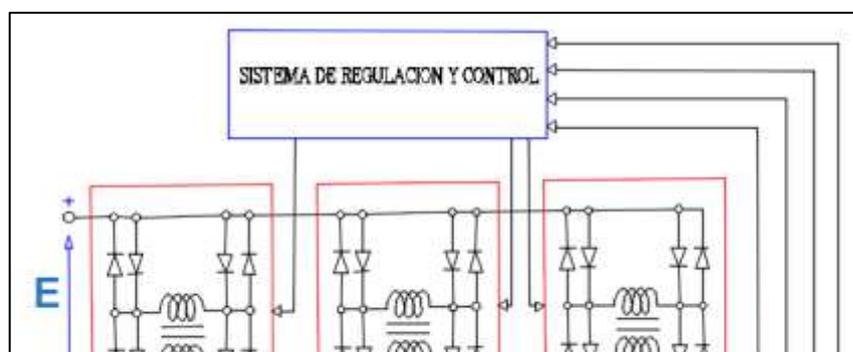


Figura 11: Diagrama unifilar del ondulator autónomo. [1]

Un ondulator autónomo es un convertidor estático con tiristores que permite la transformación de corriente continua a corriente alterna, cuando en el lado de alterna sólo hay receptores de energía, este ondulator, fija la frecuencia y la forma de onda de la tensión alterna suministrada a la carga. [13]

La ventaja de realizar este proceso es con el objetivo de proporcionar uno o varios voltajes alternos, para de esta manera se pueda variar la frecuencia de salida, y en algunos casos la relación de transformación continua-alterna, para así poder controlar la velocidad del tren.

8.4. Peso de trenes en vacío.

Los coches motores presentan las siguientes características técnicas que se indican en la tabla 3. Su velocidad promedio es de 80 km por hora, su longitud supera los 109 m. Cada tren dispondrá de 132 asientos, 22 por vagón. Cada tren tiene una capacidad máxima para 1500 pasajeros; con una vida útil de 35 años. La capacidad de los vagones es de 250 personas. [3]

Tabla 3: Características técnicas de los coches motores.

Dimensiones y pesos principales de los coches motores.	
Longitud total coche	17.125 mm
Distancia entre pivotes	11.060 mm
Distancia entre ejes	2.250 mm
Ancho de las cajas	2.710 mm
Altura total	3.890 mm
Ancho de la vía	1.435 mm

Peso de cada coche en vacío	47.025 kg.
-----------------------------	------------

Fuente: [3]

8.5.Transformadores de Tres devanados

Los transformadores de tres devanados por fases (monofásicas o trifásicas) se usan en aplicaciones en las que es conveniente interconectar tres circuitos independientes con voltajes nominales diferentes, las más importantes de las cuales son las siguientes:

1. Suministro de energía a un sistema de distribución importante a partir de dos sistemas de transmisión separados, que pueden ser de voltajes diferentes, para garantizar continuidad en el suministro (confiabilidad) en caso de que alguna de las líneas de alta tensión sufra alguna avería.
2. Los terceros armónicos nocivos que se presentan en los voltajes respecto al neutro en un transformador trifásico conectado en Y-Y se eliminan introduciendo un tercer devanado en cada fase y conectándolos en Δ , los cuales podrían suministrar energía a una carga local, tal como condensadores síncronos utilizados para regular el factor de potencia y, por tanto, la magnitud del voltaje
3. Cuando se subdivide la carga de un sistema de distribución grande en dos partes, cada una de ellas alimentada por un grupo independiente de devanados, se pueden reducir las corrientes de cortocircuito diseñando cada devanado secundario con una reactancia de fuga mayor, lo cual disminuye el tamaño y, por tanto el costo, de los interruptores de potencia.

Aunque la interconexión de tres circuitos independientes se puede hacer mediante dos transformadores de dos devanados por fase, la alternativa del transformador de tres devanados por fase suelen ser más económica y presentar menores pérdidas.

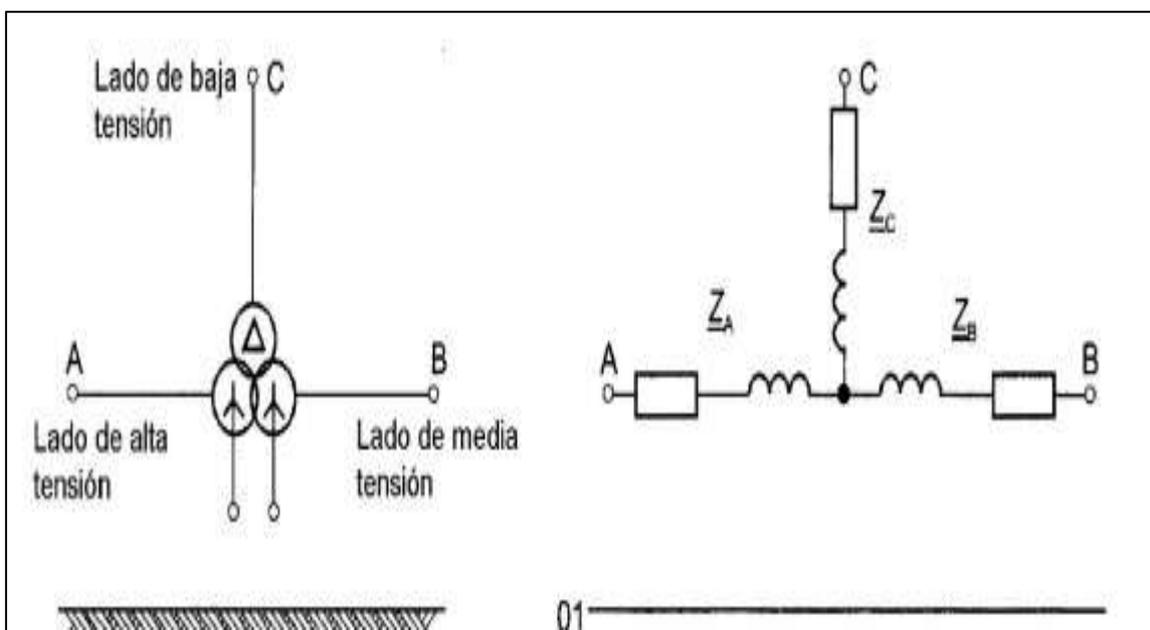


Figura 12: Transformador de tres devanados [1]**8.6. Parámetros de Calidad de energía.**

La supervisión y control del cumplimiento de los niveles de Calidad de Servicio, lo realizará el Consejo Nacional de Electricidad ARCONEL, a través de los límites que se establecen en la Regulación ARCONEL 005/18. Se han establecido métodos, regulaciones, leyes, penalizaciones, etc., que han tratado de regular el sector y han venido perfeccionando estos sistemas.

Para el presente proyecto de investigación se evaluara los parámetros de calidad de energía en los alimentadores principales antes y después del ingreso del metro, para el análisis se utiliza como referencia la regulación ARCONEL 005/18. Según la regulación, la Calidad del Producto comprende los siguientes aspectos [3]:

- Nivel de voltaje.
- Perturbaciones de voltaje.
- Factor de potencia
- Presencia de armónicos

Tabla 4: Parámetros de Calidad de Energía

ÍTEM	PARÁMETRO	NORMA O REFERENCIA			
1	VOLTAJE DE ESTADO ESTACIONARIO: Variaciones máximas permitidas en baja voltaje: Las variaciones de voltaje permitidas en condiciones normales de operación para redes	REGULACIÓN ARCONEL 004/01 Las variaciones de voltaje admitidas con respecto al valor del voltaje nominal se señalan a continuación: <table border="1" data-bbox="847 1921 1469 2020"> <tr> <td data-bbox="847 1921 1171 2020" style="text-align: center;">Nivel de Voltaje</td> <td data-bbox="1171 1921 1469 2020" style="text-align: center;">Rango admisible</td> </tr> </table>		Nivel de Voltaje	Rango admisible
Nivel de Voltaje	Rango admisible				

	de baja voltaje (menores a 1 kV) deben estar entre el 90% y el 110% del voltaje nominal, en periodos superiores a 1 minuto.	<table border="1"> <tr> <td>Alto Voltaje (Grupo 1 y Grupo 2)</td> <td>$\pm 5,0 \%$</td> </tr> <tr> <td>Medio Voltaje</td> <td>$\pm 6,0 \%$</td> </tr> <tr> <td>Bajo Voltaje</td> <td>$\pm 8,0 \%$</td> </tr> </table> <p>Los alimentadores, prevalece actualmente en medio voltaje por lo tanto la variación de voltaje no debe sobrepasar del $\pm 6,0 \%$</p>	Alto Voltaje (Grupo 1 y Grupo 2)	$\pm 5,0 \%$	Medio Voltaje	$\pm 6,0 \%$	Bajo Voltaje	$\pm 8,0 \%$
Alto Voltaje (Grupo 1 y Grupo 2)	$\pm 5,0 \%$							
Medio Voltaje	$\pm 6,0 \%$							
Bajo Voltaje	$\pm 8,0 \%$							
2	ARMÓNICOS Contenido de Armónicos de las Ondas de Voltaje y Corriente (Límites de Distorsión Armónica) depende del voltaje en el que se esté trabajando	NORMA IEC 519 Para efectos de armónicos de corriente y armónicos de voltaje.						
3	FRECUENCIA Variaciones máximas permitidas en frecuencia: La frecuencia nominal del SIN es 60 Hz y su rango de variación de operación está entre 59.8 y 60.2 Hz en condiciones normales de operación.	REGULACIÓN ARCONEL 005/18 Para efectos de regulación de calidad Del servicio eléctrico.						
5	FACTOR DE POTENCIA: El factor de potencia inductivo de las instalaciones deberá ser igual o superior a 0.92.”	REGULACIÓN ARCONEL 005/18 Para efectos de regulación de calidad Del servicio eléctrico. Establece el límite en 0,92.						

Fuente: [3]

8.6.1. Calidad de Voltaje.

Se determina a la calidad de voltaje como las variaciones de los valores eficaces (rms), medidos cada 10 minutos, con relación al voltaje nominal en los diferentes niveles. No

cumple con el nivel de voltaje en el punto de medición cuando el 5% o más de los registros durante del período de medición de 7 días continuos, no se encuentren dentro de los límites de voltaje admitidos con respecto al valor del voltaje nominal como se señala [10]

$$\Delta V_K(\%) = \frac{V_k - V_n}{V_n} * 100$$

(1)

Donde:

ΔV_K = variación de voltaje, en el punto de medición, en el intervalo k de 10 minutos.

V_k = voltaje eficaz (rms) medido en cada intervalo de medición k de 10 minutos.

V_n = voltaje nominal en el punto de medición.

Los niveles de voltaje dependen del nivel de voltaje, para las subestaciones principales que alimentaran al metro, tienen un nivel de voltaje de 23 kV a 13.8 kV, este nivel de voltaje corresponde a medio voltaje. En la tabla 4 se señala los límites para el índice de nivel de voltaje, con los respectivos rangos admisibles.

8.6.2. Factor de Potencia

Indica que el factor de potencia es un término utilizado para describir la cantidad de energía eléctrica convertida en trabajo, el valor ideal es de 1, indicando que toda la energía consumida ha sido transformada en trabajo, pero si el factor de potencia es menor entonces significa un mayor consumo de energía para producir trabajo.

Tabla 5: Límites para el índice de nivel de voltaje.

Nivel de Voltaje	Rango admisible
Alto Voltaje (Grupo 1 y Grupo 2)	± 5,0 %
Medio Voltaje	± 6,0 %
Bajo Voltaje	± 8,0 %

Fuente: [10]

8.7. Perturbaciones armónicas

8.7.1. Distorsión Armónica.

La distorsión armónica en un sistema eléctrico es causada principalmente por la conexión de dispositivos y cargas no lineales, donde la corriente no es proporcional al voltaje aplicado. En la figura 13 se ilustra este concepto ya que al aplicar un voltaje sinusoidal a un resistor no lineal el voltaje y la corriente variarán según la curva mostrada, es decir que una pequeña variación en el voltaje puede provocar grandes aumentos de corriente, además se observa que mientras el voltaje aplicado es perfectamente sinusoidal la corriente resultante es distorsionada debido al elemento no lineal. [8]

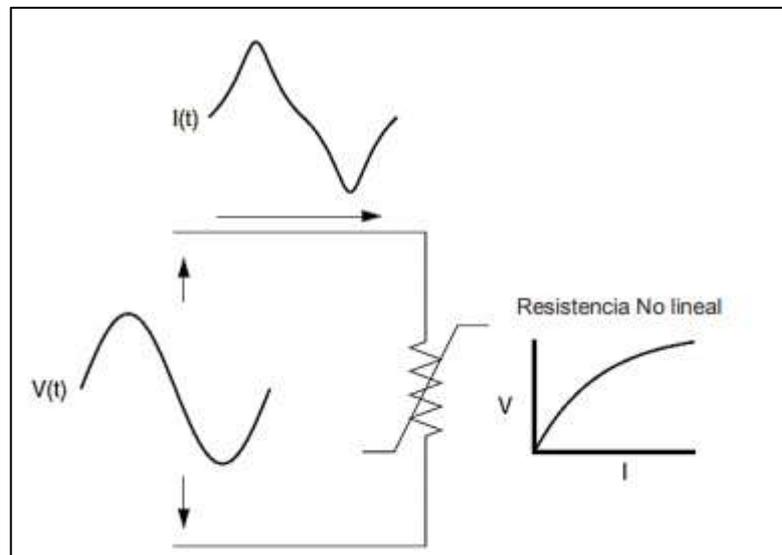


Figura 13: Distorsión de corriente causada por elemento no lineal [1]

En la Figura 14 se muestra que cualquier forma de onda distorsionada y periódica se puede representar como la suma de ondas sinusoidales puras, llamadas Series de Fourier, donde la frecuencia de cada senoide es un múltiplo entero de la frecuencia fundamental de la onda distorsionada. Estas sinusoides de frecuencia múltiplos enteros de la fundamental se denominan armónicos de la fundamental.

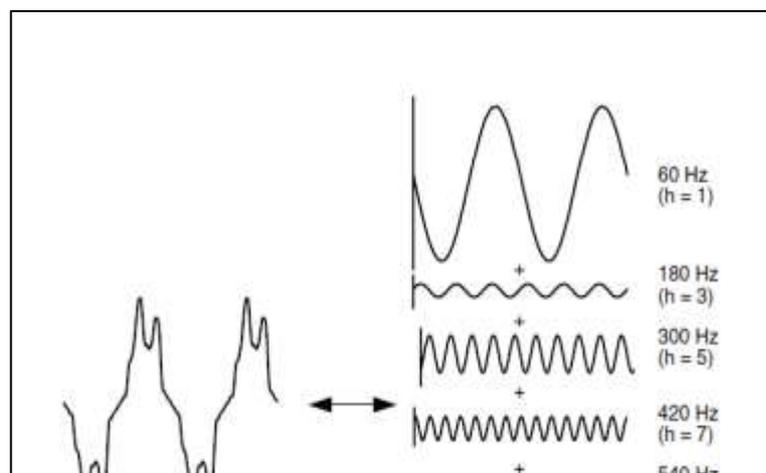


Figura 14: Representación de las series de Fourier de una onda distorsionada. [1]

La distorsión armónica se considera un tipo de contaminación eléctrica que puede causar un mal funcionamiento de algunos equipos si supera ciertos límites. La corriente armónica se especifica con una frecuencia en múltiplos de la frecuencia base. Por ejemplo, una corriente de 300 Hz en una red de 60 Hz es el quinto armónico. La corriente de Hz verá una distorsión de 300 Hz de su suministro de voltaje que podría ser perjudicial para los otros componentes del sistema. De acuerdo con la Comisión Electrotécnica Internacional (iec), el nivel de armónicos se describe en un solo parámetro mediante la distorsión armónica total (thd), que es la suma de la distorsión en todas las frecuencias, y se expresa como un porcentaje de la tensión o corriente total en la frecuencia base (60 Hz o 50 Hz). [5]

8.7.2. Contaminación de armónicas en sistemas de tracción.

El empleo de dispositivos de electrónica de potencia se traduce en la presencia de corrientes y voltajes armónicos, los que pueden alcanzar valores significativos en algunos puntos si se considera que eventualmente puede haber resonancias a causa de los elementos capacitivos de la red (condensadores, cables, etc.).

Las corrientes y voltajes armónicos tienen efectos no deseados sobre los diversos elementos y equipos que se conectan al sistema, tales como deterioro de las aislaciones, elevación de pérdidas Joule y magnéticas, falsa operación de protecciones, torques armónicos en máquinas rotatorias, etc., que en la mayoría de los casos se traducen en una reducción de la vida útil del equipo con respecto al caso de alimentación sinusoidal sin armónicas. [9]

En sistemas de tracción, el caso más frecuente es el de los rectificadores trifásicos tipos puente, los cuales forman parte de las subestaciones de rectificación. Los rectificadores, por

su característica no lineal, inyectan corrientes armónicas a la red, distorsionando el voltaje y produciendo efectos no deseados en los equipos conectados a ésta.

8.7.3. Variadores

Un variador de c.a. es un dispositivo utilizado para controlar la velocidad de rotación de un motor c.a. o de inducción. Este tipo de motores también se conocen como motores asíncronos o en jaula de ardilla. La velocidad de rotación del motor se rige por la frecuencia de la corriente de alimentación aplicada. Por lo tanto, la mejor manera de controlar la velocidad del motor consiste en controlar la frecuencia de corriente aplicada. [17].

$$\text{Velocidad} = \frac{120 \times f}{p}$$

(2)

Donde:

f = frecuencia

p = número de polos.

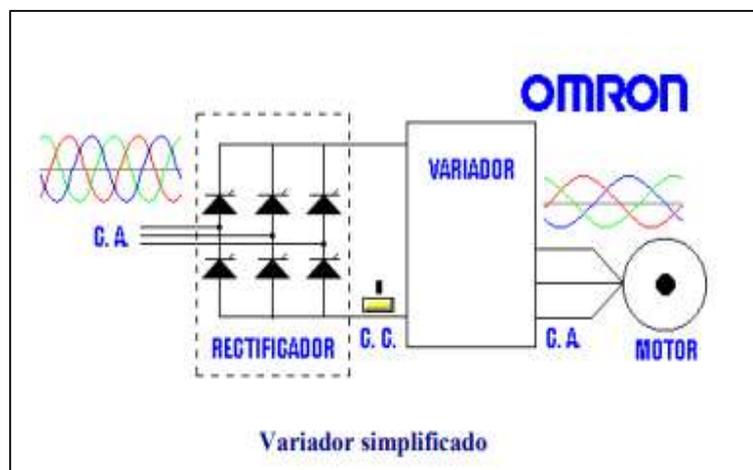


Figura 15: Variador simplificado [17].

8.7.3.1. Rectificadores

Esta parte incluye 4 o 6 diodos, en función de si se trata de un variador de entrada monofásico o trifásico, que rectifican la frecuencia fijada del voltaje de entrada que se suministra al enlace de c.c. Una de las principales aplicaciones de los rectificadores hexafásicos, son en los sistemas ferroviarios, específicamente en las subestaciones de tracción que son las encargadas de reducir el nivel de voltaje, para luego rectificarlo. En la figura 15 se muestra el esquema básico de una subestación de tracción conformada por un rectificador hexafásico y

un transformador trifásico con conexión Dy, donde al lado de alto voltaje se conecta a la red de distribución y en el lado de bajo voltaje el puente rectificador [3].

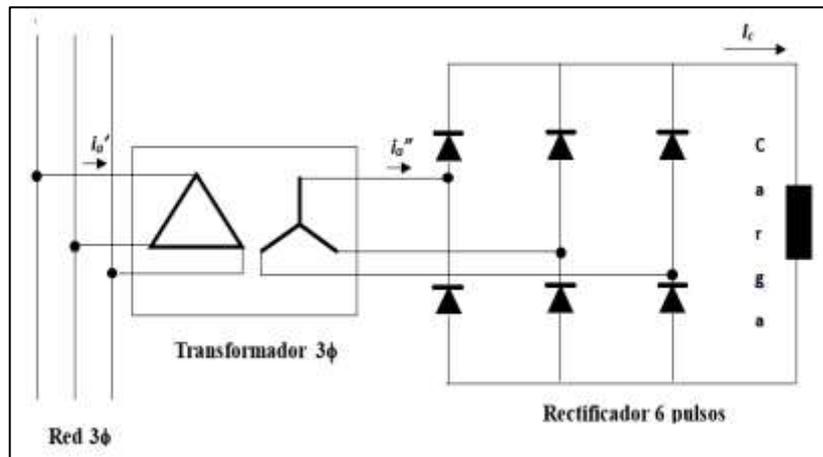


Figura 16: Subestación de tracción con rectificador hexafásico [6].

➤ 6 o 12 Pulsos

Los efectos de la frecuencia de alimentación conocidos como 'armónicos' son producto del variador cuando éste obtiene corriente de la red eléctrica. Los armónicos distorsionan el suministro de alimentación y pueden tener efectos adversos sobre los equipos que utilizan el mismo suministro. Una manera de combatir esta distorsión consiste en reducir los efectos armónicos del suministro. Para ello es preciso duplicar el número de veces que se obtiene corriente del suministro y, por lo tanto, también reducir la corriente obtenida por cada pulso.

De este modo se "nivela" la corriente extraída y, con ello, el contenido armónico de la línea de suministro. Este método de gestión de la calidad de la alimentación eléctrica se conoce como control de 12 pulsos. El variador normal de 6 pulsos consta de 6 elementos rectificadores (dos por fase: uno para el medio ciclo positivo y otro para el medio ciclo negativo).

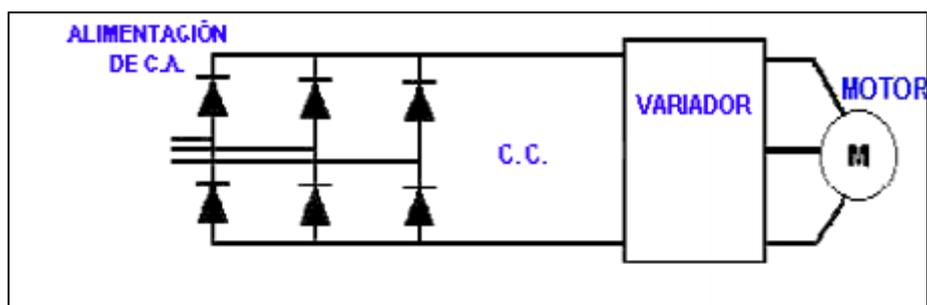


Figura 17: Variador de 6 pulsos [17].

El variador que utiliza el control de 12 pulsos consta de dos unidades de rectificación con 6 elementos rectificadores cada una (12 en total); la segunda unidad se conecta mediante un transformador de desplazamiento de fase. [17].

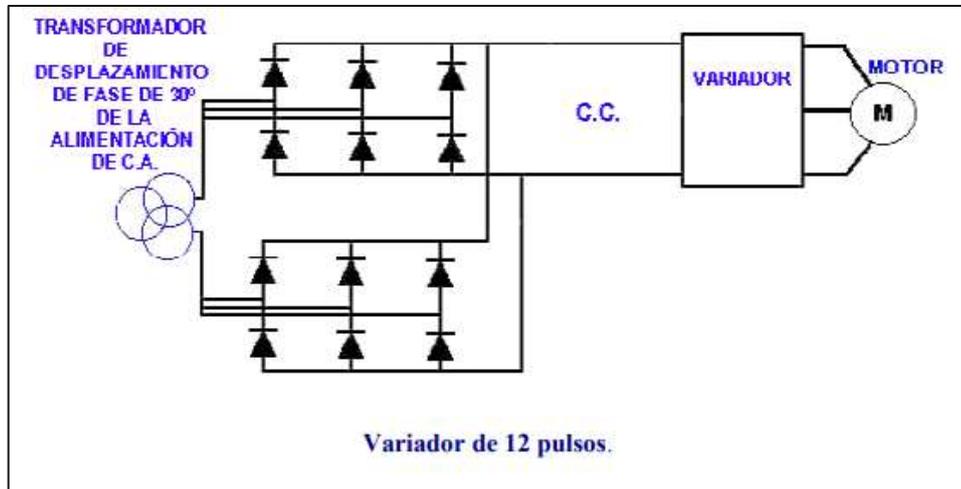


Figura 18: Variador de 12 pulsos [17].

El resultado sobre la corriente de entrada es visible cuando se utiliza el control de 12 pulsos

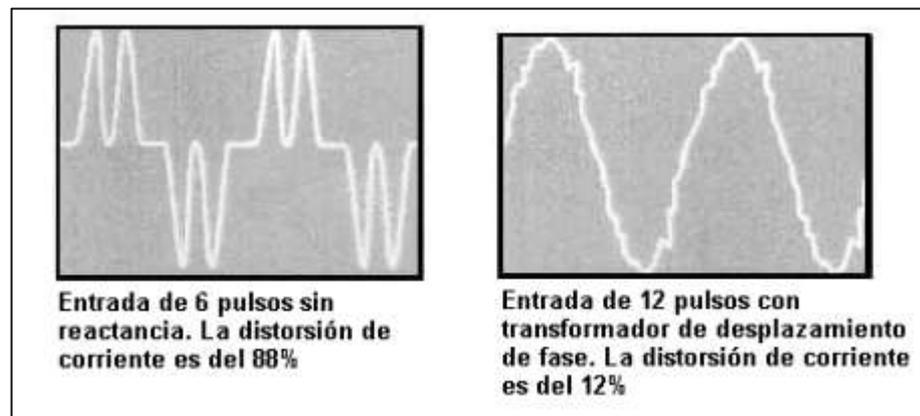


Figura 19: Salida de corriente [17].

