

UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE



Facultad de Ingeniería en Ciencias Aplicadas
Carrera de Electricidad

**PROPUESTA TÉCNICA PARA LA REDUCCIÓN DE LOS ARMÓNICOS HOMOPOLARES
EN EL CONDUCTOR NEUTRO DE LAS INSTALACIONES ELÉCTRICAS DE LA
FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS.**

Trabajo de grado previo a la obtención del título de Ingeniero Eléctrico

AUTOR:

Bryan Alexander Acosta Martinez

DIRECTOR:

MSc. Olger Gilberto Arellano Bastidas

Ibarra, 2022



UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE

BIBLIOTECA UNIVERSITARIA

AUTORIZACIÓN DE USO Y PUBLICACIÓN A FAVOR DE LA UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE

1. IDENTIFICACIÓN DE LA OBRA

En cumplimiento del Art. 144 de la Ley de Educación Superior, hago la entrega del presente trabajo a la Universidad Técnica del Norte para que sea publicado en el Repositorio Digital Institucional, para lo cual pongo a disposición la siguiente información:

DATOS DE CONTACTO			
CÉDULA DE IDENTIDAD:	1004108583		
APELLIDOS Y NOMBRES:	Acosta Martinez Bryan Alexander		
DIRECCIÓN:	13 de abril y cañar		
EMAIL:	baacostam@utn.edu.ec		
TELÉFONO FIJO:	062 546 861	TELÉFONO MÓVIL:	0963395550

DATOS DE LA OBRA	
TÍTULO:	“PROPUESTA TÉCNICA PARA LA REDUCCIÓN DE LOS ARMÓNICOS HOMOPOLARES EN EL CONDUCTOR NEUTRO DE LAS INSTALACIONES ELÉCTRICAS DE LA FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS”
AUTOR (ES):	Acosta Martinez Bryan Acosta
FECHA: DD/MM/AAAA	19/10/2022
SOLO PARA TRABAJOS DE GRADO	
PROGRAMA:	<input checked="" type="checkbox"/> PREGRADO <input type="checkbox"/> POSGRADO
TITULO POR EL QUE OPTA:	Ingeniero en Electricidad
ASESOR /DIRECTOR:	Ing. Olger Arellano MSc.

2. CONSTANCIAS

El autor manifiesta que la obra objeto de la presente autorización es original y se la desarrolló, sin violar derechos de autor de terceros, por lo tanto, la obra es original y que es el titular de los derechos patrimoniales, por lo que asume la responsabilidad sobre el contenido de la misma y saldrá en defensa de la Universidad en caso de reclamación por parte de terceros.

Ibarra, a los 11 días del mes de noviembre de 2022

EL AUTOR:

A handwritten signature in blue ink, appearing to read 'Bryan Alexander Acosta Martinez', enclosed within a blue oval scribble.

Nombre: Bryan Alexander Acosta Martinez



UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE
FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS

CERTIFICADO DEL DIRECTOR DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Yo, Ing. Olger Arellano MSc. en calidad del director de trabajo de titulación del señor estudiante Acosta Martinez Bryan Alexander CERTIFICO que ha culminado con las normas establecidas para la elaboración del trabajo de titulación titulado "PROPUESTA TÉCNICA PARA LA REDUCCIÓN DE LOS ARMÓNICOS HOMOPOLARES EN EL CONDUCTOR NEUTRO DE LAS INSTALACIONES ELÉCTRICAS DE LA FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS" previo a la obtención del título de Ingeniero en Electricidad, aprobando la defensa, impresión y empastado.



Ing. Olger Arellano MSc.

DIRECTOR DE TRABAJO DE TITULACIÓN

DEDICATORIA

“Si tu solo supieras la magnificencia del 3, 6 y 9, entonces tienes la llave del universo”

Nikola Tesla

Le dedico el resultado de este trabajo a toda mi familia. Principalmente, a mis padres que me apoyaron y contuvieron los momentos malos y en los menos malos. Gracias por enseñarme a afrontar las dificultades sin perder nunca la cabeza ni morir en el intento.

Me han enseñado a ser la persona que soy hoy, mis principios, mis valores, mi perseverancia y mi empeño. Todo esto con una enorme dosis de amor y sin pedir nada a cambio.