Al igual que la configuración de 12 pulsos, se pueden acoplar reactancias en la entrada de la red eléctrica del variador, o del enlace de c.c., para reducir la distorsión global, tal como se muestra en las ilustraciones.

De esta forma el rectificador se puede considerar como una fuente de corriente de armónicas que son inyectadas a la red. El efecto en voltajes armónicos que produce cada una de ellas se puede evaluar resolviendo el circuito armónico respectivo. La resolución de los circuitos armónicos permite encontrar en cualquier punto de la red, las corrientes armónicas y los

voltajes armónicos que aparecen. Esta información es fundamental para poder estimar el efecto que estas armónicas tendrán en la operación del equipo que se conecta en dicho punto. [14]

Continuando con la aplicación de los rectificadores en los sistemas ferroviarios, en la actualidad se está implementando el uso de rectificadores dodecafásicos (12 pulsos), con el objetivo de reducir el impacto armónico provocado y mejorar el voltaje de salida DC. En la figura 16 se indica el esquema básico de una subestación de tracción con un rectificador dodecafásico la cual esta conformada por dos rectificadores hexafásicos y un transformador tridevanado con conexión Ddy, donde al lado de alto voltaje se conecta a la red de distribución y a sus dos secundarios se conectan los puentes rectificadores [3].

Este rectificador debe su nombre al hecho de que, en un período de la tensión de alimentación, genera 12 pulsos en el voltaje de la carga. A través de esta conexión, es factible obtener más potencia en la carga, menos armónicas en la tensión de la carga y menos armónicas en las corrientes de entrada. Las corrientes de entrada de los rectificadores de 6 pulsos con transformador en estrella y delta tienen las armónicas 5 y 7 con signos cambiados. Por esta razón, al sumar ambas corrientes, estas armónicas se eliminan. Lo mismo sucede con las armónicas 17 y 19 tal como se observa en la figura 20.

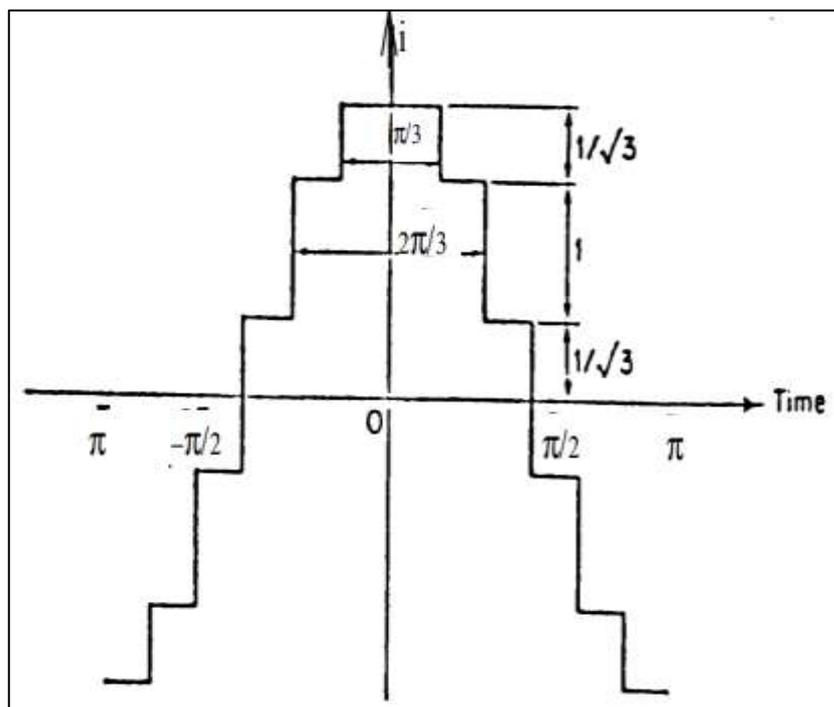


Figura 20: Espectro de frecuencias en un rectificador de 12 pulsos [6].

Se presenta a continuación en la figura 21 la configuración típica de un rectificador de 12 pulsos utilizada para amplificar voltaje en la carga (conexión en serie de los rectificadores puente de 6 pulsos) con secundarios del transformador en delta - Y.

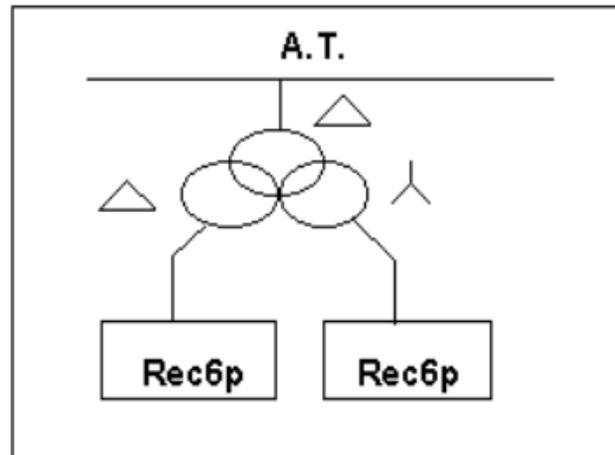


Figura 21: Modelo de un rectificador de 12 pulsos [6].

Actualmente se usan transformadores rectificadores de 12 pulsos. Consiguen disminuir el rizado de la tensión y con ello el nivel de armónicos. Para las instalaciones con potencias iguales o mayores a 3 MW, el grupo transformador rectificador posee un primario que se conecta en triángulo a la red de Alta Tensión, y dos secundarios, uno en triángulo y otro en estrella. De esta forma se consigue un desfase de 30° entre las tensiones y una pulsación dodecafásica ($12 \times 30 = 360^{\circ}$).

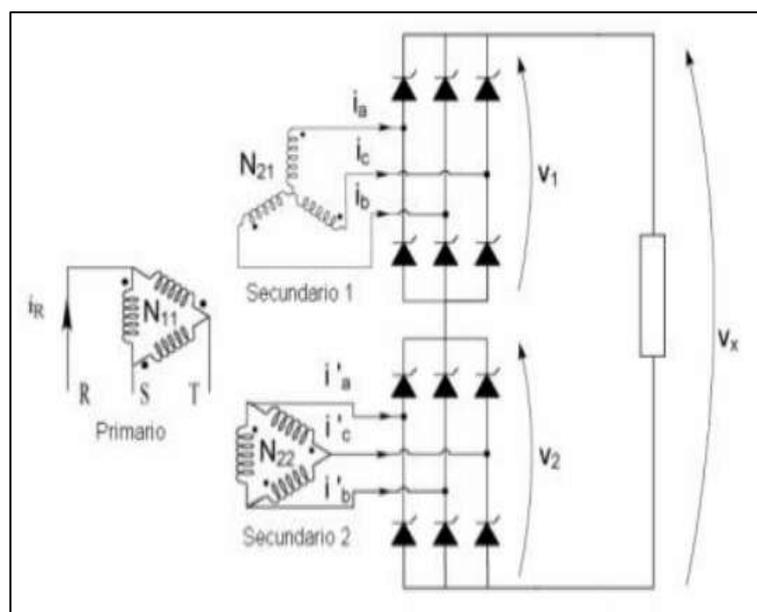


Figura 22: Rectificador de 12 pulsos en serie [5].

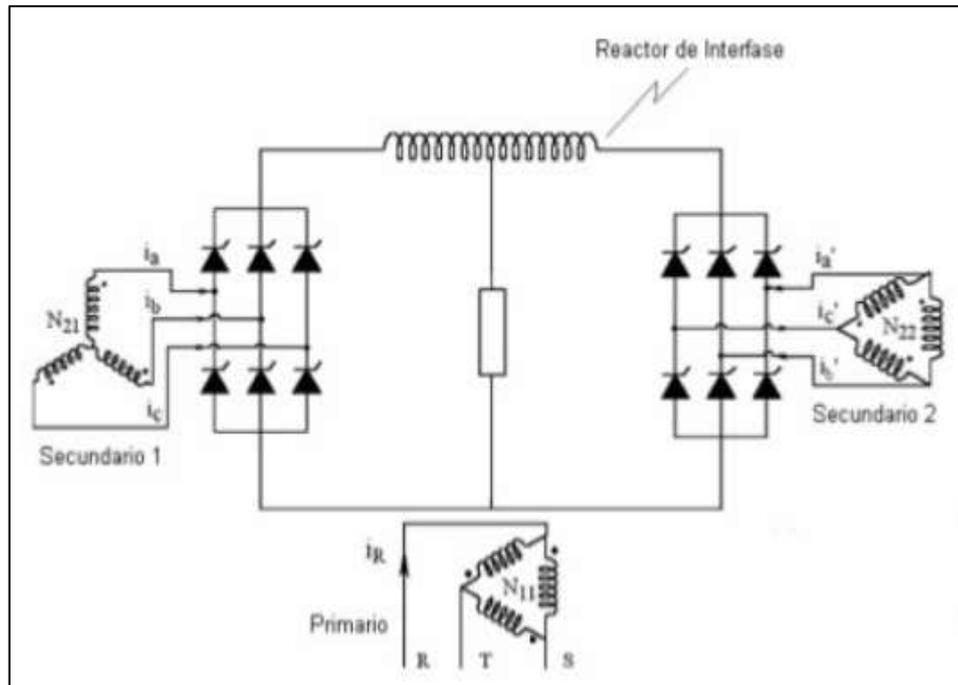


Figura 23: Rectificador de 12 pulsos en paralelo [5]

Los rectificadores que forman estas subestaciones están formados por diodos de silicio. Son de altas prestaciones pues deben estar preparados para soportar elevadas tensiones inversas y conducir grandes corrientes. Además, a la salida de los rectificadores suelen colocarse filtros en paralelo. Estos dispositivos, formados por una bobina y un condensador en serie, anulan los armónicos que aparecen a la salida del rectificador y que podrían producir perturbaciones en los cables de comunicación. [4]

Para evitar los efectos secundarios desafortunados de los reactores de CA o CC en instalaciones donde existen altos requisitos para la reducción de la distorsión armónica, se ha convertido en la norma en ciertos mercados el uso de controladores de 12 pulsos. Estos controladores están formados por dos rectificadores de 6 pulsos y un transformador de cambio de fase frente a uno de los rectificadores o un transformador de tres devanados frente al rectificador combinado

Su diseño proporciona un excelente rendimiento armónico. Las corrientes armónicas 5 y 7 se cancelan casi por completo. Los dos rectificadores y un transformador de cambio de fase y un reactor de interfaz (como se indica en la figura 24) o un transformador de tres devanados. Los rectificadores de 12 pulsos tienen la ventaja del equilibrio de la carga que es importante para el rendimiento, ya que el rendimiento mejorado es el resultado de la cancelación de la corriente de 5 y 7 armónicos. [8]

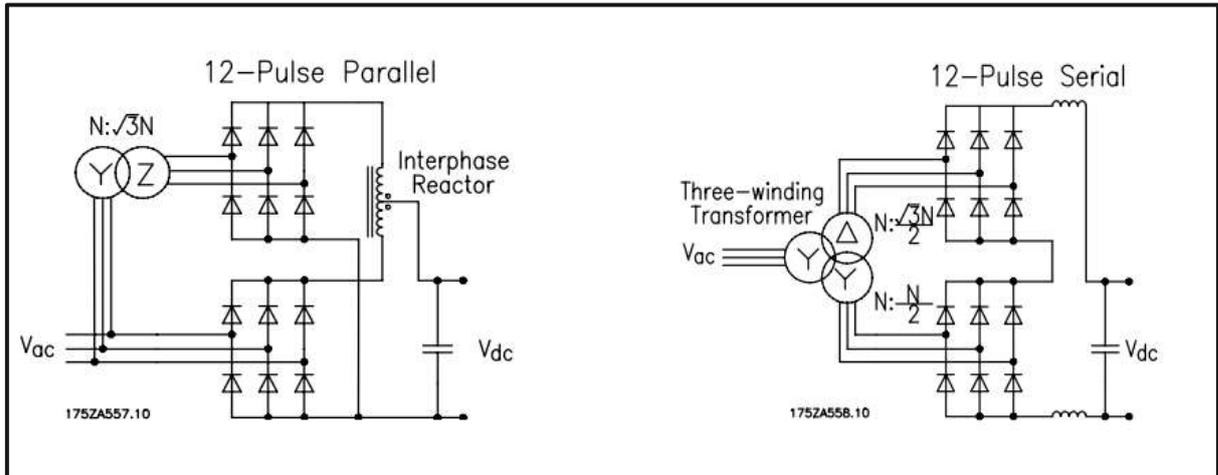


Figura 24: Rectificador de 12 pulsos en paralelo y en serie [8]

Cuando la carga no está equilibrada, los armónicos de los controladores con carga alta no se cancelan. Esto se debe a que toda la base para la cancelación es que los vectores actuales son de igual amplitud y que el ángulo entre ellos es 180° . El ángulo se mantiene mediante el transformador de cambio de fase, pero la amplitud varía a medida que la carga disminuye. Cuando la carga solo disminuye en uno de los controladores, la longitud de los vectores se vuelve inigualable y no se logra la cancelación total.

Los armónicos teóricos de corriente de entrada para circuitos rectificadores son una función del número de impulsos y pueden ser expresado como:

$$h=(np \pm 1) \text{ cuando } n=1,2,3,\dots \text{ y } p=\text{número del pulso}$$

(3)

Para un rectificador de seis pulsos, la corriente de entrada tendrá componentes armónicos en los siguientes múltiplos de la frecuencia fundamental.

$$5, 7, 11, 13, 17, 19, 23, 25, 29, 31, \text{ etc.}$$

Para el sistema de doce pulsos, la corriente de entrada tendrá un armónico teórico con componentes en los siguientes múltiplos de la frecuencia fundamental:

$$11, 13, 23, 25, 35, 37, \text{ etc.}$$

Tenga en cuenta que los armónicos 5 y 7 están ausentes en el sistema de doce pulsos. Dado que la magnitud de cada armónico es proporcional al recíproco del número de armónicos, el sistema de doce pulsos tiene una menor Distorsión teórica armónica de la corriente. [9]

8.7.4. Análisis Directo

La distribución de armónicos de tensión y corriente en una red de alimentación lineal. La contención de una o más fuentes de corriente armónicas se lleva a cabo normalmente utilizando análisis nodales. La asimetría inherente a los sistemas de transmisión no puede ser estudiada con cualquier simplificación utilizando el marco de referencia del componente simétrico, por lo tanto se utilizan componentes de fase. [7]

La asimetría inherente a los sistemas de transmisión no puede ser estudiada con cualquier simplificación utilizando el marco de referencia del componente simétrico, por lo tanto se utilizan componentes de fase.

La matriz de la admitancia nodal de la red con la frecuencia f es de la forma.

$$[Y_f] = \begin{bmatrix} Y_{11} & Y_{12} & Y_{1i} & Y_{1k} & Y_{1n} \\ Y_{21} & Y_{22} & Y_{2i} & Y_{2k} & Y_{2n} \\ Y_{i1} & Y_{i2} & Y_{ii} & Y_{ik} & Y_{in} \\ Y_{k1} & Y_{k2} & Y_{ki} & Y_{kk} & Y_{kn} \\ Y_{n1} & Y_{n2} & Y_{ni} & Y_{nk} & Y_{nn} \end{bmatrix}$$

Donde Y_{ki} es la admitancia mutua entre barras k y i con frecuencia f , y Y_{ii} es el auto admisión de barras colectoras en una frecuencia f . Se genera una matriz de admisión de sistema separada para cada frecuencia de interés.

La principal dificultad es determinar qué modelo representa mejor los diversos componentes del sistema, a la frecuencia requerida y obtener los parámetros adecuados para ellos. Con esta información, es sencillo construir el sistema fundamental y armónico con matrices de admitancia de frecuencia.

8.7.5. Distorsión de voltaje y distorsión de corriente

Tener un problema en el funcionamiento de los dispositivos debido a la presencia de armónicos en un sistema, puede significar alguna de las siguientes premisas:

- Los voltajes armónicos son demasiado grandes, es decir se tiene un voltaje muy distorsionado, provocando que el control de los ángulos de disparo en los dispositivos no sea el correcto.
- La presencia de corrientes armónicas demasiado grandes presentes en dispositivos de suministro de energía como un transformador, ocasionan que estos operen a una menor capacidad de su potencia nominal.

- La presencia de grandes corrientes armónicas producidas por un dispositivo, tendrá como efecto la aparición de grandes voltajes armónicos en el sistema.

De acuerdo a las premisas mencionadas anteriormente, se determina que pueden existir diferentes causas y efectos en la aparición de voltajes y corrientes armónicas, así como una relación entre ellos.

La presencia de cargas no lineales conectadas en derivación provocará la inyección de corrientes armónicas en el sistema eléctrico, esto conlleva a pensar que para la mayoría de análisis será suficiente tratar estas cargas simplemente como fuentes de corriente [5].

8.7.6. Índices de armónicos

Los índices más usados para la medición del contenido armónico de una forma de onda son: voltaje armónico relativo, corriente armónica relativa, distorsión armónica total y distorsión total de la demanda de armónicos de corriente (TDD). Todos estos índices se calculan a partir de las componentes fundamental y armónicas en valor eficaz de una onda que puede ser de voltaje o corriente. [8]

8.7.6.1. Corriente y Voltaje Armónico Relativo

Es la relación porcentual entre el valor eficaz del armónico de orden h y el valor eficaz de la componente fundamental. Este se define mediante las siguientes ecuaciones:

$$I_h = \frac{I_{h \text{ rms}}}{I_1 \text{ rms}} \times 100\% \quad (4)$$

$$V_h = \frac{V_{h \text{ rms}}}{V_1 \text{ rms}} \times 100\% \quad (5)$$

8.7.6.2. Distorsión Armónica total.

La Distorsión Armónica Total THD es una medida del valor eficaz de las componentes armónicas con respecto a la fundamental de una onda distorsionada de voltaje o corriente; proporciona una medida porcentual del contenido armónico presente en la onda distorsionada. Este índice se calcula mediante la siguiente expresión:

$$THD_I = \frac{\sqrt{\sum_{h>1}^n I_h^2}}{I_1} = \frac{\sqrt{I_2^2 + I_3^2 + I_4^2 + \dots + I_n^2}}{I_1} \times 100\% \quad (6)$$

$$THD_V = \frac{\sqrt{\sum_{h>1}^n V_h^2}}{V_1} = \frac{\sqrt{V_2^2 + V_3^2 + V_4^2 + \dots + V_n^2}}{V_1} \times 100\% \quad (7)$$

8.7.6.3. Límites de distorsión de Voltaje

Es importante notar que la definición de la distorsión armónica total THD que se utiliza es diferente a la convencional ya que se expresa la distorsión en función al voltaje nominal, que es un valor constante para cada usuario, estableciéndose así, una base fija de evaluación a lo largo del tiempo. Para el estudio de la distorsión armónica de voltaje, en este proyecto de investigación se toma como referencia la norma IEEE 519 – 1992.

Tabla 6: Límites de la distorsión armónica de voltaje para sistemas de distribución según la norma IEEE.

Tensión	Distorsión armónica de tensión individual %	Distorsión de tensión total, THD [V _n]%
$U \leq 69 \text{ kV}$	3.0%	5.0%
$69 \text{ kV} < U \leq 161 \text{ kV}$	1.5%	2.5%
$U > 161 \text{ kV}$	1.0%	1.5%

Fuente: [2]

8.7.6.4. Límites de Distorsión de Corriente

Las corrientes armónicas para cada usuario son evaluadas en la acometida y los límites se establecen en base a la relación entre la corriente de cortocircuito y demanda máxima de corriente de la carga del usuario.

Para el estudio de la distorsión armónica de corriente, en este proyecto de investigación se toma como referencia la norma IEEE 519 – 1992.

a) Distorsión Total de Demanda

TDD es la distorsión armónica basada en la máxima corriente de demanda (componente fundamental). Es una medida de la distorsión armónica total de la corriente en el PCC (punto de conexión común) para la carga total conectada

b) Relación de Corriente de Cortocircuito a la Corriente de Carga $\frac{I_{sc}}{I_{L1}}$

Es la medida de la relación de corriente de cortocircuito disponible en el PCC a la máxima corriente de carga en el mismo punto. Esto es una medida de la rigidez del sistema eléctrico relativo a la carga.

c) Contenido armónico de corriente

Se calcula sobre la base de índices que consideran el porcentaje de contenido armónico individual en la onda de corriente y el valor del TDD (Factor de Distorsión Total de la Demanda) de la carga conectada por los Agentes en los puntos de conexión. Para efectos de esta Regulación, se consideran las armónicas comprendidas entre la 2° y la 30°, incluyendo las mismas

d) Límites

Los valores límites de contenido armónico, de TDD y más procedimientos para aplicación de límites, se regirán a lo indicado en la guía IEEE 519 Control armónico. Una tabla con los límites señalados en esa guía se indica a continuación [2]:

Tabla 7: Límites de inyección de corriente armónico según la IEEE 519 – 1992.

Sistemas de distribución (120 V – 69 kV)						
$\frac{I_{sc}}{I_L}$	Tasa individual admisible en relación a I_L (%)					TDD (%)
	$h < 11$	$11 \leq h < 17$	$17 \leq h < 23$	$23 \leq h < 35$	$35 \leq h$	
< 20 ⁽¹⁾	4.00	2.00	1.50	0.60	0.30	5.00
20 – 50	7.00	3.50	2.50	1.00	0.50	8.00
50 – 100	10.00	4.50	4.00	1.50	0.70	12.00
100 – 1000	12.00	5.50	5.00	2.00	1.00	15.00
> 1000	15.00	7.00	6.00	2.50	1.40	20.00
Sistemas de distribución (69 kV – 161 kV)						
< 20 ⁽¹⁾	2.00	1.00	0.75	0.30	0.15	2.50
20 – 50	3.50	1.75	1.25	0.50	0.25	4.00
50 – 100	5.00	2.25	2.00	0.75	0.35	6.00
100 – 1000	6.00	2.75	2.50	1.00	0.50	7.50
> 1000	7.00	3.50	3.00	1.25	0.70	10.00
Sistemas de distribución (> 161 kV)						
< 50 ⁽¹⁾	2.00	1.00	0.75	0.30	0.15	2.50
≥ 50	3.00	1.50	1.15	0.45	0.22	3.75
(1) Todos los equipos de generación están limitados a estos valores de distorsión de corriente, con independencia del valor de I_{sc}/I_L .						
(*) Los armónicos pares están limitados a un 25 % de los límites para los armónicos impares.						

(**) No está permitida la inyección de componentes de corriente continua.

9. HIPÓTESIS:

Mediante el análisis de los parámetros eléctricos de los alimentadores primarios permitirán identificar el comportamiento de los parámetros de calidad de energía de las subestaciones, debido al ingreso de un sistema de tracción

9.1.VALIDACIÓN DE LAS PREGUNTAS CIENTÍFICAS O HIPÓTESIS

Variable Independiente.- Parámetros eléctricos de los alimentadores primarios

Tabla 8: Operacionalización de la variable independiente

CONCEPTUALIZACIÓN	DIMENSIONES	INDICADORES	ÍTEMS	TÉCNICAS E INSTRUMENTOS
Se define como la descripción general de los componentes básicos del sistema eléctrico, partiendo de la distribución de la energía eléctrica en el alimentador principal y siguiendo sus diferentes etapas hasta el consumo final de la misma por parte de los equipos (cargas eléctricas).	Comportamiento de los alimentadores primarios.	Curvas de carga	Potencia[W]	Visita de campo y observación
	Nivel de contaminación de armónicos	Distorsión Armónica de Voltaje	Porcentaje	Simulación
	Análisis del sistema eléctrico general de los alimentadores	Cargabilidad de los conductores	Voltaje [V]	Simulación

Variable Dependiente.- Calidad del suministro eléctrico.

Tabla 9: Operacionalización de la variable dependiente

CONCEPTUALIZACIÓN	DIMENSIONES	INDICADORES	ÍTEMS	TÉCNICAS E INSTRUMENTOS
-------------------	-------------	-------------	-------	-------------------------

<p>Los problemas de calidad eléctrica causan estragos en tres áreas generales: tiempo de inactividad, problemas en los alimentadores, costos de consumo de energía por lo que es indispensable proponer métodos correctivos para mejorar el suministro de energía eléctrico</p>	<p>Bajo Factor de Potencia</p> <p>Niveles de Potencias en los alimentadores.</p>	<p>Penalización por bajo factor de potencia</p> <p>Potencia máxima y potencia mínima</p>	<p>$\cos\theta$</p> <p>Potencia [W]</p>	<p>Recolección de datos</p>
---	--	--	--	-----------------------------

10. METODOLOGÍA Y DISEÑO EXPERIMENTAL

10.1. Métodos de investigación

Se aplicó en el desarrollo de este tema investigativo los siguientes métodos: el inductivo, deductivo, analítico y sintético.

10.2. Método inductivo – deductivo

El método inductivo – deductivo permitirá un análisis de los alimentadores del sistema de tracción. Con este análisis se verificará si los alimentadores pueden asumir la carga y de qué manera afecta el ingreso del sistema de tracción, además de analizar todos los componentes eléctricos del sistema eléctrico de los alimentadores. Este método analiza en forma detallada cada uno de los elementos, instrumentos, temas y subtemas que se utilizaron en la elaboración del trabajo investigativo.

10.3. Método analítico y sintético

Para poder desarrollar el tema se utilizó el análisis y la síntesis de toda la información referente al tema, en base a documentos, Internet, fuentes bibliográficas, libros y revistas que se emplearon en el desarrollo del marco teórico. Se realiza una investigación bibliográfica, con el fin de realiza un análisis de todo el sistema eléctrico.

A través de los reportes que arrojan la simulación se realizan el análisis del estado actual de las tres subestaciones, en dos escenarios de estudio, son el ingreso y sin el ingreso del metro.

10.4. Tipos de Investigación

10.4.1. Investigación Bibliográfica

La investigación que se realizó se basó en una búsqueda bibliográfica como: libros, folletos, artículos, páginas web donde se logró obtener conocimientos más amplios sobre lo referente del tema, para poder realizar un análisis más amplio.

10.4.2. Investigación Exploratoria

A través de esta investigación se pudo conocer como estaba conformado el sistema eléctrico de las subestaciones además de entender el funcionamiento del sistema eléctrico del metro, así como las paradas, tiempos y recorridos que realizara el tren.

10.4.3. Investigación descriptiva

Se utiliza principalmente el método de análisis, es decir, se descompone el objeto a estudiar en sus distintos aspectos o elementos, para llegar a un conocimiento más especializado. Se realiza una exposición de hechos e ideas, explicando las diversas partes, cualidades o circunstancias. Esta investigación se utiliza para detallar las características constructivas del metro para entender el funcionamiento del mismo.

10.5. Técnicas de Investigación:

10.5.1. Observación Directa y Participativa

Se utilizó esta técnica para tener un conocimiento general sobre los alimentadores en estudio así entender el funcionamiento del sistema.

11. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS.

11.1. Descripción de las subestaciones de estudio

Las subestaciones se encuentran configuradas en barra simple, son subestaciones de seccionamiento y transformación. El sistema de alimentación del metro está constituido por tres subestaciones con un nivel de voltaje de 23 kV a 13.8 kV. En la tabla 9 se indica los datos de las tres subestaciones de interconexión.

Tabla 10: Características de las subestaciones utilizadas para la alimentación del metro

Subestaciones (S/E)	Nivel de voltaje (kV)	Potencia (MVA)
S/E 1	23/13.8	5
S/E 2	23/13.8	7
S/E 3	23/13.8	6

11.2. Características de las Subestaciones.

Los transformadores de tracción modelados corresponden a transformadores de tres devanados utilizados específicamente en aplicaciones para cargas de tracción. En la tabla 11 se especifica las características técnicas de estos transformadores.

Tabla 11: Características técnicas del transformador de tracción para el metro

Voltaje (kV)	13.8 kV/ 6.9 kV
Grupo de conexión	Dd0dy11
Tomas de ajustes de tensión primario (%)	+/-2,5 +5 +7,5%
Impedancia de cortocircuito (%)	8
Pérdidas en vacío (kW)	7
Frecuencia (Hz)	60

11.2.1. Descripción de la Subestación 1.

La subestación 1 cuenta con un transformador de tracción de potencia de 1,5 MVA este alimentara al metro, además la subestación cuenta con un transformador de 2 MVA, este alimenta a las cargas de distribución. En la figura 25 se esquematiza el diagrama unifilar de la subestación 1.

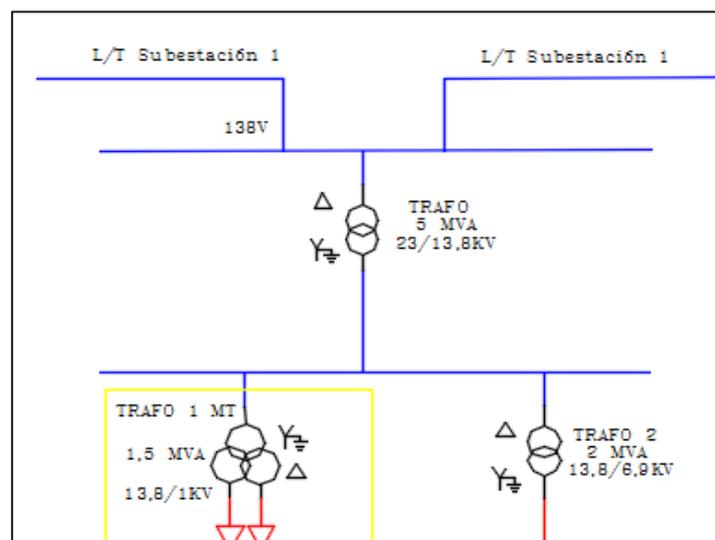


Figura 25: Diagrama Unifilar eléctrico de la Subestación 1

11.2.2. Descripción de la Subestación 2.

La subestación 2 cuenta con un transformador de tracción de potencia de 3 MVA este alimentara al metro, además la subestación cuenta con un transformador de 2,5 MVA, este alimenta a las cargas de distribución. En la figura 26 se esquematiza el diagrama unifilar de la subestación 2.

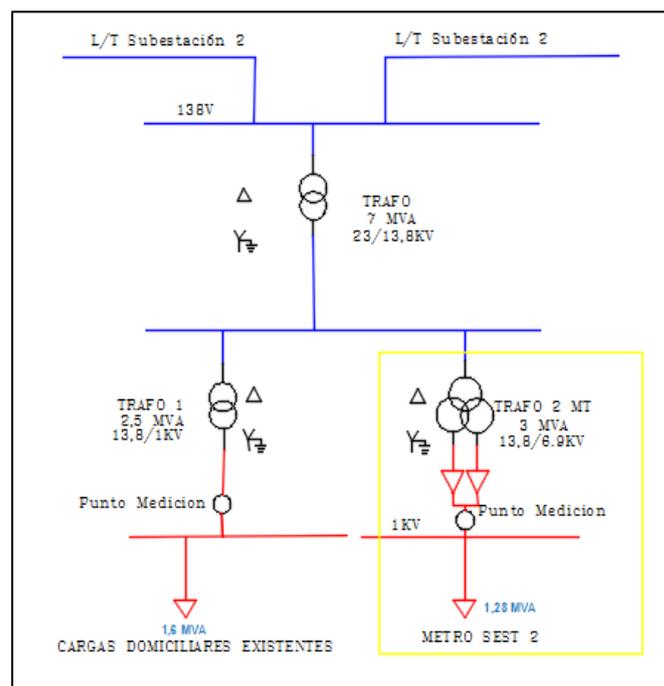


Figura 26: Diagrama Unifilar eléctrico de la Subestación 2

11.2.2. Descripción de la Subestación 3.

La subestación 3 cuenta con un transformador de tracción de potencia de 2 MVA este alimentara al metro, además la subestación cuenta con un transformador de 2,5 MVA, este alimenta a las cargas de distribución. En la figura 27 se esquematiza el diagrama unifilar de la subestación 3.

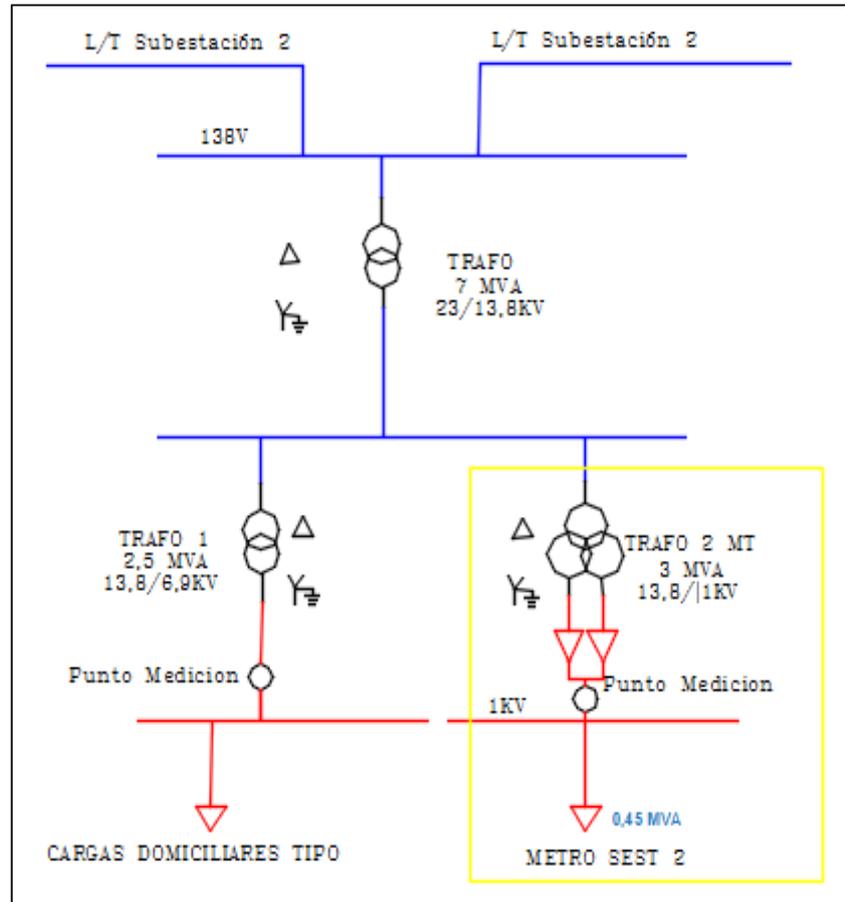


Figura 27: Diagrama Unifilar eléctrico de la Subestación 3

En la figura 27 se indica el diagrama total del sistema eléctrico con las tres subestaciones consideradas para el presente estudio. Cada subestación cuenta con dos transformadores, el un transformador es utilizado exclusivamente para alimentar cargas de distribución y el otro transformador es utilizado para las cargas de tracción, además este transformador cuenta con equipos de rectificación. En el diagrama también se puede observar las estaciones de tracción con sus respectivas paradas.

11.3. Características técnicas del metro

Todas las unidades están compuestas por cuatro motores de tracción: MC-R-S-MC [3], dando como resultado que cada tren esté conformado por 4 motores de tracción siendo:

- MC: coche motor con cabina en extremo libre
- R: coche remolque intermedio sin cabina

- S: coche motor intermedio sin cabina.

Las características técnicas de los motores de tracción del metro se señalan en la tabla 12:

Tabla 12: Características técnicas del transformador de tracción para el metro

Características Técnicas de Motores de tracción	
Tipo de motor	Motores de inducción
Voltaje de catenaria	1500 V
Voltaje nominal	1110 V
Corriente nominal	208 A
Potencia nominal por tren	1776 kW (a 1624 rpm)
Par nominal	1510 Nm
Número de par de polos	2
Rendimiento motor	>0,92
Relación de Transmisión	6,125

Fuente: Elaboración propia

De acuerdo a la tabla 11 se puede visualizar que la potencia nominal por tren es de 1776 kW, siendo éste un valor no adecuado para el análisis de estado estacionario a realizarse en el presente estudio, debido a que un tren tiene tres etapas de funcionamiento: arranque, inercia y frenado, por lo tanto, los motores no funcionarían a su potencia nominal en todo el recorrido y por ello es necesario determinar una potencia promedio de tracción para cada unidad. [4]

Se toma como referencia la información compartida por el Metro de Santiago S.A., se puede determinar la potencia promedio de tracción por coche de cada unidad de la línea del metro, en la tabla 13 se indica la potencia promedio por coche con aire acondicionado y sin aire acondicionado.

Tabla 13: Características técnicas del transformador de tracción para el metro

Tipo de coche	Potencia kW por coche
Sin aire acondicionado	80
Con aire acondicionado	105

Fuente: [4]

Para el presente estudio el tipo de coche que se va a utilizar es sin aire acondicionado. Como se dispone de 4 motores de tracción, de acuerdo a la tabla 10 da como resultado una potencia promedio de tracción por tren de 320 kW.

11.4. Número de trenes operando en la línea del metro.

Con el fin de determinar la ubicación de las cargas móviles (metro), se debe plantear en primera instancia los escenarios de transporte, para esto se definen los periodos de funcionamiento pico y valle. En la tabla 14 se definen los periodos de trabajo del metro.

Tabla 14: Períodos de trabajo del metro

Periodo pico de la mañana	7:00 a 8:30
Periodo valle	Resto de horas
Periodo pico de la noche	18:00 a 20:00

Se ha realizado la proyección del número de trenes que debe circular para los periodos anteriormente mencionados, esto se indica en la tabla 15.

Tabla 15: Número y horario de los trenes.

Trenes en Circulación			
Casos de Estudio	Período de funcionamiento	Horas	Número de trenes en el sistema
CASO 1	Periodo pico de la mañana	7:00 a 8:30	4
CASO 2	Periodo valle	Resto de horas	2
CASO 3	Periodo pico de la noche	18:00 a 20:00	4

A partir de la tabla 12 se procede a explicar para cada caso el periodo de funcionamiento y el número de trenes que entran a funcionar en el sistema eléctrico de cada subestación, explicando los tiempos de demora de parada a parada.

- **Caso 1:** El horario de funcionamiento del metro para este caso es de 7:00 a 8:30 am que corresponde al periodo pico de la mañana. El número de trenes estimados para este caso es de 4 trenes que ingresan al sistema eléctrico. Donde dos metros cubrirán la ruta de ida que corresponde desde la parada 1 hasta la parada 6. El desfase de tiempo entre la salida de los dos metros es de 15 minutos. El periodo de recorrido del

metro entre parada a parada es de 5 minutos, teniendo 1 minuto adicional para el ingreso y salida de los pasajeros; teniendo un total de tiempo de 6 minutos. Para la ruta de regreso que corresponde de la parada 6 a la parada 1 cumple con las mismas características de la ruta de ida.

- **Caso 2:** El horario de funcionamiento del metro para este caso es de 18:00 pm a, que corresponde al periodo valle. El número de trenes estimados para este caso es de 2 trenes que ingresan al sistema eléctrico. Donde un metro cubrirá la ruta de ida que corresponde desde la parada 1 hasta la parada 6 tomando en consideración el tiempo total de recorrido de ida de 30 minutos mientras que el otro metro cubrirá la ruta de regreso es decir desde la para 6 hasta la parada 1 con el mismo tiempo total de 30 minutos. Cubriendo un tiempo de 5 minutos entre parada y parada con 1 minuto adicional para ingreso y salida de los pasajeros.
- **Caso 3:** El horario de funcionamiento del metro para este caso es de 18: 00 a 20:00 pm que corresponde al periodo pico de la noche. El funcionamiento es similar al del caso 1.

El metro cumple con 6 paradas, dichas paradas son energizadas por los alimentadores de estudio. Cada alimentador energiza a dos paradas, esto se especifica en la tabla 16.

Tabla 16: Paradas del metro

Alimentadores	Recorrido
Subestación 1	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Parada 1 (Salida) ➤ Parada 2
Subestación 2	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Parada 3 ➤ Parada 4
Subestación 3	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Parada 5 ➤ Parada 6 (Llegada)

Una vez determinado las paradas, se establecen los tiempos estimados y la distancia del recorrido del metro entre cada estación. El metro dura cada 6 minutos de parada a parada y se demora 30 minutos para recorrer 30 km en total. En la tabla 16 se indica el tiempo que se demora el tren en la hora pico de la mañana.

Tabla 17: Tiempo de recorrido en la hora pico de la mañana

N°	Paradas	Tiempo	Distancia
1	Parada 1 – Parada 2	7:00 – 7:06	6,3 km
2	Parada 2 – Parada 3	7:06 – 7:12	6,6 km
3	Parada 3 – Parada 4	7:12 – 7:18	5,8 km
4	Parada 4 – Parada 5	7:18 – 7:24	6,1 km
5	Parada 5 – Parada 6	7:24 – 7:30	5,2 km
6	Parada 6 – Parada 5	7:30 – 7:36	5,2 km
7	Parada 5 – Parada 4	7:36 – 7:42	6,1 km
8	Parada 4 – Parada 3	7:42 – 7:48	5,8 km
9	Parada 3 – Parada 2	7:48 – 7:54	6,6 km
10	Parada 2 – Parada 1	7:54 – 8:00	6,3 km

En la figura 28 se indica el diagrama del recorrido total que debe seguir el metro, donde la distancia total es de 30 km.

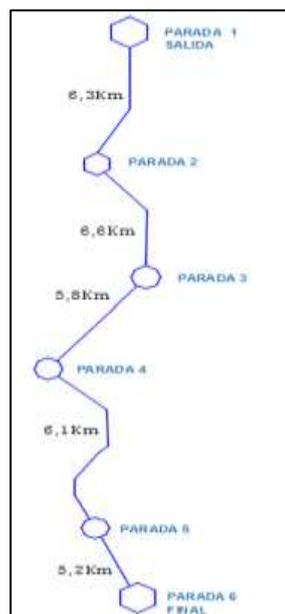


Figura 28: Diagrama del recorrido total del metro

Para entender el comportamiento del metro se debe analizar su funcionamiento tomando en consideración la aceleración y desaceleración, se debe resaltar que el metro no tiene frenado dinámico. Este comportamiento tendrá durante todo el recorrido indicado en la figura 25.

En la figura 29 se indica el comportamiento general del metro durante todo el recorrido, desde la parada 1 hasta la parada 6, tomando en cuenta que entre cada parada se demora 6 minutos. El metro se demora un minuto hasta llegar a su velocidad nominal, después mantiene la velocidad constante durante 3 minutos, seguidamente toman un minuto para la desaceleración y un minuto en el frenado. Estos lapsos de tiempos se cumplen para los dos periodos valle y pico. Se puede observar en la gráfica que existe una variación en la potencia, debido a que las distancias que tienen que recorrer de parada a parada son distintas, por ende la velocidad también varía, cabe recalcar que existe un consumo mínimo en cada parada de 0,03 MW debido a cargas adicionales como luminarias, equipos electrónicos, etc.

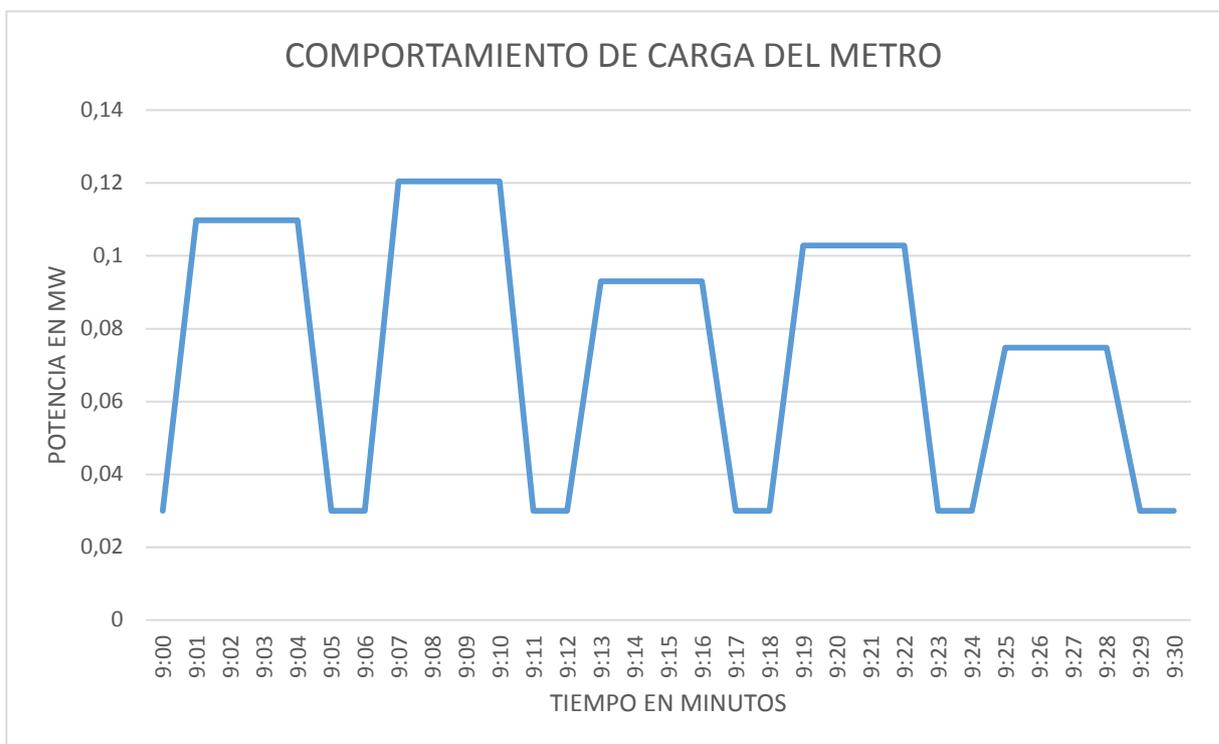


Figura 29: Curva típica del recorrido total del metro

11.5. Cálculo de la Potencia Mecánica y Potencia Eléctrica.

Es necesario considerar la potencia mecánica para el cálculo de la potencia eléctrica, para esto se debe considerar los siguientes parámetros que se indica en la tabla 18.

Tabla 18: Tiempo de recorrido en la hora pico de la mañana

Peso del metro vacío	470000 kg.
-----------------------------	------------

Peso del metro capacidad máxima	64500 kg.
Capacidad de personas por vagón	250 personas.
Peso estimado por persona	70 kg
Potencia por motor	80 kW

Antes de realizar los cálculos, se debe calcular el peso total para las 250 personas por vagón, en total se estima un peso de 17500 kg.

Se debe comenzar calculado la velocidad lineal cuya fórmula se indica en la ecuación 7.

$$V = \frac{d}{t} \quad (8)$$

El cálculo de la velocidad lineal para cada parada se indica en la tabla 19.

Tabla 19: Cálculo de la velocidad lineal entre paradas

Paradas	Distancia entre paradas (metros)	Tiempo en segundos de parada a parada	Velocidad (m/s)
Parada 1 – Parada 2	6300	300	21
Parada 2 – Parada 3	6600	300	22
Parada 3 – Parada 4	5800	300	19,33
Parada 4 – Parada 5	6100	300	20,33
Parada 5 – Parada 6	5200	300	17,33

Una vez realizado el cálculo de la velocidad lineal, se procede a calcular la energía cinética, siguiendo la fórmula 8.

$$Ec = \frac{m*v^2}{2} \quad (9)$$

El cálculo de la energía cinética para cada parada se indica en la tabla 20. Para el cálculo de la energía cinética se considera la velocidad calculada anteriormente y el peso del metro en capacidad máxima.

Tabla 20: Cálculo de la velocidad lineal entre paradas

Paradas	Energía Cinética (J)
----------------	-----------------------------

Parada 1 – Parada 2	14222250
Parada 2 – Parada 3	15609000
Parada 3 – Parada 4	12054333,33
Parada 4 – Parada 5	13333583,33
Parada 5 – Parada 6	9689333,33

Para el cálculo de la potencia mecánica se desarrolla la siguiente fórmula:

$$P_m = \frac{E_c}{t}$$

(10)

Donde:

P_m= Potencia mecánica

E_c= Energía cinética

t= tiempo

El cálculo de la potencia mecánica se resume en la tabla 21 para cada parada, tomando en consideración la energía cinética y el tiempo por parada de 5 minutos (300 segundos).

Tabla 21: Cálculo de la velocidad lineal entre paradas

Paradas	Potencia Mecánica (kW)
Parada 1 – Parada 2	27,43
Parada 2 – Parada 3	30,11
Parada 3 – Parada 4	23,25
Parada 4 – Parada 5	25,72
Parada 5 – Parada 6	19,00

Después de realizar el cálculo de la Potencia mecánica, se toma en consideración la carga mayor que es de 52,03 kW para el dimensionamiento de la carga máxima del sistema. Para la subestación 1 y para la subestación 3 considerando un tren como coincidencia máxima la

potencia total de la carga será 0.52 MW y para la subestación 2 se considera dos trenes como coincidencia máxima debido que a los 15 minutos de recorrido se encontraran en esta subestación los dos trenes, dando como potencia total de la carga 1.04 MW.

11.6. Demanda de las subestaciones proyectadas.

Para determinar el estado de las subestaciones proyectadas para la alimentación de los metros, es necesario realizar el análisis de la demanda para la subestación 1, 2 y 3. Para este análisis se tomara en cuenta dos escenarios:

- Demanda sin metro
- Demanda con metro

Para la demanda sin metro se analiza las curvas sin metro, es decir la demanda solo con las cargas residenciales y para la demanda con metro se analiza la curva residencial sumada con la curva del ingreso de metro. En la tabla 22 se especifica la potencia de los transformadores que alimentan a las cargas de distribución, que son solo residenciales, alumbrado público, para cada uno de las subestaciones.

Tabla 22: Potencia de transformador para cargas de distribución en cada subestación.

Subestaciones	Potencia de transformadores para cargas de distribución
S/E 1	2 MVA
S/E 2	2,5 MVA
S/E 3	2,5 MVA

Para la demanda cuando ingresa el metro se debe considerar la curva residencial sumada la curva del metro, para así determinar si la onda se distorsiona cuando ingresa el metro a cada subestación. En la tabla 23 se especifica la potencia de los transformadores que alimentaran a la carga de tracción (metro) para cada una de las subestaciones.

Tabla 23: Potencia de transformador para cargas de tracción en cada subestación.