También quiero dedicarles este trabajo a mis hermanos: Steven, Alejandro y Katherine. Por su paciencia, por su comprensión, por su empeño, por su fuerza, por su amor, porque los quiero. Realmente, ellos me ayudaron a alcanzar el equilibrio que me permite dar todo mi potencial. Nunca dejaré de estar agradecido por esto.

También, quiero dedicarles este trabajo a mis amados abuelos Heladio Acosta y Rosa Amada Martínez gracias a su sabiduría influyeron en mi la madurez para lograr todos los objetivos en la vida, es para ustedes está tesis en agradecimiento por todo su amor y sus enseñanzas.

AGRADECIMIENTOS

Es un orgullo para mí poder nombrar a todas las personas que de una u otra forma me ayudaron a cumplir esta meta tan anhelada de graduarme en la Carrera de Electricidad. En honor a este orgullo quiero ofrecer mis agradecimientos a:

Primero doy gracias a Dios por darme la voluntad, la fuerza de permitir terminar esta carrera.

Doy gracias a mi familia por ser mi principal apoyo en este proyecto.

Doy gracias al Club de Electricidad y Automatización, por brindarme los conocimientos y el apoyo desde el momento que fui parte de ellos, además por brindarme la oportunidad de dirigirlos como presidente.

De manera especial agradezco a mi tutor el MSc. Olger Arellano por su calidad humana y ayuda para dirigir esta tesis hasta su culminación. A mi asesor, MSc. Ramiro Vásquez por su tiempo invertido en las revisiones de este trabajo.

Doy gracias a mis compañeros o compañeras y en especial al Ing. Marco Ponce que junto a él pudimos sacar adelante este excelente trabajo de grado.

Finalmente, agradezco a mis mentores y que con el tiempo llegaron ser mis amigos por las enseñanzas, momentos compartidos, por haber aportado desde un inicio a mi formación y por ser los mejores consejeros; agradezco a los ingenieros: Diego Pinda, Marco Ponce, Dennys Tuza y a la Lic. Tamara De la Cruz, por todas esas palabras de aliento y consejos que me ayudaron a seguir con la culminación del trabajo de grado.

Gracias, infinitas a todos

Contenido

CAPÍTULO 1	7
1.1 Red eléctrica (bajo voltaje).....	7
1.1.1 Configuración de redes de distribución eléctrica	7
1.1.2 Caracterización de cargas	9
1.2 Armónicos.....	11
1.2.1 Definición de armónicos.....	11
1.2.2 Armónicos de voltaje y corriente	11
1.2.3 Clasificación de armónicos	11
1.3 Armónicos homopolares	13
1.4 Tipos de perturbaciones	15
1.4.1 Caídas de voltaje (Dips o Sags).....	15
1.4.2 Aumento de voltaje (Swells).....	16
1.4.3 Fluctuaciones de voltaje	17
1.4.4 Flicker	17
1.5 Efectos de los armónicos	18
1.5.1 Efectos sobre motores y generadores	19
1.5.2 Efectos sobre los conductores	20
1.5.3 Efectos sobre los equipos de protección y medición	20
1.5.4 Efecto sobre los condensadores- resonancia	21
1.5.5 Efectos sobre equipos eléctricos.....	22
1.6 Mitigación de armónicos	23
1.6.1 Transformador con factor K	23
1.6.2 Transformador en Zigzag.....	24
1.6.3 Transformador con filtro activo.....	25
2 CAPÍTULO 2	27
2.1 Introducción	27
2.2 Descripción del lugar de estudio	27

2.3	Situación actual del sistema eléctrico de la Facultad de Ingeniería de las Ciencias Aplicadas.....	28
2.4	Metodología.....	29
2.5	Requerimientos de equipos de utilizar	30
2.6	Equipo de medición	30
2.6.1	Características y capacidad.....	31
2.6.2	Características generales.	31
2.6.3	Capacidad de medición	32
2.6.4	Diagramas de conexiones principales.....	32
2.6.5	Programación Básica Metrel PowerQ4 Plus	33
2.7	Software Metrel PowerView V 2.0.....	34
2.7.1	Interfaz de usuario	34
2.8	Fórmulas de los armónicos en los sistemas eléctricos.....	35
2.8.1	Distorsión armónica de voltaje	35
2.8.2	Ecuaciones para dimensionamiento de filtro LCL	36
2.9	Mediciones y adquisición de datos.....	37
2.9.1	Programación del equipo Metrel PowerQ4 Plus.....	40
2.10	Levantamiento de sistemas y equipos del edificio FICA.....	40
2.11	Adquisición de datos del equipo de medición.....	42
2.12	Análisis de datos Analizador Metrel PowerQ4 Plus.....	43
2.12.1	Distorsión armónica total de voltaje en el edificio FICA.....	44
2.12.2	Armónicos de fase en el edificio FICA	45
2.12.3	Armónicos de corriente por el conductor neutro en el edificio FICA	47
3	Capítulo III.....	49
3.1	Procedimiento y metodologías enfocadas a la reducción de armónicos.....	49
3.2	Desbalance de cargas del tablero de control de la facultad FICA	49
3.3	Propuesta de balance de cargas del tablero de control de la facultad FICA.....	52
3.4	Diagnóstico de puesta a tierra	56
3.5	Propuestas de mitigación de armónicos homopolares en el conductor neutro	59