Subestaciones	Potencia de transformadores para cargas de tracción.
S/E 1	1,5 MVA
S/E 2	3 MVA

S/E 3	2 MVA
-------	-------

a) Subestación 1

Demanda sin metro

Se realiza la curva de demanda diaria total en un periodo de tiempo de 24 horas, tomando en consideración solo las cargas ya conectadas en cada subestación antes del ingreso del sistema de tracción. De acuerdo a la gráfica 30 se observa que el mayor consumo se obtiene en la hora pico que es desde las 18:00 hasta las 21:00

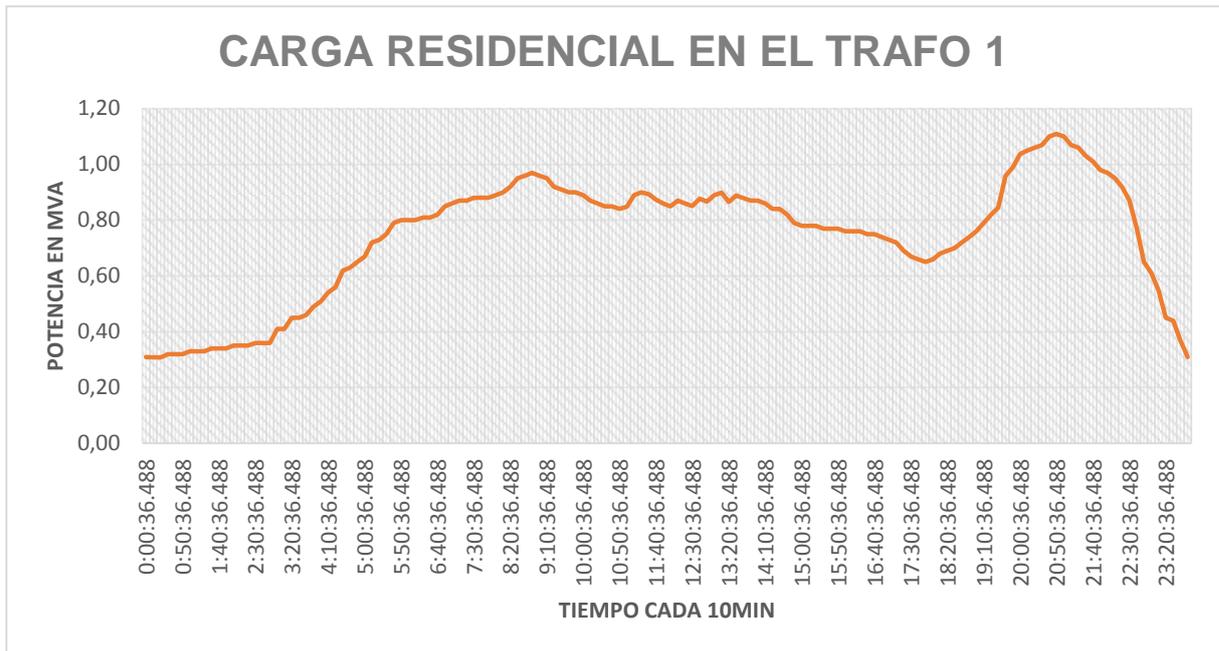


Figura 30: Curva de demanda total solo con cargas de distribución para la S/E 1

Demanda con metro

Se realiza la curva de demanda diaria total considerando los periodos de tiempo establecidos anteriormente hora pico y hora valle, tomando en cuenta las cargas de tracción que se conectara en cada subestación. En la figura 31 se puede observar que a la curva típica residencial contiene picos a lo que ingresa el metro a partir de las 7:00 de la mañana hasta las 20:00 de la noche.



Figura 31: Curva de demanda de la subestación 1 cuando ingresa el metro

b) Subestación 2

Demanda sin metro

En la figura 32 se puede observar la curva residencial de un transformador tipo, la misma que se gráfica en un periodo de tiempo de 24 horas, los picos del consumo residencial se da en los horarios de la mañana desde las 8:00 am hasta las 12: 00 pm y en la tarde desde las 18:00 hasta las 21:00



Figura 32: Curva de demanda total solo con cargas de distribución para la S/E 2

Demanda con metro

En la figura 30 se indica la curva típica residencial sumada el ingreso del metro, se puede observar que la curva que se tenía anteriormente contiene picos elevados al momento que

CARGA RESIDENCIAL CON METRO DE LA S/E

ingresa el metro, se puede observar que la curva de la subestación uno y de la subestación 2 se parecen.

Figura 33: Curva de demanda de la subestación 2 cuando ingresa el metro

c) **Subestación 3**

Demanda sin metro

En la figura 34 se indica la curva típica residencial de la subestación 3, donde se denota que tiene el mismo comportamiento que las anteriores curvas de la subestación 1 y 2, los picos se presentan en los mismos horarios.

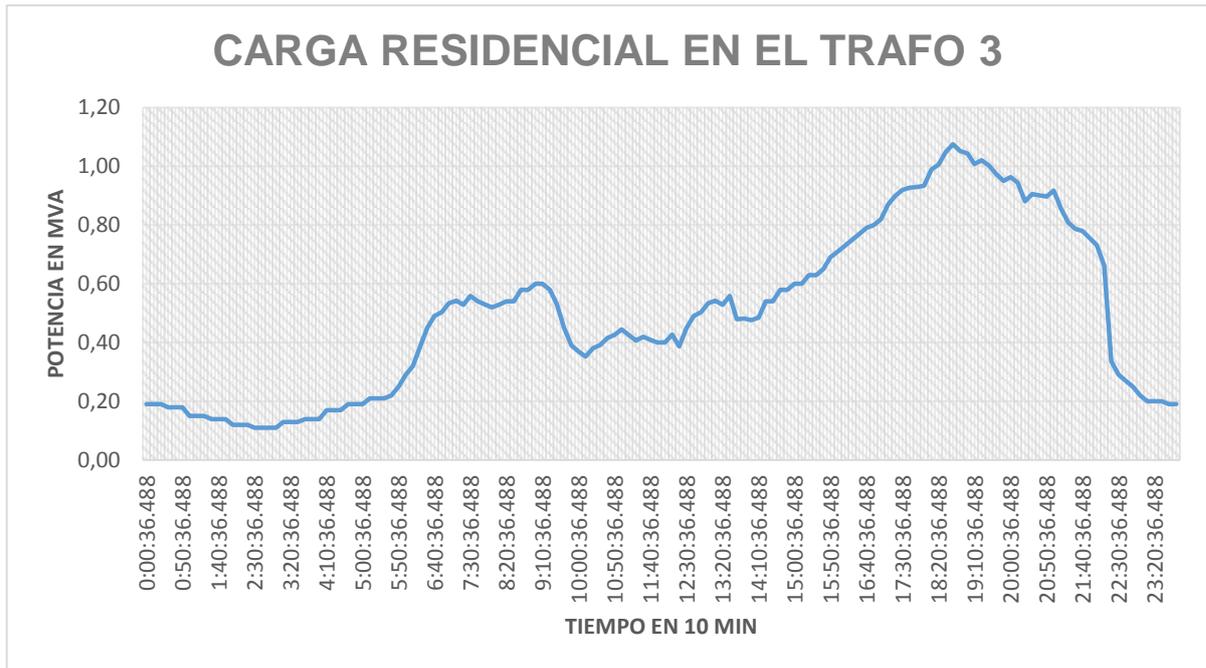


Figura 34: Curva de demanda total solo con cargas de distribución para la S/E 3

Demanda con metro

En la figura 35 se indica la curva típica residencial sumada la curva cuando ingresa el metro, se observa que la curva se distorsiona, debido que el metro es una carga no lineal de alta potencia esta distorsionada, con picos de distorsión elevada.



Figura 35: Curva de demanda de la subestación 3 cuando ingresa el metro

11.7. Simulación y Análisis de resultados.

Realizando la comparación entre las dos curvas, se puede concluir que la curva que se proyectó para las tres subestaciones, coincide con la curva realizada en el metro de Bogotá, por lo tanto esta curva representa el comportamiento típico que va a tener el metro y se puede tener como referencia para trabajos de investigación futuros.

11.7.1. Análisis de flujos de Potencia

Para conocer el estado actual del sistema eléctrico de los alimentadores de estudio, se utiliza como herramienta la simulación en el software EASY POWER. Para el análisis de los flujos de potencia, se considera los 2 escenarios: sin metro y con metro, realizando una comparación entre ambas y así entender el efecto que causa el ingreso del metro. En la figura 36 y 37 se indica el estudio de flujos sin metro y con metro respectivamente.

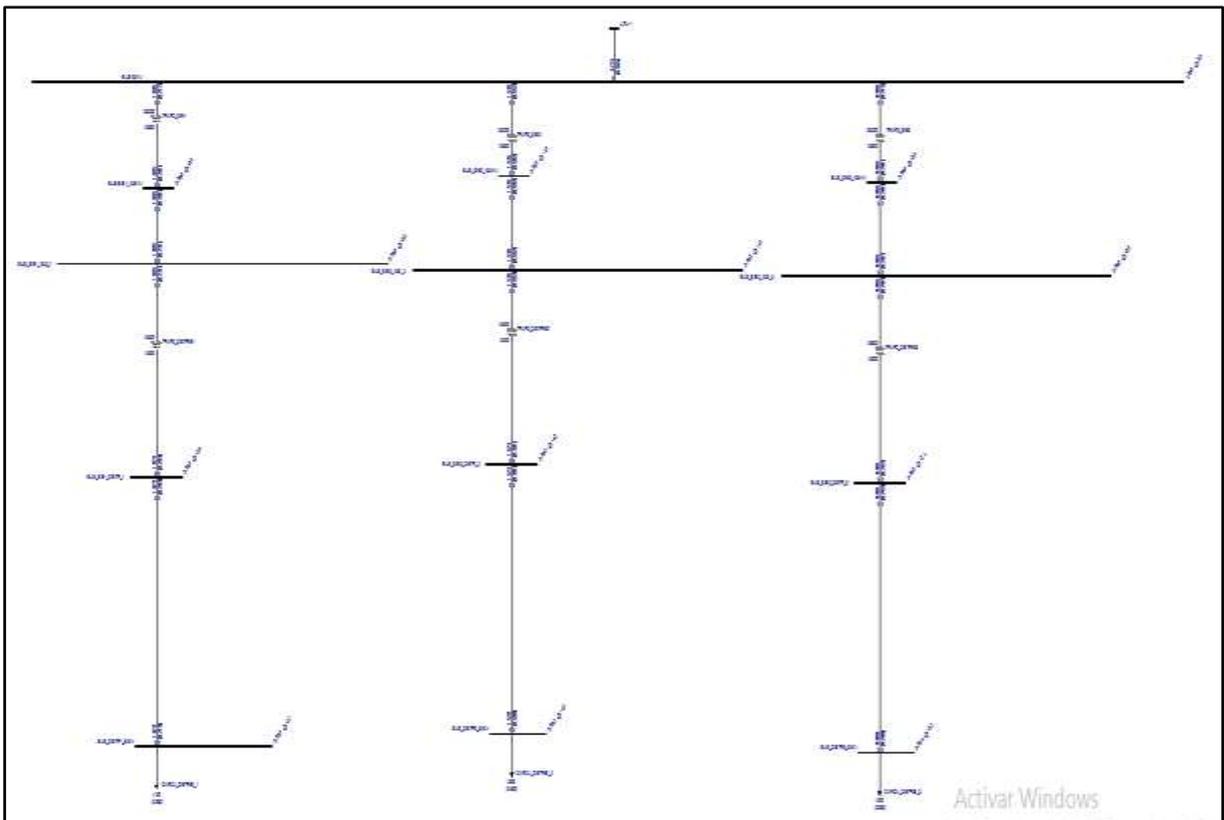


Figura 36: Flujos de potencia sin metro

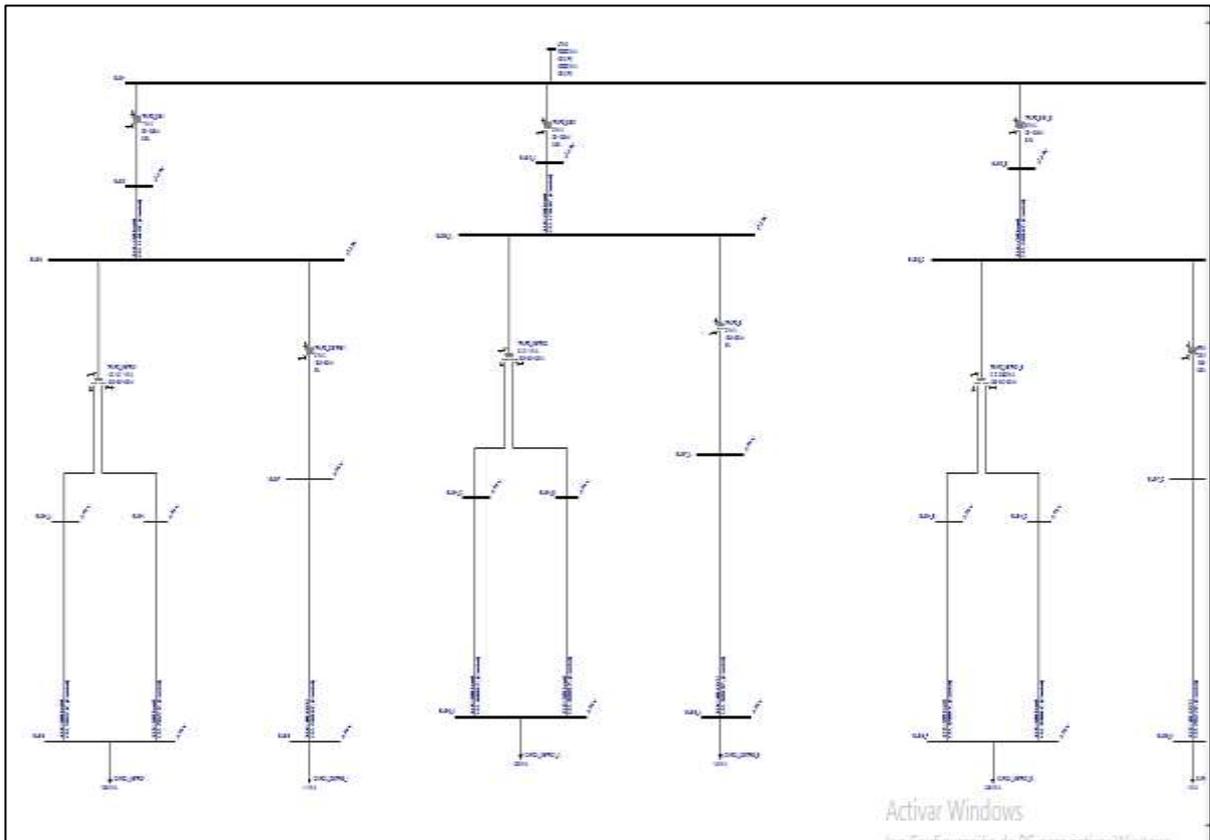


Figura 37: Flujos de potencia con metro

En el Anexo 1 y en el Anexo 2 se indican los planos completos de los estudios de flujos de potencia de las tres subestaciones, tomando en consideración los dos escenarios: con metro y sin metro.

11.6.1. Análisis de los perfiles de voltaje.

a) Subestación 1

En la tabla 24 se indica una comparación entre los dos resultados obtenidos en los dos escenarios especificados anteriormente, en relación a perfiles de voltaje para las barras de 23 kV y 13.8 kV respectivamente, para la Subestación 1

Tabla 24: Perfiles de Voltaje – Subestación 1

Barras	Nivel de Voltaje (kV)	
	SIN METRO	CON METRO
Barra General de 23 kV	23.25	23.65
Barra de 13.8 kV	13.96	14.42

De acuerdo a las simulaciones realizadas se entiende que la incorporación del metro, no representa afectaciones en los perfiles de voltaje para la subestación 1. Según la regulación ARCONEL 005/18 señala que los voltajes de las barras de 13.8 kV y 6.9 kV corresponden a medio voltaje, por lo tanto deben estar dentro del $\pm 6\%$. Para determinar si la variación del voltaje cumple con la regulación se aplica la siguiente ecuación.

$$\Delta V_k = \frac{V_k - V_N}{V_N} \times 100\% \quad (11)$$

Donde:

ΔV_k = Variación del voltaje de suministro respecto al voltaje nominal en el punto k

V_k = Voltaje de suministro en el punto k, determinado como el promedio de las medidas registradas (al menos cada 3 segundos), en un intervalo de 10 minutos.

V_N = Voltaje nominal en el punto k.

En la tabla 25 se indica las variaciones de voltaje para todas las barras, para los dos escenarios sin metro y con metro, de acuerdo a la tabla se concluye que los voltajes se encuentran dentro de los límites, es decir no existe variaciones de voltaje.

Tabla 25: Variaciones de voltaje – Subestación 1

Barras	Nivel de Voltaje (kV)	
	SIN METRO	CON METRO
Barra de 23 kV	1,09%	2,83%
Barra de Distribución de 13.8 kV	1.15%	4.49%

b) Subestación 2

En la tabla 26 se señala los perfiles de voltaje para las barras de 13.8 kV y 6.9 kV, respectivamente, para la Subestación 2

Tabla 26: Perfiles de Voltaje – Subestación 1

Barras	Nivel de Voltaje (kV)	
	SIN METRO	CON METRO
Barra de 23 kV	23.75	23.92
Barra de Distribución de 13.8 kV	13.98	14.66

En la tabla 27 se indica las variaciones de voltaje para todas las barras, de acuerdo a la tabla se concluye que los voltajes se encuentran dentro de los límites, dentro del $\pm 6\%$, es decir no existe variaciones de voltaje.

Tabla 27: Variaciones de voltaje – Subestación 2

Barras	Nivel de Voltaje (kV)	
	SIN METRO	CON METRO
Barra de 23 kV	3.26%	4.00%
Barra de Distribución de 13.8 kV	3.62%	6.23%

c) Subestación 3

En la tabla 28 se señala los perfiles de voltaje para las barras de 13.8 kV y 23 kV, respectivamente, para la Subestación 3

Tabla 28: Perfiles de Voltaje – Subestación 1

Barras	Nivel de Voltaje (kV)	
	SIN METRO	CON METRO
Barra de 23 kV	23.45	23.75
Barra de Distribución de 13.8 kV	13.97	14.50

En la tabla 29 se indica las variaciones de voltaje para todas las barras. De acuerdo a la tabla se concluye que los voltajes se encuentran dentro de los límites, dentro del $\pm 6\%$, es decir no existe variaciones de voltaje. Por lo tanto se verifica que cumple con lo estipulado en la regulación.

Tabla 29: Variaciones de voltaje – Subestación 2

Barras	Nivel de Voltaje (kV)	
	SIN METRO	CON METRO
Barra de 23 kV	1.96%	3.26%
Barra de Distribución de 13.8 kV	1.23%	5.07%

11.6.2. Análisis de cargabilidad de los Transformadores.

En la tabla 30 se indica una comparación entre los dos resultados obtenidos en los dos escenarios con metro y sin metro a través de los flujos de potencia realizados en el simulador, a lo que se refiere con la cargabilidad de los transformadores de cada subestación. Cabe recalcar que solo los transformadores que alimentará al metro son lo que presentan un mayor aumento en sus niveles de cargabilidad.

Tabla 30: Cargabilidad de transformadores

Barras	Cargabilidad de Transformadores. %	
	SIN METRO	CON METRO
S/E 1	36.40%	19.0%
S/E 2	21.50%	40.1%
S/E 3	12.30%	20.5%

De acuerdo a la tabla 31 se puede observar que al momento de ingresar el metro, aumentan su cargabilidad. Otra de las observaciones es que en la subestación número 2 existe una mayor cargabilidad, debido a que en este transformador es donde va alimentar el mayor número de trenes. Por lo tanto se recomienda que en un futuro es necesario realizar el cambio del transformador de la subestación 2 por uno de mayor capacidad para que pueda abastecer sin ningún problema, si es que existe una proyección de carga a futuro.

11.6.3. Análisis de cargabilidad de los Conductores.

En la tabla 31 se indica una comparación entre los dos resultados obtenidos en los dos escenarios con metro y sin metro a través de los flujos de potencia realizados en el simulador, a lo que se refiere con la cargabilidad de los conductores de cada subestación.

Tabla 31: Cargabilidad de transformadores

Barras	Cargabilidad de Conductores %	
	SIN METRO	CON METRO
L/T 1	10.5%	13.80%
L/T 2	15.7%	29.55%
L/T 3	9.6%	16.28%

De acuerdo a la tabla 32 se puede observar, cuando no ingresa el metro los conductores no están a la mitad de su cargabilidad, debido a que solo alimentan a cargas netamente residenciales. Cuando ingresa el metro aumentan la cargabilidad de los conductores en especial en la subestación 2 debido a que hay mayor concentración de carga.

11.6.4. Análisis de factor de Potencia

En la tabla 32 se indica una comparación entre los dos resultados obtenidos en los dos escenarios con metro y sin metro a través de los flujos de potencia realizados en el simulador, a lo que se refiere con el factor de potencia de cada subestación.

Tabla 32: Cargabilidad de transformadores

Barras	Factor de Potencia. %	
	SIN METRO	CON METRO
S/E 1	0.98	0.95
S/E 2	0.95	0.92
S/E 3	0.98	0.95

De acuerdo a la tabla anterior se puede observar que el factor de potencia solo con cargas de distribución netamente residenciales el factor de potencia se encuentra mayor a 0.95 lo que no implica un problema para el sistema. Cuando el metro ingresa al sistema eléctrico el factor de potencia disminuye, en especial del transformador 2 debido a que en este alimentador el factor de potencia se encuentra en el límite y con el ingreso estimativo de carga no lineal este factor de potencia puede disminuir considerablemente, por lo que es necesario tomar medidas correctivas.

11.7. Análisis del estudio de Armónicos.

Para realizar el estudio de armónicos, es necesario modelar el sistema eléctrico en el software EASY POWER. Se debe realizar el análisis del contenido de armónicos de voltaje y de corriente. Para el estudio de armónicos de debe tomar en cuenta los dos necesarios:

- Sin metro
- Con metro

11.7.1. Análisis de Armónicos sin metro.

Para el análisis de armónicos sin metro, se debe tomar en consideración solo las cargas de distribución. En la gráfica 38 se indica la simulación de armónicos antes del ingreso del metro a la red eléctrica, para cada una de las subestaciones. Para el análisis de armónicos de la subestación 1, se debe evaluar el contenido de armónicos de corriente y voltaje.

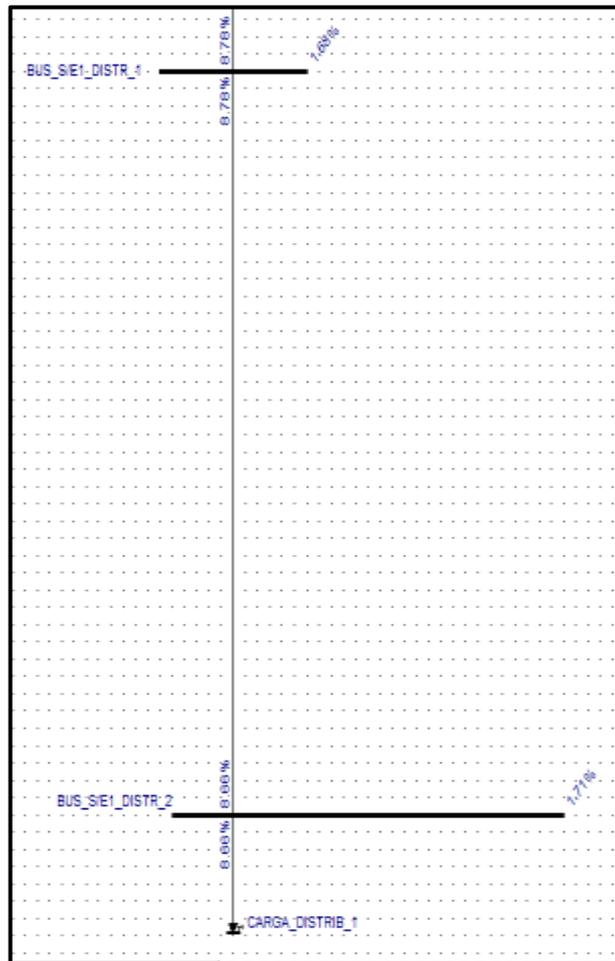


Figura 38: Flujos de armónicos sin metro

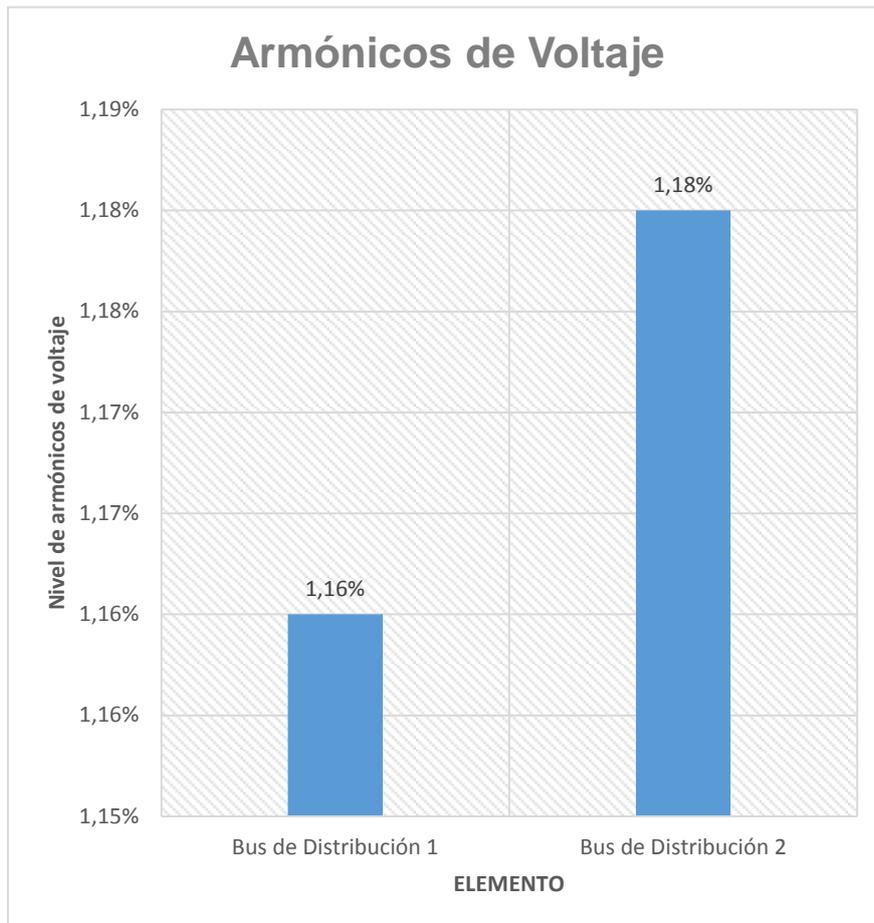
a) Armónicos de Voltaje

➤ Subestación 1

En la tabla 33 se indica el contenido de armónicos de voltaje en cada uno de los elementos que constituye la subestación 1, tales como barras, conductores, carga, etc. De acuerdo a la regulación IEEE-519, indica que los armónicos de voltaje de la subestación no debe sobrepasar el 5%. Para el análisis de armónicos se debe realizar en las barras.