3.6	Propuesta de mitigación de armónicos por transformador ZIG-ZAG	60
3.6.1	Esquema de configuración del diagrama en ZIG-ZAG	60
3.6.2	Simulación del transformador ZIG-ZAG en Simulink	62
3.6.3	Análisis de la simulación de las propiedades del transformador ZIG-ZAG en el sistema de distribución del edificio FICA.	64
3.7	Propuesta de mitigación de armónicos por Filtro híbrido LCL	66
3.7.1	Diseño del Filtro LCL	66
4	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	69
4.1	Conclusiones	69
4.2	Recomendaciones	70
5	Anexos.....	1
5.1	Anexo A: Tablero de distribución edificio FICA	1
5.2	Anexo A: Cuadro de mando y protección del panel general eléctrico.....	3
5.3	Anexo B: Cuadro de mando y protección tablero de distribución planta baja	5
5.4	Anexo C: Cuadro de mando y protección tablero de distribución primera planta.....	6
5.5	Anexo D: Cuadro de mando y protección tablero de distribución segunda planta ...	7
5.6	Anexo E: Cuadro de mando y protección tablero de distribución tercera planta.....	8
5.7	Anexo F: Cuadro de mando y protección tablero de distribución cuarta planta	9
6	Bibliografía.....	1

ÍNDICE DE FIGURAS

Fig. 1 Diagrama de red lineal	7
Fig. 2 Diagrama red en anillo	8
Fig. 3 Diagrama de red radial.....	8
Fig. 4 Diagrama de red de bucle abierto	9
Fig. 5 Diagrama de secuencia positiva.....	12
Fig. 6 Diagrama de secuencia negativa	13
Fig. 7 Diagrama de secuencia homopolar	13
Fig. 8 Naturaleza de las corrientes de carga lineales en el neutro.....	14
Fig. 9 Sumatoria de corrientes no lineales en el neutro.....	14
Fig. 10 Representación de caídas de voltaje (Sags)	16
Fig. 11 Voltaje Swell durante una falla línea a tierra (SLG)	16
Fig. 12 Características del voltaje Swell	17
Fig. 13 Forma de onda real distorsionada por Flicker.....	18
Fig. 14 Porcentaje de aumento en el valor de la resistencia del conductor según el orden el armónico.....	20
Fig. 15 Corrientes altas en el neutro en el servicio de cargas no lineales.....	24
Fig. 16 Flujo de corrientes en transformadores en zigzag	25
Fig. 17 Sistema de prueba para una distribución trifásica de cuatro hilos	25
Fig. 18 Esquema de filtro activo para un sistema de distribución	26
Fig. 19 Instalaciones de la Facultad de Ingeniería en Ciencias Aplicadas (FICA)	27
Fig. 20 Tablero de Control FICA	28
Fig. 21 Transformador de 75 kVA FICA-FICAYA	28
Fig. 22 Flujograma de procesos.....	29
Fig. 23 Panel de conectores superior.....	33
Fig. 24 Sistema trifásico de 4 hilos.....	33
Fig. 25 Funciones de teclas	33
Fig. 26 Interfaz principal Metrel Power View	34
Fig. 27 Interfaz de usuario.....	35
Fig. 28 Detección de las fases en el tablero de control	38
Fig. 29 Conexión de las pinzas de voltaje	38
Fig. 30 Instalación de pinzas de corriente	39
Fig. 31 Instalación del analizador de redes en el tablero de control	39
Fig. 32 Programación de intervalo de medición.....	40
Fig. 33 Interfaz principal Metrel PowerView	42
Fig. 34 Importación de datos al programa Metrel PowerView.....	43
Fig. 35 Potencia consumida edificio FICA	43

Fig. 36 THDV del edificio FICA	45
Fig. 37 Armónicos individuales edificio FICA.....	46
Fig. 38 Desbalance de carga en las fases.....	46
Fig. 39 THDI edificio FICA.....	47
Fig. 40 Distribución del tablero principal del edificio FICA	50
Fig. 41 Desbalance de cargas Simulink	51
Fig. 42 Rediseño del tablero de control edificio FICA	56
Fig. 43 Flujo de corrientes en transformadores en Zig-Zag	61
Fig. 44 Diagrama unifilar del esquema de configuración	61
Fig. 45 Circuito eléctrico de un sistema trifásico de distribución de cuatro hilos	62
Fig. 46 Conexión del transformador Zig-Zag	63
Fig. 47 Señal no lineal PWM de 6 pulsos	63
Fig. 48 Circuito de simulación	64
Fig. 49 a) Señal con distorsión a la entrada del transformador Zig-Zag, b) Señal filtrada a la salida del transformador Zig-Zag.....	65
Fig. 50 Topología LCL.....	66
Fig. 51 Circuito de simulación LCL.....	67
Fig. 52 a) Señal con distorsión a la entrada del filtro LCL b) Señal filtrada a la salida del filtro LCL	68

ÍNDICE DE TABLAS

TABLA 2.1	NORMATIVAS DEL ANALIZADOR DE REDES.....	30
TABLA 2.2	CARACTERÍSTICAS DEL ANALIZADOR.....	31
TABLA 2.3	CAPACIDAD DE MEDICIÓN DEL ANALIZADOR.....	32
TABLA 2.4	LEVANTAMIENTO ILUMINACIÓN FICA.....	41
TABLA 2.5	LEVANTAMIENTO DE EQUIPOS EDIFICIOS FICA.....	41
TABLA 2.6	COMPONENTES DE EQUIPOS.....	42
TABLA 2.7	LECTURA DE ARMÓNICOS EN EDIFICIO FICA.....	47
TABLA 3.1	DESBALANCE DE CARGA.....	50
TABLA 3.2	BALANCE DE CARGAS.....	52
TABLA 3.3	DISTRIBUCIÓN DE CARGA POR CIRCUITO.....	52
TABLA 3.4	REDISTRIBUCIÓN DE CARGAS.....	53
TABLA 3.5	REDISTRIBUCIÓN DE CARGA POR CIRCUITO.....	54
TABLA 3.6	REDISTRIBUCIÓN DE PROTECCIONES A LAS FASES.....	54
TABLA 3.7	DATOS DE MEDICIÓN PUESTA TIERRA TRANSFORMADOR PRINCIPAL..	57
TABLA 3.8	DATOS DE MEDICIÓN PUESTA TIERRA TABLERO GENERAL.....	57
TABLA 3.9	TABLA COMPARATIVA DE ATENUACIÓN DE ARMÓNICOS.....	59

RESUMEN

Las cargas no lineales exigen en la actualidad un estudio de los efectos que estas producen en los transformadores de distribución. El presente trabajo propone una reducción de los armónicos homopolares en el neutro de la Facultad de Ingeniería en Ciencias Aplicadas (FICA). El edificio FICA dispone de un transformador de distribución que alimenta a diferentes puntos entre uno de ellos el tablero principal del edificio en el cual se realizó las mediciones y el análisis respectivo. La medición de los armónicos se realizó con el analizador de redes Metrel PowerQ4 en un periodo de una semana, para el procesamiento de los datos se hizo referencia a la metodología propuesta por la Regulación ARCERNNR – 002/20, además se realizó un levantamiento del edificio. Finalmente se realizó una comparación de los datos del analizador y el levantamiento que permitió obtener un panorama más claro de la influencia de los armónicos, el presente trabajo plantea varias alternativas para la mitigación de los armónicos producidos en el neutro por dichos efectos.

Palabras claves: Armónico homopolar, desbalance, transformador Zig-Zag, filtro híbrido, mitigación de armónicos.