Tabla 33: Contenido de armónicos de Voltaje

	Armónicos de Voltaje
Bus de Distribución 1_ Subestación 1	1.16%
Bus de Distribución 2_ Subestación 1	1.18%

**Figura 39:** Armónicos de voltaje de Subestación 1

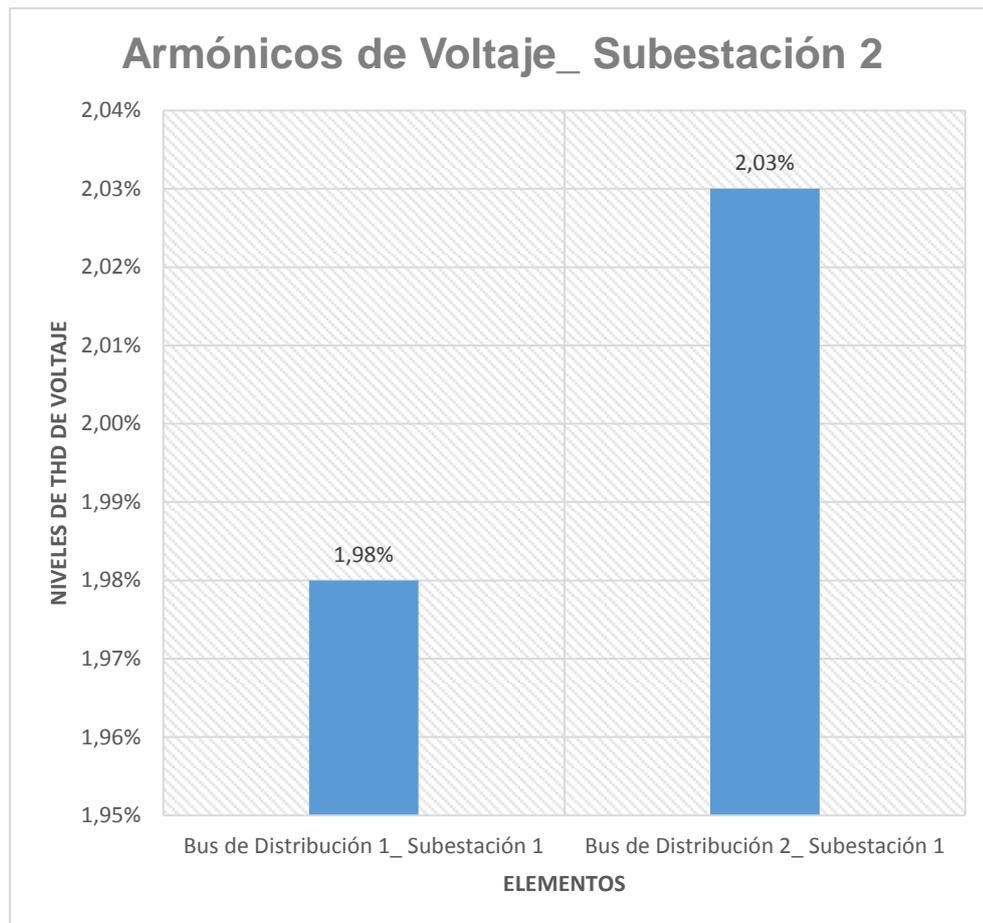
En la figura 39, indica que el nivel de THD de voltaje se encuentra menos del 2%, dicho índice se encuentra dentro de los límites, por lo tanto no existe armónicos de voltaje.

➤ **Subestación 2**

En la tabla 34 se indica el contenido de armónicos de voltaje en cada uno de los elementos que constituye la subestación 2. De acuerdo a la regulación IEEE-519, indica que los armónicos de voltaje de la subestación no debe sobrepasar el 5%. Para el análisis de armónicos se debe realizar en las barras.

Tabla 34: Contenido de armónicos de Voltaje

	Armónicos de Voltaje
Bus de Distribución 1_ Subestación 2	1.98 %
Bus de Distribución 2_ Subestación 2	2.03 %

**Figura 40:** Armónicos de voltaje de Subestación 1

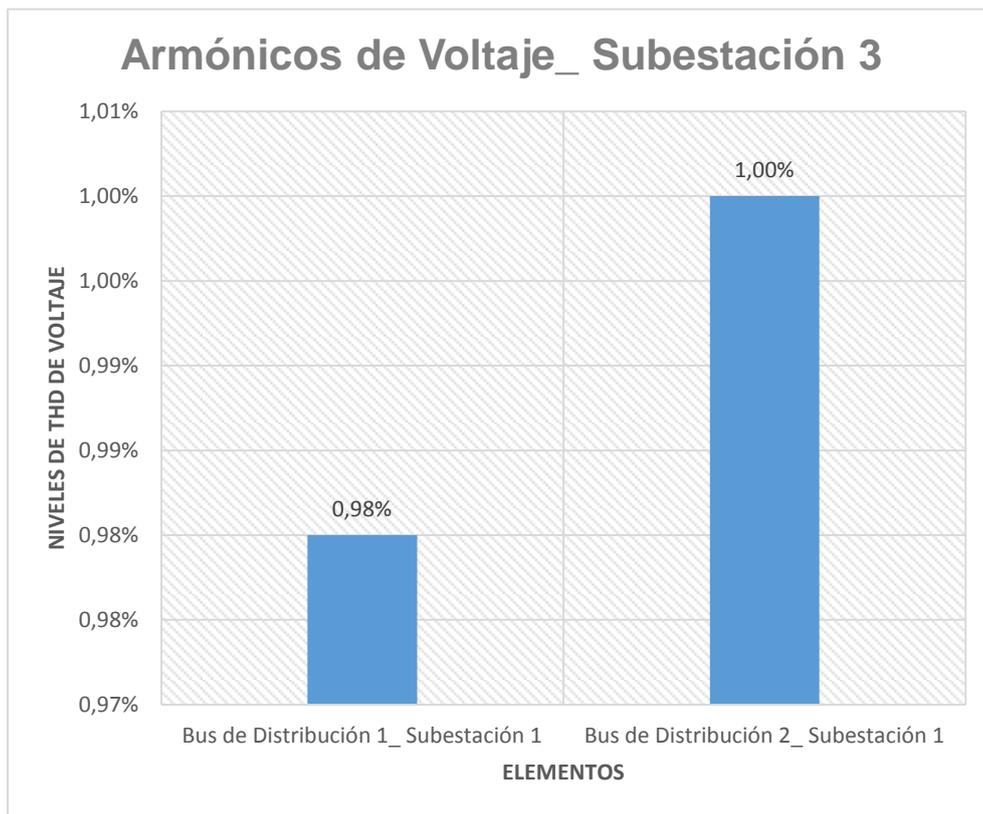
En la figura 40, indica que el nivel de THD de voltaje se encuentra menos del 2%, dicho índice se encuentra dentro de los límites, por lo tanto no existe armónicos de voltaje.

➤ **Subestación 3**

En la tabla 35 se indica el contenido de armónicos de voltaje en cada uno de los elementos que constituye la subestación 3. De acuerdo a la regulación IEEE-519, indica que los armónicos de voltaje de la subestación no debe sobrepasar el 5%. Para el análisis de armónicos se debe realizar en las barras.

Tabla 35: Contenido de armónicos de Voltaje

	Armónicos de Voltaje
Bus de Distribución 1_ Subestación 3	0.98 %
Bus de Distribución 2_ Subestación 3	1.00 %

**Figura 41:** Armónicos de voltaje de Subestación 1

En la figura 41, indica que el nivel de THD de voltaje se encuentra menos del 1%, dicho índice se encuentra dentro de los límites, por lo tanto no existe armónicos de voltaje.

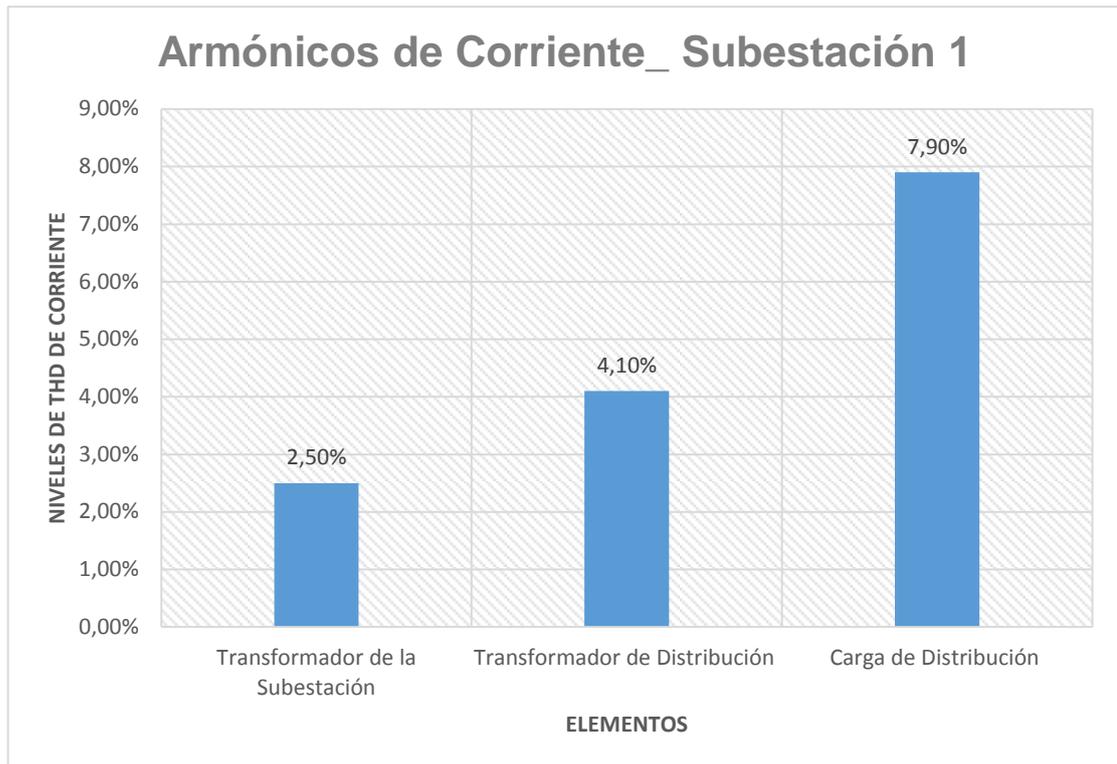
b) Armónicos de Corriente

➤ Subestación 1

En la tabla 36 se indica el contenido de armónicos de voltaje en cada uno de los elementos que constituye la subestación 1, tales como barras, conductores, carga, etc. De acuerdo a la regulación IEEE-519, indica que los armónicos de corriente de la subestación no debe sobrepasar el 8%, este valor es tomado en base a la impedancia de cortocircuito del transformador. Para el análisis de armónicos se debe realizar en los elementos.

Tabla 36: Contenido de armónicos de Corriente

	Armónicos de Corriente
Transformador de la Subestación	2.5%
Transformador de Distribución	4.1%
Carga de Distribución	7.9%

**Figura 42:** Armónicos de voltaje de Subestación 1

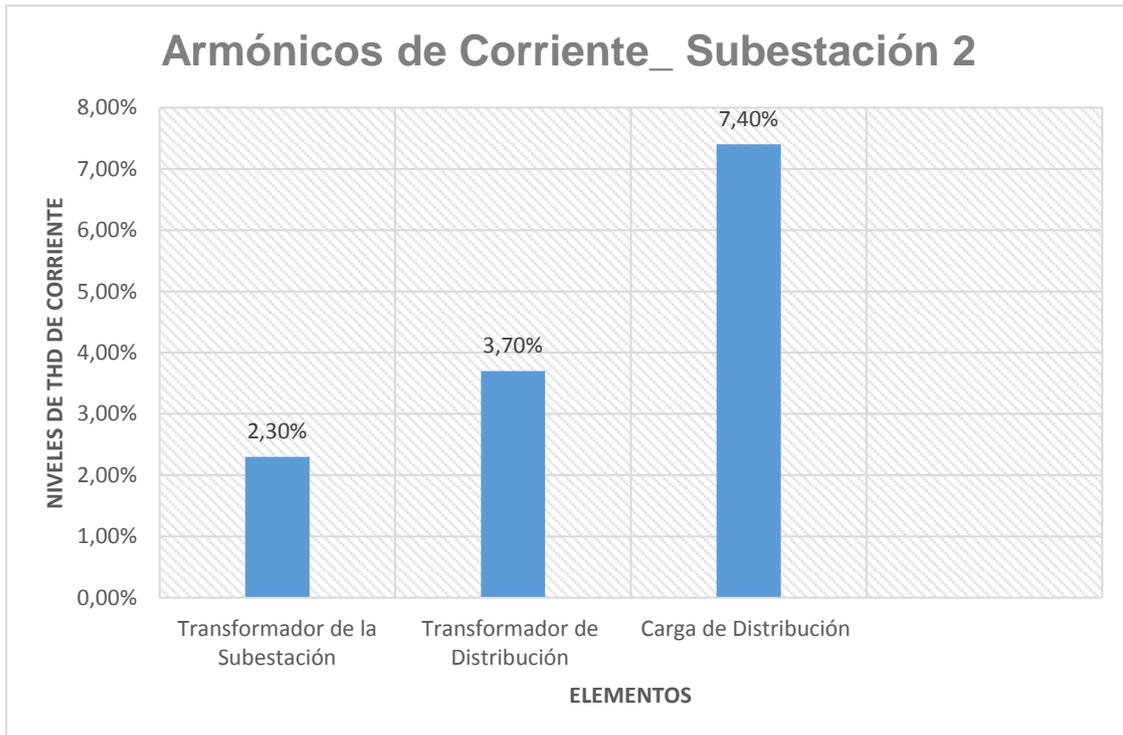
En la figura 42, indica que el nivel de THD de corriente se encuentra menos del 12%, dicho índice se encuentra dentro de los límites, por lo tanto no existe armónicos de corriente en el alimentador de distribución.

➤ **Subestación 2**

En la tabla 37 se indica el contenido de armónicos de voltaje en cada uno de los elementos que constituye la subestación 2. De acuerdo a la regulación IEEE-519, indica que los armónicos de corriente de la subestación no debe sobrepasar el 8% este valor es tomado en base a la impedancia de cortocircuito del transformador 2.

Tabla 37: Contenido de armónicos de Corriente

	Armónicos de Corriente
Transformador de la Subestación	2.3%
Transformador de Distribución	3.7%
Carga de Distribución	7.4%

**Figura 43:** Armónicos de voltaje de Subestación 1

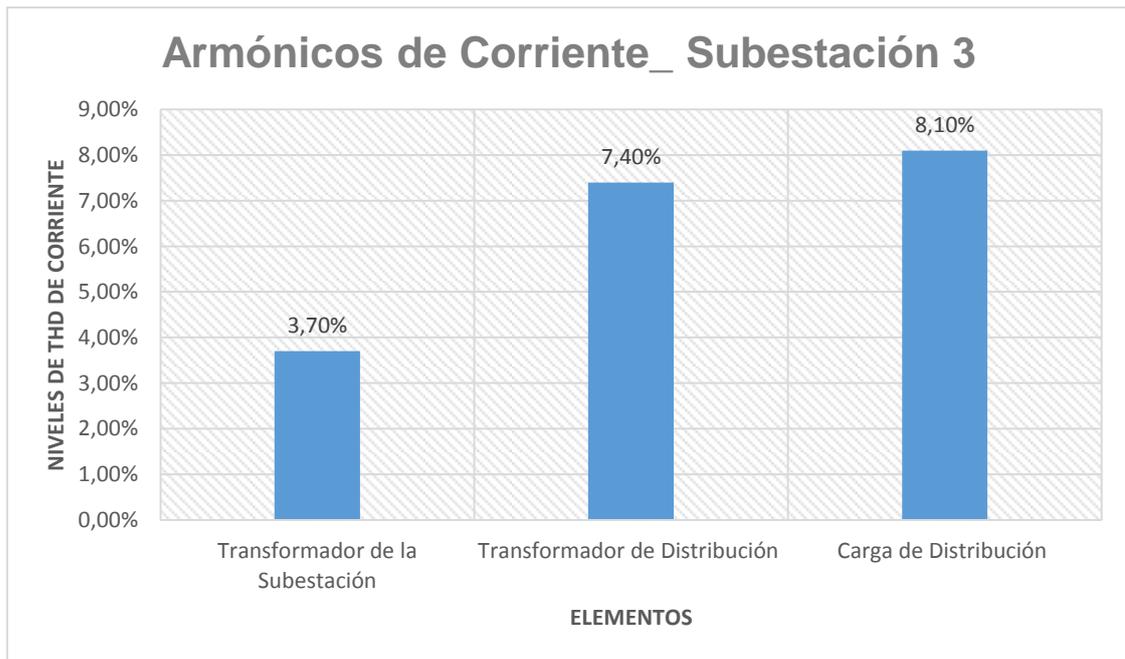
En la figura 43, indica que el nivel de THD de voltaje se encuentra menos del 12%, dicho índice se encuentra dentro de los límites, por lo tanto no existe armónicos de corriente.

➤ **Subestación 3**

En la tabla 38 se indica el contenido de armónicos de voltaje en cada uno de los elementos que constituye la subestación 3. De acuerdo a la regulación IEEE-519, indica que los armónicos de corriente de la subestación no debe sobrepasar el 12%. Para el análisis de armónicos se debe realizar en las barras.

Tabla 38: Contenido de armónicos de Corriente

	Armónicos de Voltaje
Transformador de la Subestación	3.7%
Transformador de Distribución	7.4%
Carga de Distribución	8.1%

**Figura 44:** Armónicos de voltaje de Subestación 1

En la figura 44, indica que el nivel de THD de voltaje se encuentra menos del 8%, dicho índice se encuentra dentro de los límites, por lo tanto no existe armónicos de corriente.

11.7.1. Análisis de Armónicos con metro.

Para el análisis de armónicos con metro, se debe tomar en consideración las cargas de tracción, de esta manera se analizara si existe contaminación armónica debido al ingreso del metro ya que esta es considerada como carga no lineal de alta potencia.

Para este análisis se debe considerar que el metro opera con un rectificador el mismo que inyecta armónicos a la red eléctrica. Este convertidor de 6 pulsos se esquematiza en la figura 45, es importante indicar que este conversor será instalado en la carga.

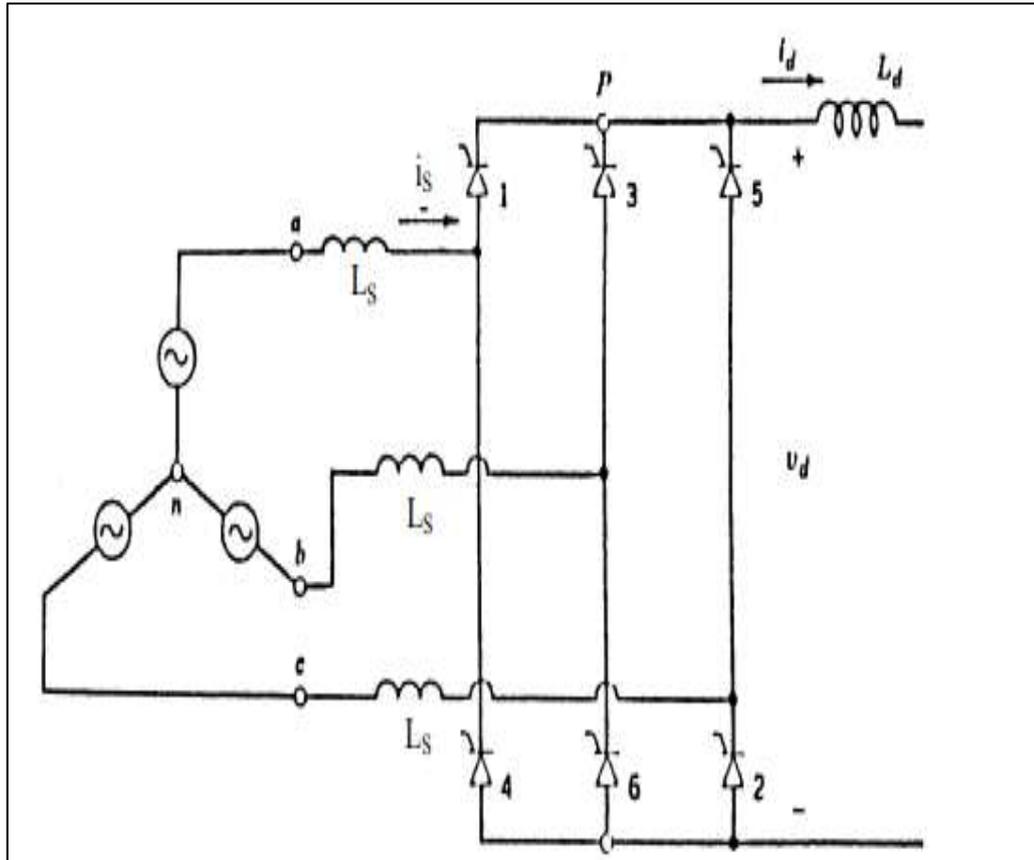


Figura 45: Rectificador puente trifásico de 6 pulsos

En la ecuación 12 se indica la corriente con las respectivas armónicas, dichos armónicos de corriente serán inyectados a toda la red eléctrica.

$$i_a(t) = I_d \frac{2\sqrt{3}}{\pi} \left[\cos wt - \frac{1}{5} \cos 5wt + \frac{1}{7} \cos 7wt - \frac{1}{11} \cos 11wt + \frac{1}{13} \cos 13wt + \frac{1}{19} \cos 19wt \dots \dots \right] \quad (12)$$

Una vez explicado lo relacionado al rectificador de 6 pulsos que es utilizado por el metro, se realiza la simulación en el EASY POWER, del sistema eléctrico. En la gráfica 46 se indica la simulación de armónicos después del ingreso del metro a la red eléctrica, para cada una de las subestaciones. Para el análisis de armónicos de las tres subestaciones, se debe evaluar el contenido de armónicos de corriente y voltaje, comparando con los niveles establecidos por la regulación de armónicos IEEE – 519.