ABSTRACT

Nowadays, non-linear loads require a study of the effects they produce on distribution transformers. The current work proposes a reduction of the homopolar harmonics in the neutral of the Faculty of Engineering in Applied Sciences (FICA). The building FICA has a distribution transformer that feeds different points, including the main panel of the building in which measurements and the respective analysis were made. The measurement of the harmonics was conducted with the Metrel PowerQ4 analyzer in a period of a week. Furthermore, the methodology was referenced by the ARCERNNR - 002/20 for the processing of the data. Besides, a counting of the equipment installed in the building was made. Finally, a comparison between the data of the analyzer and the counting of the equipment was made, which allowed obtaining a clearer outlook of the influence of the harmonics. The present work proposes several alternative for the mitigation of the harmonics produced in the neutral by the effects mentioned before.

Key words: Homopolar harmonic, imbalance, transformer Zig-Zag, hybrid filter, harmonic mitigation.

INTRODUCCIÓN

El desarrollo y rendimiento de dispositivos no lineales, en la última década ha provocado un incremento de armónicos en las redes de sistemas de energía dando como resultado problemas de calidad energética. (Pandu, 2021) Como consecuencia de este crecimiento tecnológico también se tiene una mayor contaminación por corrientes armónicas provocadas por las cargas y al presentar una conexión en la fuente de tipo delta-estrella esta tiende a tener en la conexión delta no puede eliminar los armónicos homopolares. (K. Karthi, 2017) Los armónicos son corrientes y voltajes con diferente frecuencia que afecta al rendimiento a los sistemas de suministro. (Babu, 2020).

La Regulación ARCERNNR- 002/20 (Agencia de regulación y control de energía y recursos naturales no renovables) nos menciona que los armónicos son ondas sinusoidales igual a un múltiplo entero de la frecuencia (frecuencia en Ecuador 60 Hz), originadas principalmente por las características no lineales de los equipos o cargas de un sistema eléctrico. (ARCERNNR) y por parte de estándar IEEE Std 519-1992 manifiesta que: La distorsión en sistemas eléctricos de 69 kV y menos es limitado al 5,0% de distorsión armónica total (THD) con cada armónico individual limitado al 3%. Los límites de armónicos actuales varían según el corto fuerza del circuito del sistema que están siendo inyectado en. Esencialmente, cuanto más es el sistema capaz de manejar corrientes armónicas, cuanto más al cliente se le permite inyectar. (Carnovale, 2006).

Con los usos cada vez más habituales de cargas no lineales como: computadoras (PCs), fuentes conmutadas de equipos eléctricos. Estas cargas no lineales demandan corriente no sinusoidal y debido a la impedancia de la red, provoca la aparición de armónicos de voltaje en el punto de conexión. (Voytyuk, 2017). Un estudio realizado por Virulkar (2015) en equipos como: computadoras, impresoras y en general los equipos con fuentes monofásicas. Llego a la conclusión de que la corriente en el neutro tiene un incremento por el desbalance de cargas. (Virulkar, 2015).

Los equipos informáticos usan el SMPS (Switching Mode Power Supply), lo que nos ayuda en la conversión de voltaje de CA en un suministro de bajo voltaje de CC para los dispositivos como las computadoras. Por ello, la corriente de alimentación no lineal se consume en pulsos cortos de alta amplitud. Provocando de esta manera una distorsión de los pulsos y ondas de corriente. (Babu, 2020).

Las cargas no lineales o cargas desequilibradas provocan un flujo de corriente de secuencia cero a través del neutro. Estos componentes de corriente de secuencia cero son el múltiplo de los armónicos de tercer orden. (R. Sharma, 2018) Los armónicos de tercer orden que tienen origen en el neutro crean distorsiones de voltaje no deseados y una mayor magnitud de corrientes neutras en los sistemas de distribución de energía de cuatro cables. (K. Karthi, 2017) Como consecuencia de los armónicos de tercer orden, el aislamiento de los conductores se daña y produce la pérdida de piezas mecánicas en los motores eléctricos e introduce interferencias en las líneas de telecomunicaciones. (Iqbal, 2021).