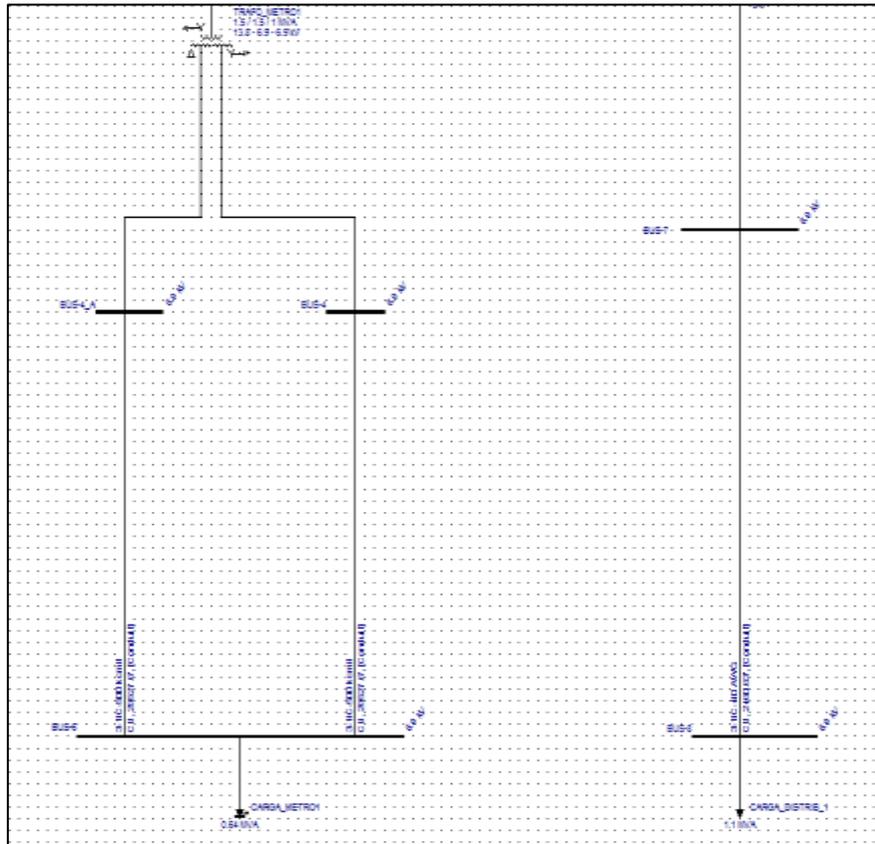


Figura 46: Flujos de armónicos sin metro

c) Armónicos de Voltaje

➤ Subestación 1

En la tabla 39 se indica el contenido de armónicos de voltaje en cada uno de los elementos que constituye la subestación 1, tales como barras, conductores, carga, etc. De acuerdo a la regulación IEEE-519, indica que los armónicos de voltaje de la subestación no debe sobrepasar el 5%. Para el análisis de armónicos se debe realizar en las barras.

Tabla 39: Contenido de armónicos de Voltaje de la S/E 1

	Armónicos de Voltaje
Bus 1 de Metro_ Subestación 1	0.91%
Bus 2 de Metro_ Subestación 1	0.91%
Bus de Carga metro_ Subestación 1	0.95%

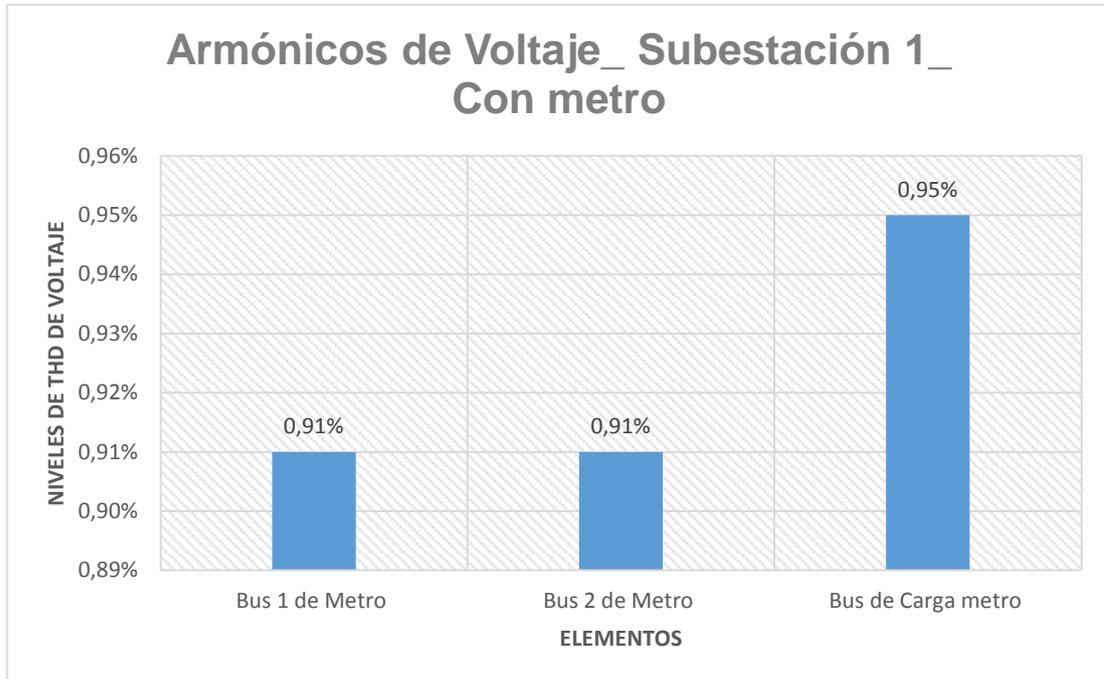


Figura 47: Armónicos de voltaje de Subestación 1

En la figura 45, indica que el nivel de THD de voltaje se encuentra menos del 1%, dicho índice se encuentra dentro de los límites, por lo tanto cuando ingresa el metro no existe armónicos de voltaje. Se puede decir que el rectificador de 6 pulsos disminuye el porcentaje de armónicos de voltajes.

➤ **Subestación 2.**

En la tabla 40 se indica el contenido de armónicos de voltaje en cada uno de los elementos que constituye la subestación 2. De acuerdo a la regulación IEEE-519, indica que los armónicos de voltaje de la subestación no debe sobrepasar el 5%. Para el análisis de armónicos se debe realizar en las barras.

Tabla 40: Contenido de armónicos de Voltaje de la S/E 2

	Armónicos de Voltaje
Bus 1 de Metro_ Subestación 2	0.91 %
Bus 2 de Metro _ Subestación 2	1.54 %
Bus de Carga metro_ Subestación 2	0.95 %

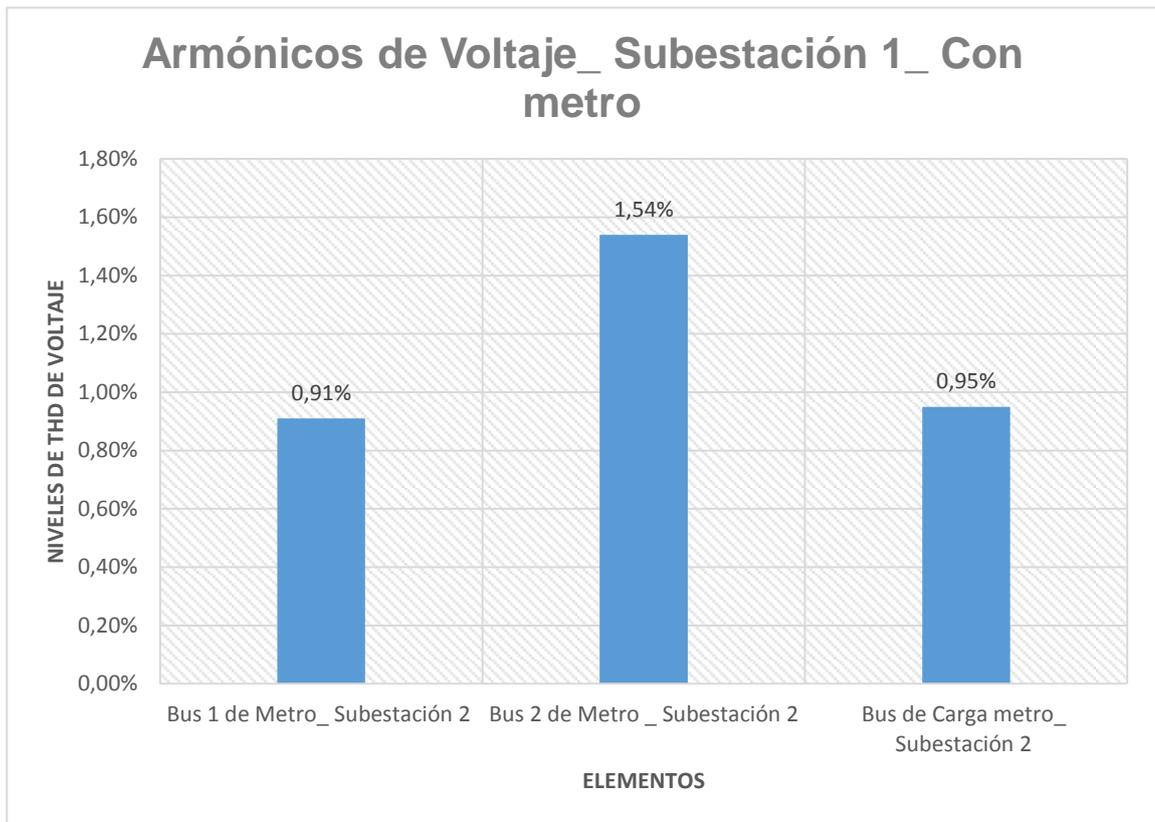


Figura 48: Armónicos de voltaje de Subestación 2

En la figura 48, indica que el nivel de THD de voltaje se encuentra menos del 2%, dicho índice se encuentra dentro de los límites, por lo tanto no existe armónicos de voltaje.

➤ Subestación 3

En la tabla 41 se indica el contenido de armónicos de voltaje en cada uno de los elementos que constituye la subestación 3. De acuerdo a la regulación IEEE-519, indica que los armónicos de voltaje de la subestación no debe sobrepasar el 5%. Para el análisis de armónicos se debe realizar en las barras.

Tabla 41: Contenido de armónicos de Voltaje de la S/E 3

	Armónicos de Voltaje
Bus 1 de Metro_ Subestación 3	0.76 %
Bus 2 de Metro _ Subestación 3	0.76 %
Bus de Carga metro_ Subestación 3	0.81%

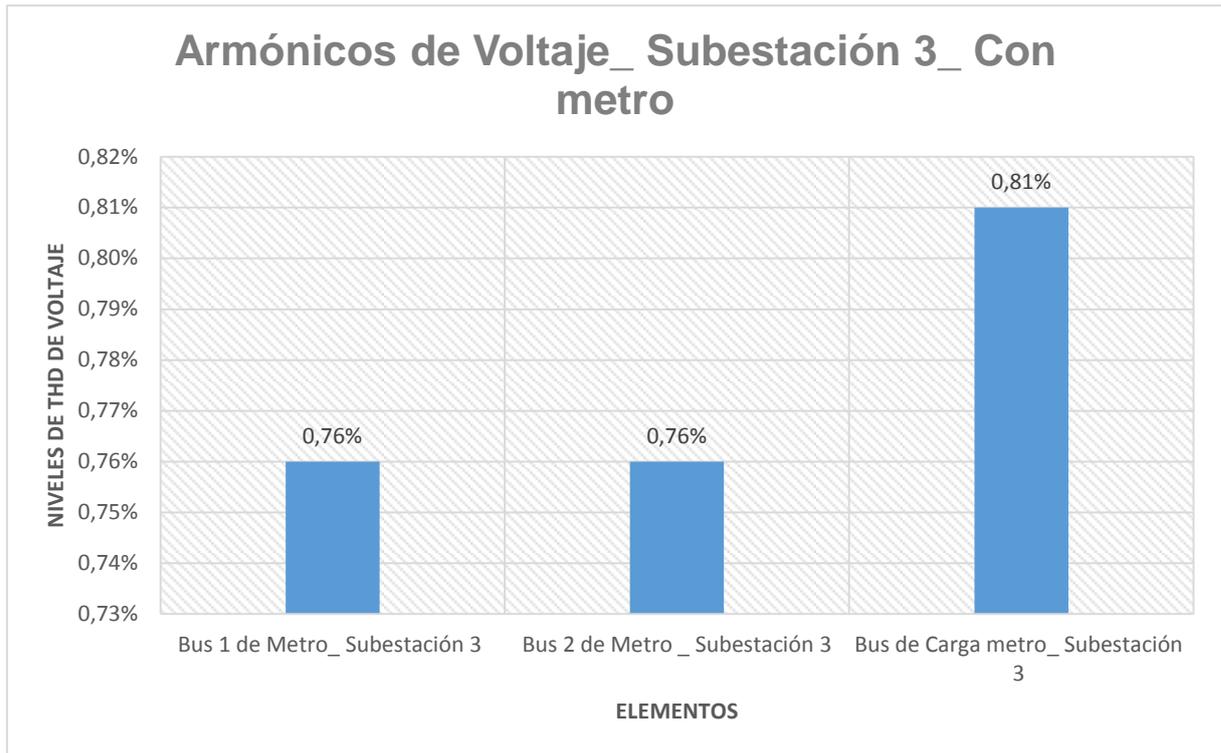


Figura 49: Armónicos de voltaje de Subestación 3

En la figura 49, indica que el nivel de THD de voltaje se encuentra menos del 1%, dicho índice se encuentra dentro de los límites, por lo tanto no existe armónicos de voltaje.

d) Armónicos de Corriente

➤ Subestación 1

En la tabla 42 se indica el contenido de armónicos de corriente en cada uno de los elementos que constituye la subestación 1, tales como barras, conductores, carga, etc. De acuerdo a la regulación IEEE-519, indica que los armónicos de corriente de la subestación no debe sobrepasar el 8%, este valor es tomado en base a la impedancia de cortocircuito del transformador. Para el análisis de armónicos se debe realizar en los elementos.

Tabla 42: Contenido de armónicos de Corriente

	Armónicos de Corriente
Transformador de la Subestación 1	12.40%
Transformador de Tracción 1	20.40%
Carga de Metro 1	13.80%

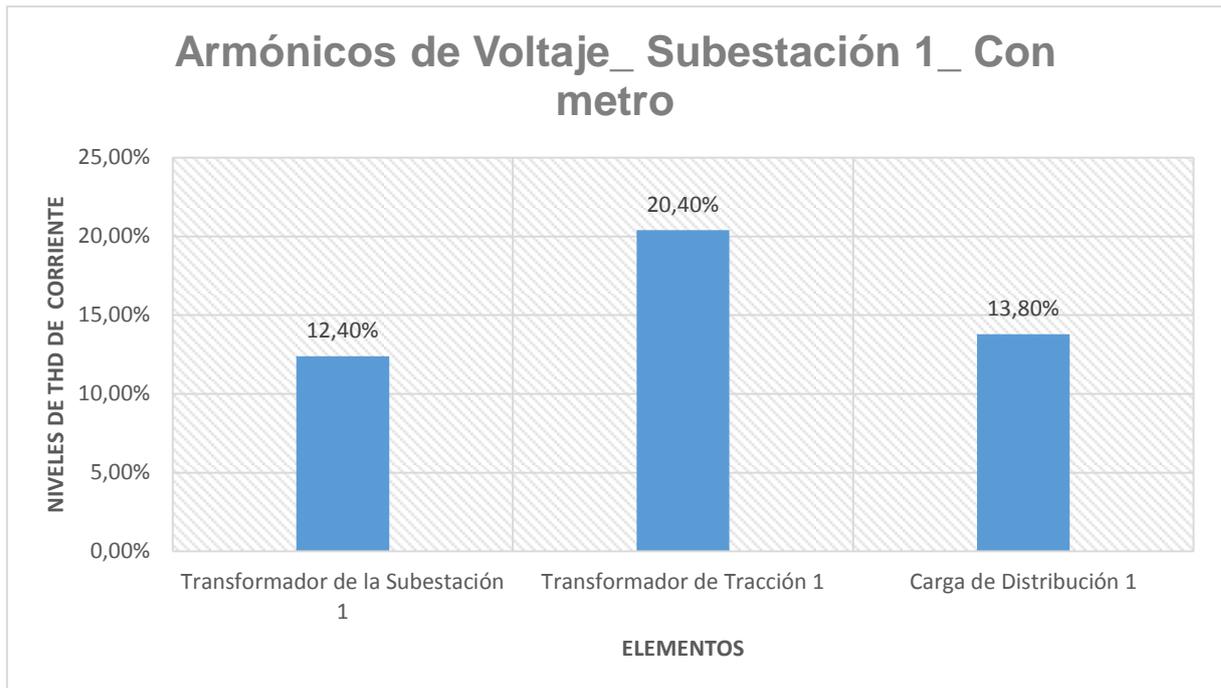


Figura 50: Armónicos de voltaje de Subestación 1

En la figura 50 indica que el nivel de THD de corriente se encuentra mayor al 8%, dicho índice se encuentra fuera de los límites, por lo tanto existe armónicos de corriente en el alimentador de distribución. Lo que se puede concluir es que el rectificador de 6 pulsos genera corrientes armónicas contaminando a todo el sistema eléctrico.

➤ **Subestación 2**

En la tabla 43 se indica el contenido de armónicos de corriente en cada uno de los elementos que constituye la subestación 2. De acuerdo a la regulación IEEE-519, indica que los armónicos de corriente de la subestación no debe sobrepasar el 8% este valor es tomado en base a la impedancia de cortocircuito del transformador 2.

Tabla 43: Contenido de armónicos de Corriente

	Armónicos de Corriente
Transformador de la Subestación 2	25.50%
Transformador de Tracción 2	42.10%
Carga de Metro 2	27.60%

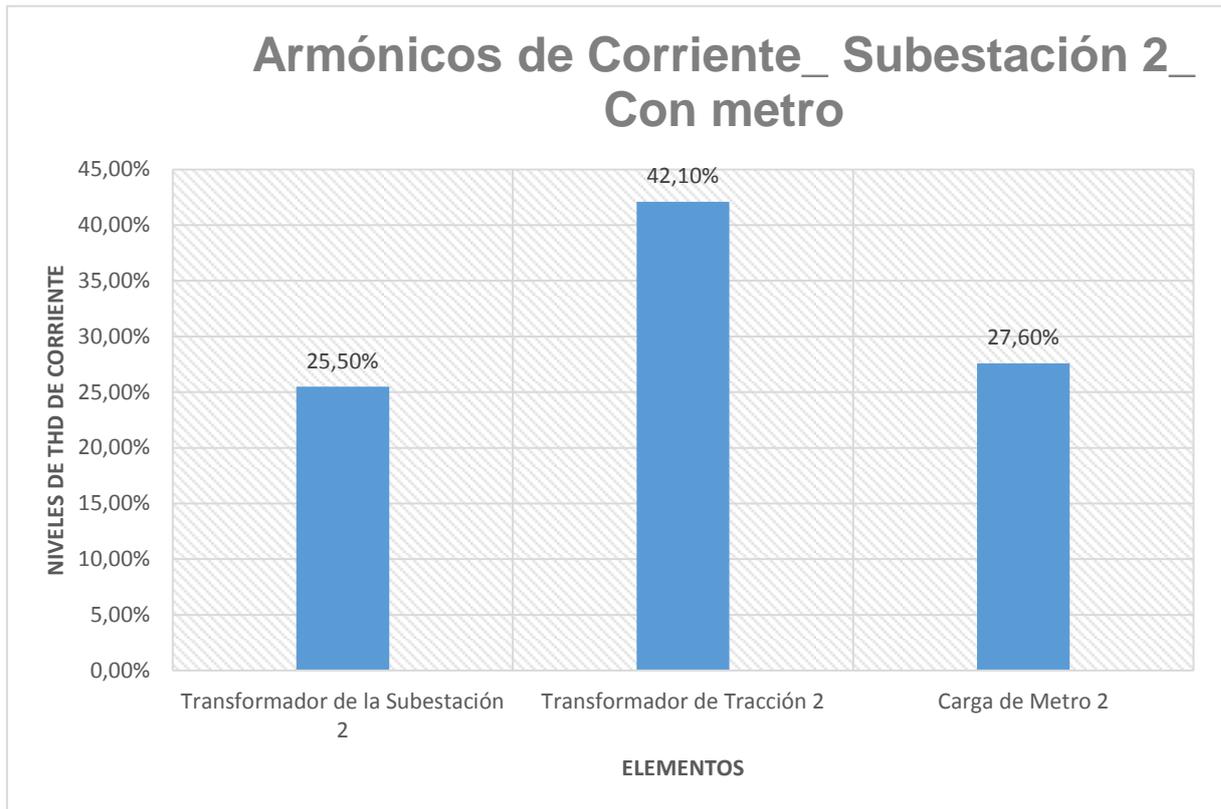


Figura 51: Armónicos de voltaje de Subestación 2

En la figura 51, indica que el nivel de THD de corriente se encuentra mayor al 8%, dicho índice se encuentra dentro de los límites, por lo tanto existe armónicos de corriente. Es importante señalar que en la subestación 2 debido que la carga a alimentar es mayor los armónicos de corriente son superiores a comparación de los otros metros.

➤ Subestación 3

En la tabla 44 se indica el contenido de armónicos de corriente en cada uno de los elementos que constituye la subestación 3. De acuerdo a la regulación IEEE-519, indica que los armónicos de corriente de la subestación no debe sobrepasar el 12%.

Tabla 44: Contenido de armónicos de Corriente

	Armónicos de Corriente
Transformador de la Subestación 3	11.9%
Transformador de Tracción 3	19.2%
Carga de Metro 3	27.60%

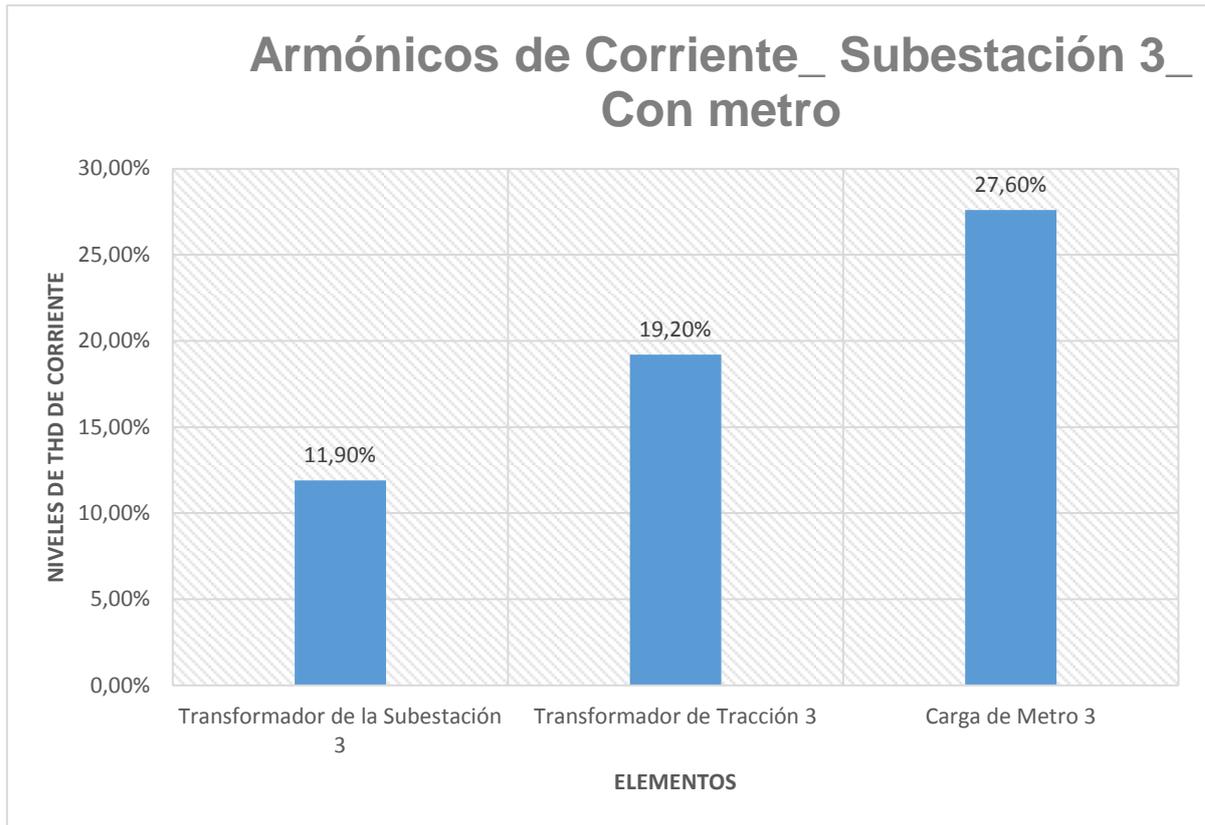


Figura 52: Armónicos de voltaje de Subestación 3

En la figura 52, indica que el nivel de THD de corriente se encuentra superior al 8%, dicho índice se encuentra fuera de los límites, por lo tanto existe armónicos de corriente.

e) Comparación del nivel de armónicos sin metro y con metro.

En la tabla 45 se indica la comparación del nivel de armónicos, para los dos escenarios propuestos anteriormente. De acuerdo a la tabla se puede indicar que cuando se tiene solo las cargas de distribución no presenta niveles superiores de armónicos de voltaje y corriente, mientras que al momento que ingresa el metro al sistema eléctrico existe la generación de niveles altos de armónicos de corriente y de voltaje.

Tabla 45: Comparación de niveles de armónicos

	Armónicos de Voltaje		Armónicos de Corriente	
	Sin Metro	Con Metro	Sin Metro	Con Metro
Subestación 1	2,5%	2,5%	0,95	12,40
Subestación 2	2,3%	2,3%	1,54	25,50
Subestación 3	3,7%	3,7%	0,81	11,90

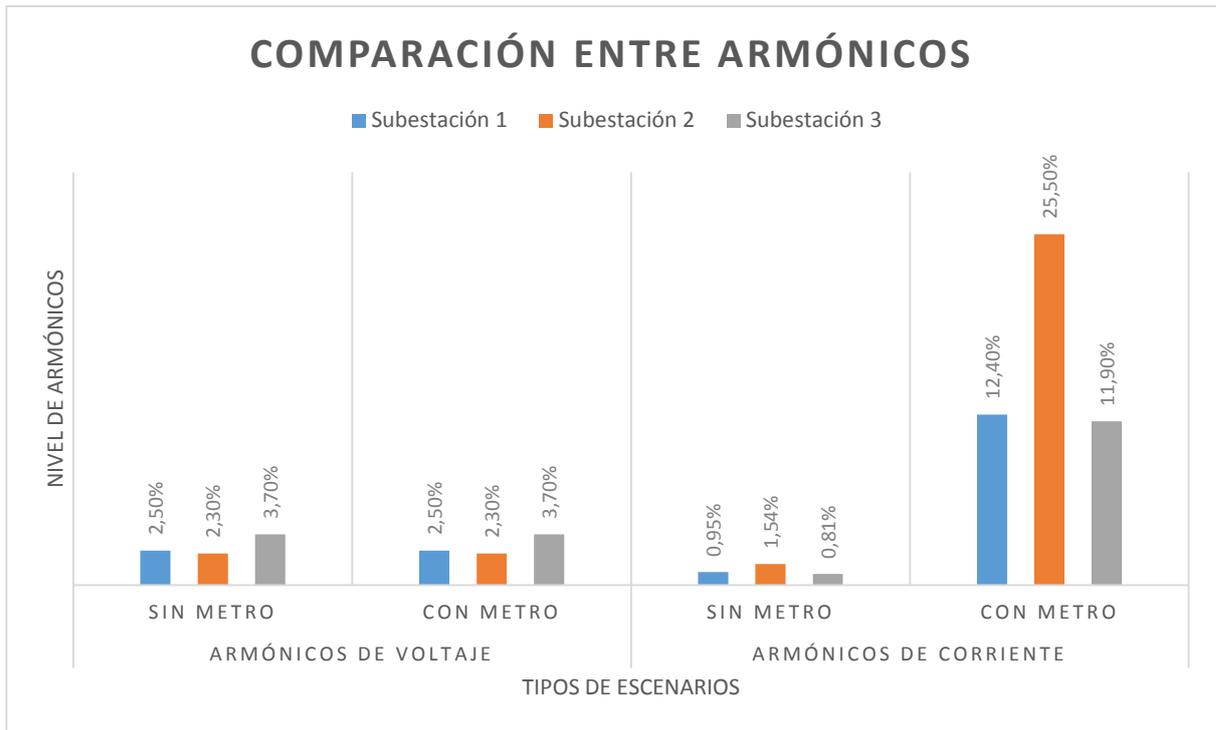


Figura 53: Comparación del nivel de armónicos.

De acuerdo a la figura 53, se puede analizar que los armónicos de voltaje en los dos escenarios se mantienen en un nivel bajo menor al 2%, mientras que el nivel de armónicos de corriente cuando ingresa el metro con un rectificador de 6 pulsos supera los rangos establecidos por la norma. También se puede observar que los armónicos de corriente en la subestación 2 tienen un alto porcentaje, debido a que alimenta más carga.

11.7.2. Análisis de Armónicos con rectificadores de 12 pulsos.

Una vez realizado el análisis de los armónicos con rectificadores de 6 pulsos, se pudo concluir que con el rectificador de 6 pulsos generan armónicos de corriente que sobrepasan la regulación IEEE-519. Los armónicos de corriente son los que afectan la calidad de energía de los equipos y afectan la vida útil de los mismos. Por esta razón es necesario colocar un rectificador de 12 pulsos, el que se obtiene a través de la conexión en serie de dos rectificadores de 6 pulsos alimentados por transformadores de diferente tipo de conexión. Este rectificador debe su nombre al hecho de que, en un período de la tensión de alimentación, genera 12 pulsos en el voltaje de la carga. A través de esta conexión, es factible obtener más potencia en la carga, menos armónicas en la tensión de la carga y menos armónicas en las corrientes de entrada.

En la figura 54 se puede visualizar el esquema del rectificador de 12 pulsos que se utiliza en las cargas de tracción, con el objetivo de disminuir los armónicos de corriente.

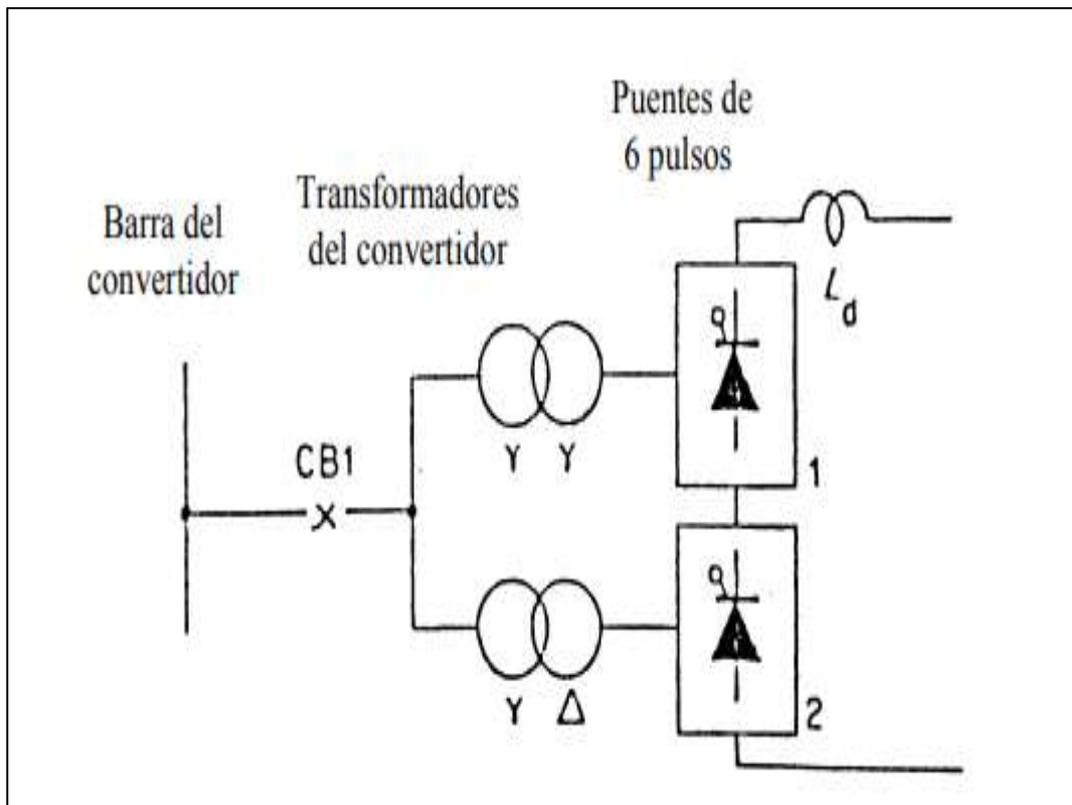


Figura 54: Rectificador de 12 pulsos

Las corrientes de entrada de los rectificadores de 6 pulsos con transformador en estrella y delta tienen las armónicas 5 y 7 con signos cambiados. Por esta razón, al sumar ambas corrientes, estas armónicas se eliminan. Lo mismo sucede con las armónicas 17 y 19. Lo expuesto anteriormente se puede expresar matemáticamente con la ecuación 8.

$$i_a(t) = 2 \left(\frac{2\sqrt{3}}{\pi} \right) I_d \left[\cos wt - \frac{1}{11} \cos 11wt + \frac{1}{13} \cos 13wt - \frac{1}{23} \cos 23wt - \frac{1}{25} \cos 25wt \dots \right]$$

(13)

Este diseño proporciona un excelente rendimiento armónico. Las corrientes armónicas 5 y 7 se cancelan casi por completo.

Por lo expuesto anteriormente, los armónicos que genera el metro al ingresar a la red con el rectificador de 12 pulsos se eliminan, debido a esto no es necesario simular en el software. El espectro de dichos armónicos se indica en la figura 53, donde se observa que los armónicos generados en el metro son despreciables.

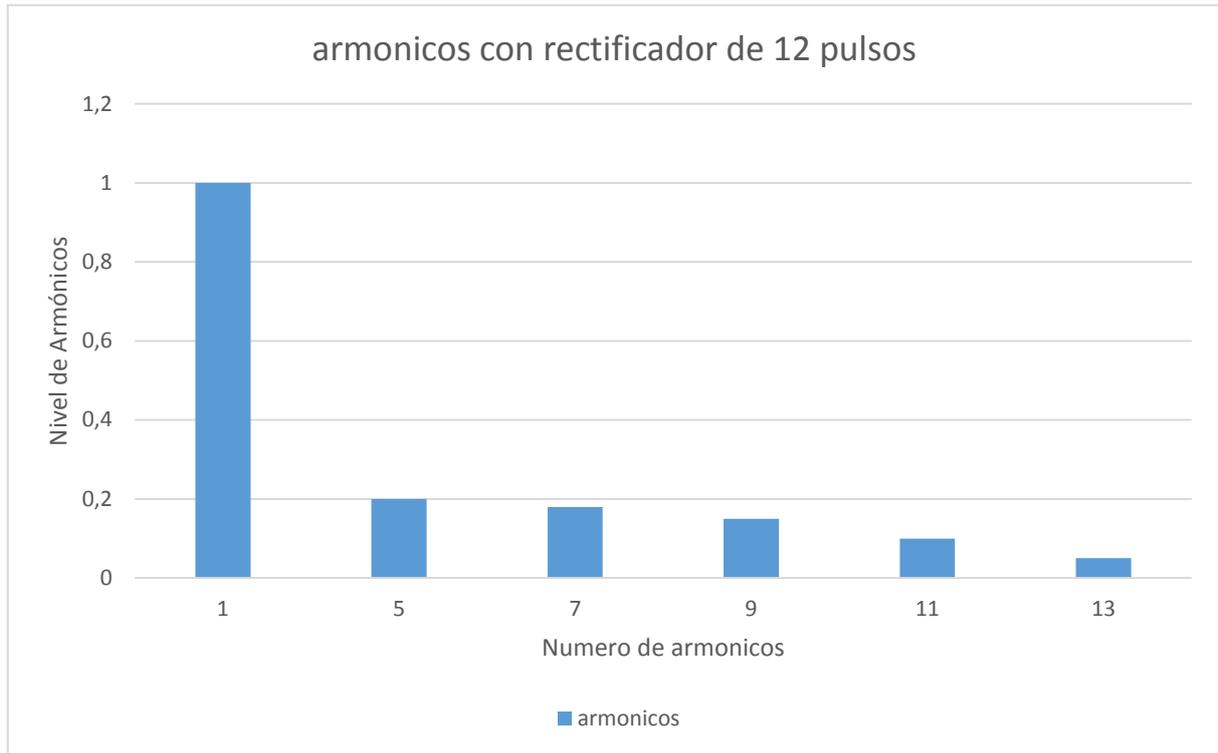


Figura 55: Espectro de frecuencias con Rectificador de 12 pulsos

12. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

12.1. CONCLUSIONES:

- Como resultado de la investigación realizada se indica que la entrada de operación del sistema metro provocaría el incremento de la demanda de las subestaciones de estudio en un 20%, además se observa una distorsión de la curva de demanda diaria residencial típica, debido a que el metro es considerada una carga no lineal. La hora crítica donde se presenta mayor demanda es de 7:00 a 8:30 y de 18:00 a 20:00, a este intervalo de tiempo se le denomina periodo pico en la mañana y en la noche.
- Para la estimación de la demanda cuando ingresa el metro, se le considera una carga variable en el tiempo, por lo tanto para la modelación de la curva cuando ingresa el metro se debe considerar como parámetros la distancia y la velocidad del metro de parada a parada. A partir de esto se calcula las potencias de las cargas de metro para las tres subestaciones con valores de 0.30 MVA, 0.46 MVA y 0.30 MVA respectivamente.
- Desde el punto de vista de cargabilidad, la inclusión del sistema metro alimentado desde la red de 23 kV a 13.8 kV, se observa que no tiene variaciones de voltaje

superiores al 5% en las barras de 23 kV, 13.8 kV y 1 kV, lo cual cumple lo establecido por la regulación 005/18 del ARCONEL, además se concluye que la cargabilidad de los conductores de 29.55% y del transformador se encuentra en buen estado, con una reserva dentro del 25% necesario para evitar futuras sobrecargas.

- El sistema Eléctrico Metro para su funcionamiento usa elementos de electrónica de potencia, principalmente rectificadores de 12 pulsos los mismos que están conformados por dos rectificadores de 6 pulsos conectados en paralelo, los mismos que mantienen dentro del límite tolerable a los armónicos característicos del metro 5, 7,11 y 13.
- Realizando el análisis del contenido armónico en las tres subestaciones se observan que los armónicos de orden 5,7,11 y 13 se encuentran dentro de los límites individuales permitidos que indica la regulación IEEE – 519, por lo que no es necesario la implementación de filtros pasivos al sistema.

12.2. RECOMENDACIONES:

- Es recomendable llevar un registro acerca de la demanda real del sistema de transporte metro con el objetivo de realizar estudios futuros ante el incremento de carga.
- Se recomienda que para el análisis de perfiles de voltaje a nivel de 23 kV y 13.8 kV, se use el límite del 6%, para determinar si existe variaciones de voltaje y así garantizar un nivel adecuado de alimentación para los equipos.
- Como no afecta los armónicos al sistema ya no es necesario el uso de filtros, pero es necesario considerar en el futuro el uso de banco de capacitores

13. BIBLIOGRAFÍA:

- [1] C. Pacheco y E. Paredes, Alternativas de alimentación eléctrica para el metro de Quito, Quito: Escuela Politécnica Nacional, 2014.
- [2] S. Abata y F. Villa, Análisis de Transitorios electromagnéticos en la red del sistema eléctrico del metro de Quito, Quito: Escuela Politécnica Nacional , 2018.
- [3] «Metro de Barcelona,» [En línea]. Available: <https://wefer.com/w5/tmb/ktmb4000.htm>. [Último acceso: 22 Julio 2019].

- [4] L. Aguirre y G. Herrera, Análisis de cargas del Hospital San Vicente de Paúl de la Ciudad de Ibarra y Propuesta para el cumplimiento de la Calidad de Energía según Regulación N° CONELEC 004/01, Ibarra: Universidad Técnica del Norte , 2010.
- [5] CONELEC, «Regulación del Servicio Eléctrico de Distribución No CONELEC 004/01,» *EL DIRECTORIO DEL CONSEJO NACIONAL DE ELECTRICIDAD*, pp. 4-10, 2011.
- [6] «6 pulses vs. 12 and 18 pulse harmonics effect reduction.,» *ARMSTRONG*, pp. 3-6, 2015.
- [7] REITEC, ¿Qué son los variadores?, REITEC, 2017.
- [8] G. Soublette, Sistema de recuperación de energía para la línea 1 del metro de Santiago., Santiago de Chile: Universidad de Chile, 2015.
- [9] J. Sáez, Modelado y Simulación de un sistema de tracción ferroviaria en corriente continua., Leganés: Universidad Carlos III de Madrid, 2016.
- [10] «Managing Harmonic Distortion with Quasi 12 - pulse,» *Danfoss*, p. 4, 2014.
- [11] K. Hink, «Harmonic mitigation of 12 - pulse drivers with unbalanced input line voltages,» *MTE Corporation* , p. 6, 2018.
- [12] J. Arrillaga y W. N.R, Power system harmonics, Wiley , 2003.
- [13] J. Sáez, Modelado y simulación de un sistema de tracción ferroviaria en corriente continua, Leganés: Universidad Carlos III de Madrid, 2016.
- [14] IEEE_519_1992, Recomendaciones Prácticas y Requerimientos de la IEEE para el control de armónicos en Sistemas Eléctricos de Potencia, IEEE, 1992.
- [15] M. Jurado y J. Marín, Estudio y análisis de perturbaciones armónicas en la red de la Empresa Eléctrica Quito debido a la incorporación del sistema metro de Quito, Quito: Escuela Politécnica Nacional, 2017.
- [16] M. G. J. A. JURADO EGAS MAURO FABRICIO, ESTUDIO Y ANALISIS DE PERTURBACIONES ARMONICAS EN LA RED DE LA EMPRESA ELECTRICA QUITO DEBIDO A LA INCORPORACION DEL SISTEMA METRO QUITO, QUITO: ESCUELA POLITECNICA NACIONAL, 2017.

- [17] I. Herrera y M. Rios, «Cálculo de demanda eléctrica de un sistema de tren cercanías,» *Scientia et Technica* , vol. XV, nº 41, p. 6, 2010.

14. ANEXOS

14.1. Diagrama esquemático del metro para alimentación e interconexión

14.2. Diagrama unifilar eléctrico del metro para alimentación e interconexión

14.3. Diagrama eléctrico del metro con subestaciones.

14.4. Diagrama de estudio de flujos de potencia sin metro.

14.5. Diagrama de estudio de flujos de potencia con metro.

14.6. Diagrama de estudio de flujos de armónicos con metro.

14.7. Datos del metro para cada subestación.

14.7.1 Subestación 1

TRANSFORMADOR 1			
HORAS	IDA MW	VUELTA MW	TOTAL MW
7:00:36.488	0,2195	0	0,22
7:10:36.488	0,1097	0	0,11
7:20:36.488	0	0	0,00
7:30:36.488	0	0,1097	0,11
7:40:36.488	0,1097	0	0,11
7:50:36.488	0	0	0,00
8:00:36.488	0	0,1097	0,11
8:10:36.488	0,1097	0	0,11
8:20:36.488	0	0	0,00
8:30:36.489	0	0,1097	0,11
8:40:36.490	0	0	0,00
8:50:36.488	0	0	0,00
9:00:36.488	0	0,1097	0,11
9:10:36.488	0	0	0,00
9:20:36.488	0	0	0,00
9:30:36.488	0	0,1097	0,11
9:40:36.488	0	0	0,00
9:50:36.488	0	0	0,00
10:00:36.488	0	0,1097	0,11
10:10:36.488	0	0	0,00
10:20:36.488	0	0	0,00
10:30:36.488	0	0,1097	0,11
10:40:36.488	0	0	0,00
10:50:36.488	0	0	0,00
11:00:36.488	0	0,1097	0,11
11:10:36.488	0	0	0,00
11:20:36.488	0	0	0,00
11:30:36.488	0	0,1097	0,11
11:40:36.488	0	0	0,00
11:50:36.488	0	0	0,00
12:00:36.488	0	0,1097	0,11
12:10:36.488	0	0	0,00
12:20:36.488	0	0	0,00
12:30:36.488	0	0,1097	0,11
12:40:36.488	0	0	0,00
12:50:36.488	0	0	0,00
13:00:36.488	0	0,1097	0,11
13:10:36.488	0	0	0,00
13:20:36.488	0	0	0,00
13:30:36.488	0	0,1097	0,11

13:40:36.488	0	0	0,00
13:50:36.488	0	0	0,00
14:00:36.488	0	0,1097	0,11
14:10:36.488	0	0	0,00
14:20:36.488	0	0	0,00
14:30:36.488	0	0,1097	0,11
14:40:36.488	0	0	0,00
14:50:36.488	0	0	0,00
15:00:36.488	0	0,1097	0,11
15:10:36.488	0	0	0,00
15:20:36.488	0	0	0,00
15:30:36.488	0	0,1097	0,11
15:40:36.488	0	0	0,00
15:50:36.488	0	0	0,00
16:00:36.488	0	0,1097	0,11
16:10:36.488	0	0	0,00
16:20:36.488	0	0	0,00
16:30:36.488	0	0,1097	0,11
16:40:36.488	0	0	0,00
16:50:36.488	0	0	0,00
17:00:36.488	0	0,1097	0,11
17:10:36.488	0	0	0,00
17:20:36.488	0	0	0,00
17:30:36.488	0	0,1097	0,11
17:40:36.488	0	0	0,00
17:50:36.488	0	0	0,00
18:00:36.488	0	0,1097	0,11
18:10:36.488	0	0	0,00
18:20:36.488	0	0	0,00
18:30:36.488	0	0,1097	0,11
18:40:36.488	0	0	0,00
18:50:36.488	0	0	0,00
19:00:36.488	0,2195	0	0,22
19:10:36.488	0,1097	0	0,11
19:20:36.488	0	0	0,00
19:30:36.488	0	0,1097	0,11
19:40:36.488	0,1097	0	0,11
19:50:36.488	0	0	0,00
20:00:36.488	0	0,1097	0,11
20:10:36.488	0,1097	0	0,11
20:20:36.488	0	0	0,00
20:30:36.488	0	0,1097	0,11
20:40:36.488	0,1097	0	0,11

Figura 56: Datos del metro para la subestación 1

14.7.2 Subestación 2

TRANSFORMADOR 2			
HORAS	IDA	VUELTA	TOTAL
7:00:36.488	0	0	0,00
7:10:36.488	0,1204	0,1029	0,22
7:20:36.488	0,2233	0,2233	0,45
7:30:36.488	0,1029	0,1204	0,22
7:40:36.488	0,1204	0,1029	0,22
7:50:36.488	0,2233	0,2233	0,45
8:00:36.488	0,1029	0,1204	0,22
8:10:36.488	0,1204	0,10	0,22
8:20:36.488	0,2233	0,2233	0,45
8:30:36.489	0,1029	0,1204	0,22
8:40:36.490	0,1204	0,1029	0,22
8:50:36.488	0,1029	0,1204	0,22
9:00:36.488	0	0	0,00
9:10:36.488	0,1204	0,1029	0,22
9:20:36.488	0,1029	0,1204	0,22
9:30:36.488	0	0	0,00
9:40:36.488	0,1204	0,1029	0,22
9:50:36.488	0,10	0,1204	0,22
10:00:36.488	0	0	0,00
10:10:36.488	0,1204	0,1029	0,22
10:20:36.488	0,10	0,1204	0,22
10:30:36.488	0	0	0,00
10:40:36.488	0,1204	0,1029	0,22
10:50:36.488	0,1029	0,1204	0,22
11:00:36.488	0	0	0,00
11:10:36.488	0,1204	0,1029	0,22
11:20:36.488	0,1029	0,1204	0,22
11:30:36.488	0	0	0,00

11:40:36.488	0,1204	0,1029	0,22
11:50:36.488	0,1029	0,1204	0,22
12:00:36.488	0	0	0,00
12:10:36.488	0,1204	0,1029	0,22
12:20:36.488	0,1029	0,1204	0,22
12:30:36.488	0	0	0,00
12:40:36.488	0,1204	0,1029	0,22
12:50:36.488	0,1029	0,1204	0,22
13:00:36.488	0	0	0,00
13:10:36.488	0,1204	0,1029	0,22
13:20:36.488	0,1029	0,1204	0,22
13:30:36.488	0	0	0,00
13:40:36.488	0,1204	0,1029	0,22
13:50:36.488	0,1029	0,1204	0,22
14:00:36.488	0	0	0,00
14:10:36.488	0,1204	0,1029	0,22
14:20:36.488	0,1029	0,1204	0,22
14:30:36.488	0	0	0,00
14:40:36.488	0,1204	0,1029	0,22
14:50:36.488	0,1029	0,1204	0,22
15:00:36.488	0	0	0,00
15:10:36.488	0,1204	0,1029	0,22
15:20:36.488	0,1029	0,1204	0,22
15:30:36.488	0	0	0,00
15:40:36.488	0,1204	0,1029	0,22
15:50:36.488	0,1029	0,1204	0,22
16:00:36.488	0	0	0,00
16:10:36.488	0,1204	0,1029	0,22
16:20:36.488	0,1029	0,1204	0,22
16:30:36.488	0	0	0,00
16:40:36.488	0,1204	0,1029	0,22
16:50:36.488	0,1029	0,1204	0,22

17:00:36.488	0	0	0,00
17:10:36.488	0,1204	0,1029	0,22
17:20:36.488	0,1029	0,1204	0,22
17:30:36.488	0	0	0,00
17:40:36.488	0,1204	0,1029	0,22
17:50:36.488	0,1029	0,1204	0,22
18:00:36.488	0	0	0,00
18:10:36.488	0,1204	0,1029	0,22
18:20:36.488	0,1029	0,1204	0,22
18:30:36.488	0	0	0,00
18:40:36.488	0,1204	0,1029	0,22
18:50:36.488	0,1029	0,1204	0,22
19:00:36.488	0	0	0,00
19:10:36.488	0,1204	0,1029	0,22
19:20:36.488	0,2233	0,2233	0,45
19:30:36.488	0,1029	0,1204	0,22
19:40:36.488	0,1204	0,1029	0,22
19:50:36.488	0,2233	0,2233	0,45
20:00:36.488	0,1029	0,1204	0,22
20:10:36.488	0,1204	0,1029	0,22
20:20:36.488	0,2233	0,2233	0,45
20:30:36.488	0,1029	0,1204	0,22
20:40:36.488	0,1204	0,1029	0,22
20:50:36.488	0,2233	0,2233	0,45
21:00:36.488	0,1029	0,1204	0,22

Figura 57: Datos del metro para la subestación 2

14.7.3 Subestación 3

TRANSFORMADOR 3			
HORAS	IDA	VUELTA	TOTAL
7:00:36.488	0	0,1495	0,15
7:10:36.488	0	0,0748	0,07
7:20:36.488	0	0	0,00
7:30:36.488	0,0748	0	0,07
7:40:36.488	0	0,0748	0,07
7:50:36.488	0	0	0,00
8:00:36.488	0,0748	0	0,07
8:10:36.488	0	0,0748	0,07
8:20:36.488	0	0	0,00
8:30:36.489	0,0748	0	0,07
8:40:36.490	0	0	0,00
8:50:36.488	0	0	0,00
9:00:36.488	0,0748	0	0,07
9:10:36.488	0	0	0,00
9:20:36.488	0	0	0,00
9:30:36.488	0,0748	0	0,07
9:40:36.488	0	0	0,00
9:50:36.488	0	0	0,00
10:00:36.488	0,0748	0	0,07
10:10:36.488	0	0	0,00
10:20:36.488	0	0	0,00
10:30:36.488	0,0748	0	0,07
10:40:36.488	0	0	0,00
10:50:36.488	0	0	0,00
11:00:36.488	0,0748	0	0,07
11:10:36.488	0	0	0,00
11:20:36.488	0	0	0,00