Los efectos que generan las corrientes armónicas en el neutro son: incremento de la temperatura en el conductor, incremento de la voltaje neutro-tierra y la distorsión de la onda entre las fases. Una corriente neutra alta puede causar problemas de seguridad eléctrica en los puntos de los consumidores (Maciel, 2018). También exige un costo mayor en el neutro por su mayor relación de corriente para evitar daños a los conductores y al transformador de distribución. (Hasan, 2020).}

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

La Facultad de Ingeniería en Ciencias Aplicadas, durante los últimos años ha incrementado el número equipos en los laboratorios e igualmente con el uso de computadores por parte de docentes y estudiantes para desempeñar sus actividades académicas, estos equipos informáticos tienen elementos de estado sólido que son no lineales los cuales producen corrientes armónicas homopolares que viajan por el conductor del neutro y por consecuencia producen armónicos de voltaje homopolar.

A medida que se incrementan equipos electrónicos, las corrientes armónicas producidas por las fuentes de alimentación de los equipos también se vuelven significativas. Los armónicos homopolares inyectados por cargas no lineales contaminan a la calidad de los sistemas de suministro y crea un mayor porcentaje de distorsión que viajan a través del conductor neutro. La fuente que alimenta a la facultad tiene una conexión en el primario delta y en el lado secundario estrella que tiene como consecuencia en la conexión primaria que está conectada en delta del transformador de distribución solo pueda eliminar los armónicos homopolares inyectando a la red.

Por lo tanto, la corriente neutra en el secundario al ser en estrella la corriente neutra causada por el flujo de cargas de armónicos homopolares no se eliminan, al contrario buscan un retorno en dirección a la fuente causando un mayor desgaste del aislamiento de los

devanados, incrementos de temperatura en el conductor neutro y si es muy alta puede causar un cortocircuito y daños de los equipos conectados.

PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN

¿Qué estudio, estrategia y propuesta se puede aplicar para reducir el porcentaje de armónicos de homopolares para mejorar la calidad de suministro eléctrico en la Facultad de Ingeniería en Ciencias Aplicadas?

OBJETIVOS

Objetivo General

- Realizar una propuesta técnica para la reducción de los armónicos homopolares en el conductor neutro de las instalaciones eléctricas de la Facultad de Ingeniería en Ciencias Aplicadas, mediante el diagnóstico del funcionamiento de la red eléctrica.

Objetivos Específicos:

- Analizar las diferentes perturbaciones que engloban los armónicos en una calidad de energía en la red eléctrica.
- Realizar el diagnóstico de las instalaciones eléctricas de la facultad.
- Realizar la propuesta técnica para la reducción de los armónicos homopolares en el conductor neutro en la Facultad de Ingeniería en Ciencias Aplicadas.

JUSTIFICACIÓN

Considerando necesario asegurar un nivel satisfactorio de la prestación de los servicios de calidad eléctrica las cuales se refieren a las disposiciones legales establecidas en la Regulación ARCERNNR- 002/20, es preciso realizar un análisis sobre de la calidad del conductor del neutro de la facultad.

El análisis de la calidad del conductor del neutro de este proyecto está a la mejora y confiabilidad de las instalaciones eléctricas precautelando así los equipos de laboratorio, equipos de oficina en la facultad, así como también mitigar las componentes armónicas. Con los resultados obtenidos mediante el análisis de calidad del conductor del neutro se podrá presentar una propuesta para la mitigación de las perturbaciones y el cumplimiento de los

parámetros eléctricos establecidos según la Regulación No. ARCERNNR 002/20 y por el estándar IEEE Std 519-1992.

ALCANCE

En el presente trabajo de titulación, está enfocado en un análisis de los armónicos homopolares en el conductor neutro de las instalaciones de la Facultad de Ingeniería en Ciencias Aplicadas, este análisis examina la aparición de los armónicos homopolares en la instalación eléctrica de la facultad y los efectos que tienen si llegan a ser muy elevados.

Posteriormente realizar un diagnóstico de la instalación para detectar los armónicos homopolares existentes en el sistema de suministro de energía eléctrica que afecta a la facultad y a sus equipos de los laboratorios.

Además, se analizará el impacto de los armónicos por medio de las mediciones obtenidas por los equipos de medición en el sistema de distribución para realizar una propuesta sobre un esquema de disminución de armónicos en el conductor de neutro de los sistemas trifásicos de cuatro hilos. Con el análisis de las diferentes frecuencias que emiten los equipos electrónicos señales no lineales con la finalidad de analizar el impacto de los armónicos en el neutro.

CAPÍTULO 1

Armónicos en la Calidad de Energía en la Red Eléctrica

1.1 Red eléctrica

Las redes de bajo voltaje (redes secundarias) se derivan a partir del lado de bajo voltaje del transformador de distribución con configuraciones: monofásicas o trifásicas. A nivel nacional la longitud de las redes de bajo voltaje alcanzó los 100.117,56 km repartidas en las diferentes configuraciones anteriormente mencionadas. (ARCERNNR, "ESTADÍSTICA MANUAL Y MULTIANUAL del sector Eléctrico Ecuatoriano 2020", 2020).

1.1.1 Configuración de redes de distribución eléctrica

Una red de distribución eléctrica está constituida por elementos que ayudan a desplazar grandes distancias en alto voltaje, poseen diversas tipologías dependiendo de las exigencias de los clientes de manera hay que considerar las siguientes configuraciones: anillo, radiales, bucle abierto, sin importar el tipo de configuración estos no sufren daños o cortes de energía o por falencias del sistema. (Shariatpanahi, "Multi-Server Coded Caching,", 2016). Las configuraciones se detallan a continuación:

a) Red Lineal

Este tipo de red lineal de medio voltaje se caracteriza por la combinación lineal aleatoria de datos en su entrada con una única conexión a la siguiente, dando como resultado una serie de centros de transformación. (Shariatpanahi, 2016).

En la Fig.1, se observa que este tipo de red aumenta el número de conexiones y, en consecuencia, la seguridad del servicio.

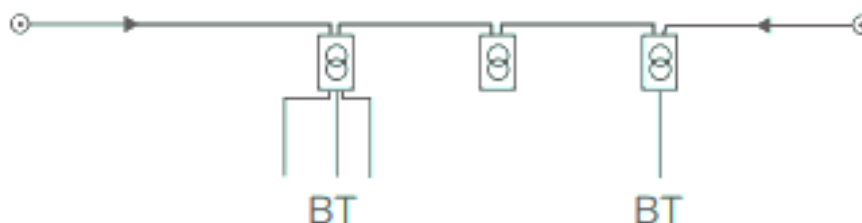


Fig. 1 Diagrama de red lineal
Fuente: (Schneider, 2014)

b) Red en Anillo

En este tipo de red los centros de transformación que tiene conexión es similar a la red lineal, con la diferencia que la línea de medio voltaje se cierra sobre sí misma. El inconveniente de la red se llega a dar cuando por si algún caso existiera una avería en el centro de transformación, provocando un corte de todo el suministro de la red. (Cumanan, 2016).

La red en anillo Fig. 2, tiene una doble alimentación y se puede interrumpir una sin causar una interrupción del suministro.

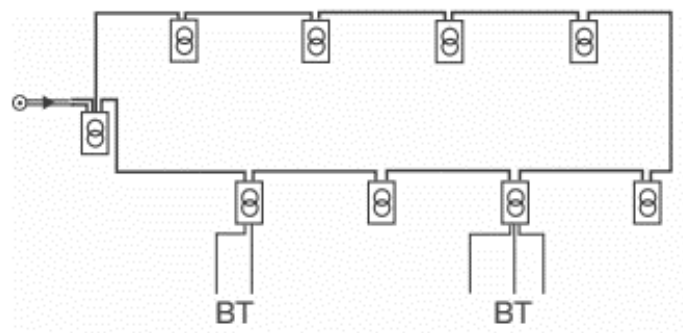


Fig. 2 Diagrama red en anillo
Fuente: (Schneider, 2014)

c) Red radiales

Las redes radiales están compuestas por una serie de centros de transformación en línea, conectados en serie a medio voltaje con el objetivo de reducir pérdidas en el transporte y en los centros de transformación (Becirovic, 2015).

En red radial Fig. 3, tiene un funcionamiento de una sola vía de alimentación, siendo un solo camino eléctrico.

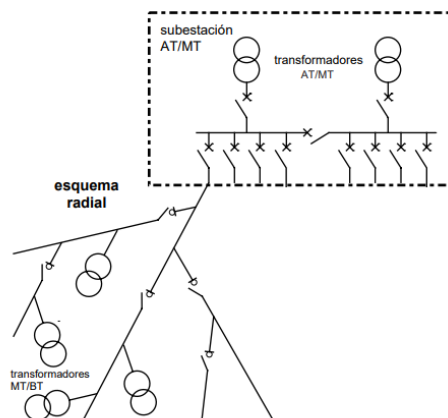


Fig. 3 Diagrama de red radial
Fuente: (Schneider, 2014)

d) Red de bucle abierto

La red de bucle abierto es la presencia de dos posibles caminos de suministro, de manera que los usuarios pueden tener una alimentación de cualquiera de ellos, usualmente una de las vías de alimentación se activa para una operación normal, la otra vía se activa en caso de emergencia y suele estar abierta. (Chen, 2019).