11:30:36.488	0,0748	0	0,07
11:40:36.488	0	0	0,00
11:50:36.488	0	0	0,00
12:00:36.488	0,0748	0	0,07
12:10:36.488	0	0	0,00
12:20:36.488	0	0	0,00
12:30:36.488	0,0748	0	0,07
12:40:36.488	0	0	0,00
12:50:36.488	0	0	0,00
13:00:36.488	0,0748	0	0,07
13:10:36.488	0	0	0,00
13:20:36.488	0	0	0,00
13:30:36.488	0,0748	0	0,07
13:40:36.488	0	0	0,00
13:50:36.488	0	0	0,00
14:00:36.488	0,0748	0	0,07
14:10:36.488	0	0	0,00
14:20:36.488	0	0	0,00
14:30:36.488	0,0748	0	0,07
14:40:36.488	0	0	0,00
14:50:36.488	0	0	0,00
15:00:36.488	0,0748	0	0,07
15:10:36.488	0	0	0,00
15:20:36.488	0	0	0,00
15:30:36.488	0,0748	0	0,07
15:40:36.488	0	0	0,00
15:50:36.488	0	0	0,00
16:00:36.488	0,0748	0	0,07
16:10:36.488	0	0	0,00
16:20:36.488	0	0	0,00

16:30:36.488	0,0748	0	0,07
16:40:36.488	0	0	0,00
16:50:36.488	0	0	0,00
17:00:36.488	0,0748	0	0,07
17:10:36.488	0	0	0,00
17:20:36.488	0	0	0,00
17:30:36.488	0,0748	0	0,07
17:40:36.488	0	0	0,00
17:50:36.488	0	0	0,00
18:00:36.488	0,0748	0	0,07
18:10:36.488	0	0	0,00
18:20:36.488	0	0	0,00
18:30:36.488	0,0748	0	0,07
18:40:36.488	0	0	0,00
18:50:36.488	0	0	0,00
19:00:36.488	0	0,1495	0,15
19:10:36.488	0	0,07476	0,07
19:20:36.488	0	0	0,00
19:30:36.488	0,0748	0	0,07
19:40:36.488	0	0,0748	0,07
19:50:36.488	0	0	0,00
20:00:36.488	0,0748	0	0,07
20:10:36.488	0	0,0748	0,07
20:20:36.488	0	0	0,00
20:30:36.488	0,0748	0	0,07
20:40:36.488	0	0,0748	0,07
20:50:36.488	0	0	0,00
21:00:36.488	0,0748	0	0,07

Figura 58: Datos del metro para la subestación 3

14.8. Datos para curva total con residencial y metro

14.8.1 Subestación 1

Hora	Residencial MW	METRO MW	Total MW
0:00:36.488	0,31	0,00	0,31
0:10:36.488	0,31	0,00	0,31
0:20:36.488	0,31	0,00	0,31
0:30:36.488	0,32	0,00	0,32
0:40:36.488	0,32	0,00	0,32
0:50:36.488	0,32	0,00	0,32
1:00:36.488	0,33	0,00	0,33
1:10:36.488	0,33	0,00	0,33
1:20:36.488	0,33	0,00	0,33
1:30:36.488	0,34	0,00	0,34
1:40:36.488	0,34	0,00	0,34
1:50:36.488	0,34	0,00	0,34
2:00:36.488	0,35	0,00	0,35
2:10:36.488	0,35	0,00	0,35
2:20:36.488	0,35	0,00	0,35
2:30:36.488	0,36	0,00	0,36
2:40:36.488	0,36	0,00	0,36
2:50:36.488	0,36	0,00	0,36
3:00:36.488	0,41	0,00	0,41
3:10:36.488	0,41	0,00	0,41
3:20:36.488	0,45	0,00	0,45
3:30:36.488	0,45	0,00	0,45
3:40:36.488	0,46	0,00	0,46
3:50:36.488	0,49	0,00	0,49
4:00:36.488	0,51	0,00	0,51
4:10:36.488	0,54	0,00	0,54
4:20:36.488	0,56	0,00	0,56
4:30:36.488	0,62	0,00	0,62
4:40:36.488	0,63	0,00	0,63
4:50:36.488	0,65	0,00	0,65
5:00:36.488	0,67	0,00	0,67
5:10:36.488	0,72	0,00	0,72
5:20:36.488	0,73	0,00	0,73
5:30:36.488	0,75	0,00	0,75
5:40:36.488	0,79	0,00	0,79
5:50:36.488	0,80	0,00	0,80
6:00:36.488	0,80	0,00	0,80
6:10:36.488	0,80	0,00	0,80
6:20:36.488	0,81	0,00	0,81

6:30:36.488	0,81	0,00	0,81
6:40:36.488	0,82	0,00	0,82
6:50:36.488	0,85	0,00	0,85
7:00:36.488	0,86	0,22	1,08
7:10:36.488	0,87	0,11	0,98
7:20:36.488	0,87	0,00	0,87
7:30:36.488	0,88	0,11	0,99
7:40:36.488	0,88	0,11	0,99
7:50:36.488	0,88	0,00	0,88
8:00:36.488	0,89	0,11	1,00
8:10:36.488	0,90	0,11	1,01
8:20:36.488	0,92	0,00	0,92
8:30:36.489	0,95	0,11	1,06
8:40:36.490	0,96	0,00	0,96
8:50:36.488	0,97	0,00	0,97
9:00:36.488	0,96	0,11	1,07
9:10:36.488	0,95	0,00	0,95
9:20:36.488	0,92	0,00	0,92
9:30:36.488	0,91	0,11	1,02
9:40:36.488	0,90	0,00	0,90
9:50:36.488	0,90	0,00	0,90
10:00:36.488	0,89	0,11	1,00
10:10:36.488	0,87	0,00	0,87
10:20:36.488	0,86	0,00	0,86
10:30:36.488	0,85	0,11	0,96
10:40:36.488	0,85	0,00	0,85
10:50:36.488	0,84	0,00	0,84
11:00:36.488	0,85	0,11	0,96
11:10:36.488	0,89	0,00	0,89
11:20:36.488	0,90	0,00	0,90
11:30:36.488	0,89	0,11	1,00
11:40:36.488	0,87	0,00	0,87
11:50:36.488	0,86	0,00	0,86
12:00:36.488	0,85	0,11	0,96
12:10:36.488	0,87	0,00	0,87
12:20:36.488	0,86	0,00	0,86
12:30:36.488	0,85	0,11	0,96
12:40:36.488	0,88	0,00	0,88
12:50:36.488	0,87	0,00	0,87
13:00:36.488	0,89	0,11	1,00
13:10:36.488	0,90	0,00	0,90
13:20:36.488	0,87	0,00	0,87
13:30:36.488	0,89	0,11	1,00
13:40:36.488	0,88	0,00	0,88

13:50:36.488	0,87	0,00	0,87
14:00:36.488	0,87	0,11	0,98
14:10:36.488	0,86	0,00	0,86
14:20:36.488	0,84	0,00	0,84
14:30:36.488	0,84	0,11	0,95
14:40:36.488	0,82	0,00	0,82
14:50:36.488	0,79	0,00	0,79
15:00:36.488	0,78	0,11	0,89
15:10:36.488	0,78	0,00	0,78
15:20:36.488	0,78	0,00	0,78
15:30:36.488	0,77	0,11	0,88
15:40:36.488	0,77	0,00	0,77
15:50:36.488	0,77	0,00	0,77
16:00:36.488	0,76	0,11	0,87
16:10:36.488	0,76	0,00	0,76
16:20:36.488	0,76	0,00	0,76
16:30:36.488	0,75	0,11	0,86
16:40:36.488	0,75	0,00	0,75
16:50:36.488	0,74	0,00	0,74
17:00:36.488	0,73	0,11	0,84
17:10:36.488	0,72	0,00	0,72
17:20:36.488	0,69	0,00	0,69
17:30:36.488	0,67	0,11	0,78
17:40:36.488	0,66	0,00	0,66
17:50:36.488	0,65	0,00	0,65
18:00:36.488	0,66	0,11	0,77
18:10:36.488	0,68	0,00	0,68
18:20:36.488	0,69	0,00	0,69
18:30:36.488	0,70	0,11	0,81
18:40:36.488	0,72	0,00	0,72
18:50:36.488	0,74	0,00	0,74
19:00:36.488	0,76	0,22	0,98
19:10:36.488	0,79	0,11	0,90
19:20:36.488	0,82	0,00	0,82
19:30:36.488	0,84	0,11	0,95
19:40:36.488	0,96	0,11	1,07
19:50:36.488	0,99	0,00	0,99
20:00:36.488	1,04	0,11	1,15
20:10:36.488	1,05	0,11	1,16
20:20:36.488	1,06	0,00	1,06
20:30:36.488	1,07	0,11	1,18
20:40:36.488	1,10	0,11	1,21
20:50:36.488	1,11	0,00	1,11
21:00:36.488	1,10	0,11	1,21

21:10:36.488	1,07	0,00	1,07
21:20:36.488	1,06	0,00	1,06
21:30:36.488	1,03	0,00	1,03
21:40:36.488	1,01	0,00	1,01
21:50:36.488	0,98	0,00	0,98
22:00:36.488	0,97	0,00	0,97
22:10:36.488	0,95	0,00	0,95
22:20:36.488	0,92	0,00	0,92
22:30:36.488	0,87	0,00	0,87
22:40:36.488	0,77	0,00	0,77
22:50:36.488	0,65	0,00	0,65
23:00:36.488	0,61	0,00	0,61
23:10:36.488	0,55	0,00	0,55
23:20:36.488	0,45	0,00	0,45
23:30:36.488	0,44	0,00	0,44
23:40:36.488	0,37	0,00	0,37
23:50:36.488	0,31	0,00	0,31

Figura 59: Datos de residencial y metro para la subestación 1

14.8.2 Subestación 2

Curva Residencial y del metro en el Transformador 2			
<i>Hora</i>	<i>Residencial MW</i>	<i>METRO MW</i>	<i>Total MW</i>
0:00:36.488	0,31	0,00	0,31
0:10:36.488	0,30	0,00	0,30
0:20:36.488	0,29	0,00	0,29
0:30:36.488	0,27	0,00	0,27
0:40:36.488	0,26	0,00	0,26
0:50:36.488	0,26	0,00	0,26
1:00:36.488	0,26	0,00	0,26
1:10:36.488	0,26	0,00	0,26
1:20:36.488	0,25	0,00	0,25
1:30:36.488	0,25	0,00	0,25
1:40:36.488	0,25	0,00	0,25
1:50:36.488	0,24	0,00	0,24
2:00:36.488	0,25	0,00	0,25
2:10:36.488	0,27	0,00	0,27
2:20:36.488	0,30	0,00	0,30
2:30:36.488	0,31	0,00	0,31
2:40:36.488	0,31	0,00	0,31
2:50:36.488	0,31	0,00	0,31
3:00:36.488	0,31	0,00	0,31
3:10:36.488	0,31	0,00	0,31

3:20:36.488	0,31	0,00	0,31
3:30:36.488	0,30	0,00	0,30
3:40:36.488	0,31	0,00	0,31
3:50:36.488	0,31	0,00	0,31
4:00:36.488	0,31	0,00	0,31
4:10:36.488	0,38	0,00	0,38
4:20:36.488	0,45	0,00	0,45
4:30:36.488	0,47	0,00	0,47
4:40:36.488	0,47	0,00	0,47
4:50:36.488	0,51	0,00	0,51
5:00:36.488	0,57	0,00	0,57
5:10:36.488	0,56	0,00	0,56
5:20:36.488	0,56	0,00	0,56
5:30:36.488	0,56	0,00	0,56
5:40:36.488	0,56	0,00	0,56
5:50:36.488	0,55	0,00	0,55
6:00:36.488	0,55	0,00	0,55
6:10:36.488	0,57	0,00	0,57
6:20:36.488	0,57	0,00	0,57
6:30:36.488	0,51	0,00	0,51
6:40:36.488	0,50	0,00	0,50
6:50:36.488	0,52	0,00	0,52
7:00:36.488	0,56	0,00	0,56
7:10:36.488	0,53	0,22	0,76
7:20:36.488	0,60	0,45	1,05
7:30:36.488	0,64	0,22	0,87
7:40:36.488	0,64	0,22	0,87
7:50:36.488	0,65	0,45	1,10
8:00:36.488	0,78	0,22	1,00
8:10:36.488	0,87	0,22	1,09
8:20:36.488	0,90	0,45	1,35
8:30:36.489	0,92	0,22	1,14
8:40:36.490	0,92	0,22	1,14
8:50:36.488	0,92	0,22	1,14
9:00:36.488	0,93	0,00	0,93
9:10:36.488	0,93	0,22	1,15
9:20:36.488	0,93	0,22	1,15
9:30:36.488	0,93	0,00	0,93
9:40:36.488	0,94	0,22	1,16
9:50:36.488	0,94	0,22	1,16
10:00:36.488	0,94	0,00	0,94
10:10:36.488	0,95	0,22	1,17
10:20:36.488	0,96	0,22	1,18
10:30:36.488	0,97	0,00	0,97

10:40:36.488	0,97	0,22	1,20
10:50:36.488	0,97	0,22	1,20
11:00:36.488	0,98	0,00	0,98
11:10:36.488	0,98	0,22	1,20
11:20:36.488	0,98	0,22	1,20
11:30:36.488	0,97	0,00	0,97
11:40:36.488	0,94	0,22	1,16
11:50:36.488	0,90	0,22	1,12
12:00:36.488	0,92	0,00	0,92
12:10:36.488	0,93	0,22	1,15
12:20:36.488	0,92	0,22	1,15
12:30:36.488	0,90	0,00	0,90
12:40:36.488	0,87	0,22	1,09
12:50:36.488	0,86	0,22	1,08
13:00:36.488	0,83	0,00	0,83
13:10:36.488	0,76	0,22	0,99
13:20:36.488	0,80	0,22	1,02
13:30:36.488	0,78	0,00	0,78
13:40:36.488	0,76	0,22	0,98
13:50:36.488	0,77	0,22	0,99
14:00:36.488	0,76	0,00	0,76
14:10:36.488	0,76	0,22	0,99
14:20:36.488	0,79	0,22	1,01
14:30:36.488	0,81	0,00	0,81
14:40:36.488	0,89	0,22	1,11
14:50:36.488	0,94	0,22	1,17
15:00:36.488	0,95	0,00	0,95
15:10:36.488	0,96	0,22	1,18
15:20:36.488	0,97	0,22	1,19
15:30:36.488	0,98	0,00	0,98
15:40:36.488	0,98	0,22	1,20
15:50:36.488	0,99	0,22	1,21
16:00:36.488	1,07	0,00	1,07
16:10:36.488	1,16	0,22	1,38
16:20:36.488	1,17	0,22	1,39
16:30:36.488	1,18	0,00	1,18
16:40:36.488	1,18	0,22	1,40
16:50:36.488	1,23	0,22	1,45
17:00:36.488	1,23	0,00	1,23
17:10:36.488	1,25	0,22	1,47
17:20:36.488	1,29	0,22	1,51
17:30:36.488	1,32	0,00	1,32
17:40:36.488	1,32	0,22	1,54
17:50:36.488	1,34	0,22	1,56

18:00:36.488	1,34	0,00	1,34
18:10:36.488	1,35	0,22	1,57
18:20:36.488	1,35	0,22	1,57
18:30:36.488	1,35	0,00	1,35
18:40:36.488	1,35	0,22	1,57
18:50:36.488	1,35	0,22	1,57
19:00:36.488	1,36	0,00	1,36
19:10:36.488	1,36	0,22	1,58
19:20:36.488	1,37	0,45	1,82
19:30:36.488	1,36	0,22	1,59
19:40:36.488	1,42	0,22	1,64
19:50:36.488	1,62	0,45	2,07
20:00:36.488	1,63	0,22	1,85
20:10:36.488	1,64	0,22	1,86
20:20:36.488	1,59	0,45	2,04
20:30:36.488	1,52	0,22	1,75
20:40:36.488	1,52	0,22	1,75
20:50:36.488	1,53	0,45	1,97
21:00:36.488	1,50	0,22	1,72
21:10:36.488	1,39	0,00	1,39
21:20:36.488	1,35	0,00	1,35
21:30:36.488	1,34	0,00	1,34
21:40:36.488	1,34	0,00	1,34
21:50:36.488	1,32	0,00	1,32
22:00:36.488	1,27	0,00	1,27
22:10:36.488	0,87	0,00	0,87
22:20:36.488	0,76	0,00	0,76
22:30:36.488	0,76	0,00	0,76
22:40:36.488	0,75	0,00	0,75
22:50:36.488	0,72	0,00	0,72
23:00:36.488	0,70	0,00	0,70
23:10:36.488	0,63	0,00	0,63
23:20:36.488	0,55	0,00	0,55
23:30:36.488	0,39	0,00	0,39
23:40:36.488	0,30	0,00	0,30
23:50:36.488	0,30	0,00	0,30

Figura 60: Datos de residencial y metro para la subestación 2

14.8.2 Subestación 3

Curva Residencial y del metro en el Trafo 3			
<i>Hora</i>	<i>Residencial MW</i>	<i>METRO MW</i>	<i>Total MW</i>
0:00:36.488	0,19	0,00	0,19
0:10:36.488	0,19	0,00	0,19
0:20:36.488	0,19	0,00	0,19
0:30:36.488	0,18	0,00	0,18
0:40:36.488	0,18	0,00	0,18
0:50:36.488	0,18	0,00	0,18
1:00:36.488	0,15	0,00	0,15
1:10:36.488	0,15	0,00	0,15
1:20:36.488	0,15	0,00	0,15
1:30:36.488	0,14	0,00	0,14
1:40:36.488	0,14	0,00	0,14
1:50:36.488	0,14	0,00	0,14
2:00:36.488	0,12	0,00	0,12
2:10:36.488	0,12	0,00	0,12
2:20:36.488	0,12	0,00	0,12
2:30:36.488	0,11	0,00	0,11
2:40:36.488	0,11	0,00	0,11
2:50:36.488	0,11	0,00	0,11
3:00:36.488	0,11	0,00	0,11
3:10:36.488	0,13	0,00	0,13
3:20:36.488	0,13	0,00	0,13
3:30:36.488	0,13	0,00	0,13
3:40:36.488	0,14	0,00	0,14
3:50:36.488	0,14	0,00	0,14
4:00:36.488	0,14	0,00	0,14
4:10:36.488	0,17	0,00	0,17
4:20:36.488	0,17	0,00	0,17
4:30:36.488	0,17	0,00	0,17
4:40:36.488	0,19	0,00	0,19
4:50:36.488	0,19	0,00	0,19
5:00:36.488	0,19	0,00	0,19
5:10:36.488	0,21	0,00	0,21
5:20:36.488	0,21	0,00	0,21
5:30:36.488	0,21	0,00	0,21
5:40:36.488	0,22	0,00	0,22
5:50:36.488	0,25	0,00	0,25
6:00:36.488	0,29	0,00	0,29
6:10:36.488	0,32	0,00	0,32
6:20:36.488	0,39	0,00	0,39
6:30:36.488	0,45	0,00	0,45
6:40:36.488	0,49	0,00	0,49
6:50:36.488	0,50	0,00	0,50
7:00:36.488	0,53	0,15	0,68

7:10:36.488	0,54	0,07	0,62
7:20:36.488	0,53	0,00	0,53
7:30:36.488	0,56	0,07	0,63
7:40:36.488	0,54	0,07	0,61
7:50:36.488	0,53	0,00	0,53
8:00:36.488	0,52	0,07	0,59
8:10:36.488	0,53	0,07	0,60
8:20:36.488	0,54	0,00	0,54
8:30:36.489	0,54	0,07	0,61
8:40:36.490	0,58	0,00	0,58
8:50:36.488	0,58	0,00	0,58
9:00:36.488	0,60	0,07	0,67
9:10:36.488	0,60	0,00	0,60
9:20:36.488	0,58	0,00	0,58
9:30:36.488	0,53	0,07	0,60
9:40:36.488	0,45	0,00	0,45
9:50:36.488	0,39	0,00	0,39
10:00:36.488	0,37	0,07	0,44
10:10:36.488	0,35	0,00	0,35
10:20:36.488	0,38	0,00	0,38
10:30:36.488	0,39	0,07	0,47
10:40:36.488	0,42	0,00	0,42
10:50:36.488	0,43	0,00	0,43
11:00:36.488	0,44	0,07	0,52
11:10:36.488	0,43	0,00	0,43
11:20:36.488	0,41	0,00	0,41
11:30:36.488	0,42	0,07	0,49
11:40:36.488	0,41	0,00	0,41
11:50:36.488	0,40	0,00	0,40
12:00:36.488	0,40	0,07	0,47
12:10:36.488	0,43	0,00	0,43
12:20:36.488	0,39	0,00	0,39
12:30:36.488	0,45	0,07	0,53
12:40:36.488	0,49	0,00	0,49
12:50:36.488	0,50	0,00	0,50
13:00:36.488	0,53	0,07	0,61
13:10:36.488	0,54	0,00	0,54
13:20:36.488	0,53	0,00	0,53
13:30:36.488	0,56	0,07	0,63
13:40:36.488	0,48	0,00	0,48
13:50:36.488	0,48	0,00	0,48
14:00:36.488	0,48	0,07	0,55
14:10:36.488	0,49	0,00	0,49
14:20:36.488	0,54	0,00	0,54
14:30:36.488	0,54	0,07	0,61
14:40:36.488	0,58	0,00	0,58
14:50:36.488	0,58	0,00	0,58
15:00:36.488	0,60	0,07	0,67
15:10:36.488	0,60	0,00	0,60

15:20:36.488	0,63	0,00	0,63
15:30:36.488	0,63	0,07	0,70
15:40:36.488	0,65	0,00	0,65
15:50:36.488	0,69	0,00	0,69
16:00:36.488	0,71	0,07	0,78
16:10:36.488	0,73	0,00	0,73
16:20:36.488	0,75	0,00	0,75
16:30:36.488	0,77	0,07	0,84
16:40:36.488	0,79	0,00	0,79
16:50:36.488	0,80	0,00	0,80
17:00:36.488	0,82	0,07	0,89
17:10:36.488	0,87	0,00	0,87
17:20:36.488	0,90	0,00	0,90
17:30:36.488	0,92	0,07	0,99
17:40:36.488	0,93	0,00	0,93
17:50:36.488	0,93	0,00	0,93
18:00:36.488	0,93	0,07	1,01
18:10:36.488	0,99	0,00	0,99
18:20:36.488	1,01	0,00	1,01
18:30:36.488	1,05	0,07	1,12
18:40:36.488	1,08	0,00	1,08
18:50:36.488	1,05	0,00	1,05
19:00:36.488	1,04	0,15	1,19
19:10:36.488	1,01	0,07	1,08
19:20:36.488	1,02	0,00	1,02
19:30:36.488	1,00	0,07	1,08
19:40:36.488	0,97	0,07	1,05
19:50:36.488	0,95	0,00	0,95
20:00:36.488	0,96	0,07	1,04
20:10:36.488	0,94	0,07	1,02
20:20:36.488	0,88	0,00	0,88
20:30:36.488	0,91	0,07	0,98
20:40:36.488	0,90	0,07	0,98
20:50:36.488	0,90	0,00	0,90
21:00:36.488	0,92	0,07	0,99
21:10:36.488	0,86	0,00	0,86
21:20:36.488	0,81	0,00	0,81
21:30:36.488	0,79	0,00	0,79
21:40:36.488	0,78	0,00	0,78
21:50:36.488	0,76	0,00	0,76
22:00:36.488	0,73	0,00	0,73
22:10:36.488	0,66	0,00	0,66
22:20:36.488	0,34	0,00	0,34
22:30:36.488	0,29	0,00	0,29
22:40:36.488	0,27	0,00	0,27
22:50:36.488	0,25	0,00	0,25
23:00:36.488	0,22	0,00	0,22

Figura 61: Datos de residencial y metro para la subestación 3

14.9. Datos para el comportamiento de carga del metro.

COMPORTAMIENTO DE CARGA DEL METRO	
HORA	MW
9:00	0,03
9:01	0,1097
9:02	0,1097
9:03	0,1097
9:04	0,1097
9:05	0,03
9:06	0,03
9:07	0,1204
9:08	0,1204
9:09	0,1204
9:10	0,1204
9:11	0,03
9:12	0,03
9:13	0,093
9:14	0,093
9:15	0,093
9:16	0,093
9:17	0,03
9:18	0,03
9:19	0,1029
9:20	0,1029
9:21	0,1029
9:22	0,1029
9:23	0,03
9:24	0,03
9:25	0,075
9:26	0,075
9:27	0,075
9:28	0,075
9:29	0,03
9:30	0,03

Figura 62: Datos de residencial y metro para la subestación 3