La red de bucle abierto Fig. 4, parte de la subestación receptora de cualquiera de los transformadores AT/MT o MT/MT, formando un anillo que va recorriendo los CT de manera que entra y sale de cada uno de ellos.

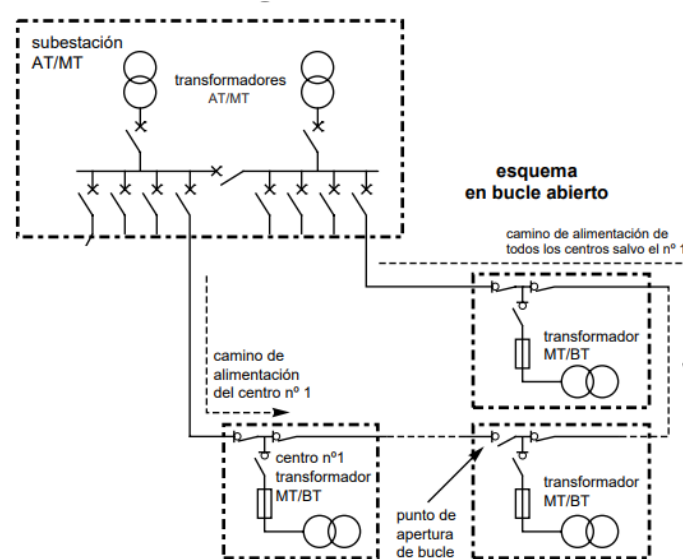


Fig. 4 Diagrama de red de bucle abierto
Fuente: (Schneider, 2014)

1.1.2 Caracterización de cargas

En el diseño de circuitos o instalaciones eléctricas para una construcción, se debe considerar la variedad de tipos de cargas que existen, y que generalmente son de tipo residenciales, comerciales e industriales, las cuales generalmente cuenta con: sistemas de iluminación, motores, contactores y aplicaciones especiales. (Das, 2015).

Las cargas comerciales e industriales su consumo de energía comparte una cantidad considerable del consumo total de energía compartiendo aproximadamente el 49,4% del consumo total. (Sharma, 2021)

Para ello, las cargas anteriormente mencionadas se clasifican en tres categorías:

- Cargas descontroladas: son cargas que no participan en ningún tipo de respuesta a la demanda. Estas cargas se toman como demanda de potencia fija para cada ranura.

Luces, ventiladores, contadores de facturación. Son algunos ejemplos de cargas no controladas.

- Cargas que no son de CA: estas cargas son los principales contribuyentes a la técnica de respuesta a la demanda, ya que se pueden programar en el intervalo de tiempo.
- Cargas de CA: son cargas que suelen estar relacionadas con sistemas de aire acondicionado.

En la sección de aplicaciones especiales intervienen varios tipos de cargas, depende de las características de la construcción como industrias o local que se va a diseñar la instalación eléctrica, cada caso presenta un problema que se resuelve en un proyecto o construcción en específico. (Das, 2015).

En las instalaciones de la Facultad de Ingeniería en Ciencias Aplicadas, se encuentra una variedad de cargas como: computadoras, lámparas, fotocopiadoras, etc.

1.2 Puesta a tierra

La puesta a tierra es una conexión eléctrica directa de todas las partes metálicas de una instalación, sin fusibles ni otros sistemas de protección, de sección adecuada y carios electrodos enterrados en el suelo, con el objetivo de conseguir que, en un sistema de instalaciones, edificios y superficies próximas al terreno, no exista diferencias de potencial peligrosas y que, al mismo tiempo, permita el paso a tierra de las corrientes de defecto o la de descarga de origen atmosférico. (Guerrero, 2019).

La finalidad de una puesta a tierra es similar el voltaje con respecto a tierra, puedan presentar en un momento dado las masas metálicas, asegurar la actuación de las protecciones y eliminar o disminuir el riesgo que supone una avería en los materiales eléctricos utilizados. (Guerrero, 2019).

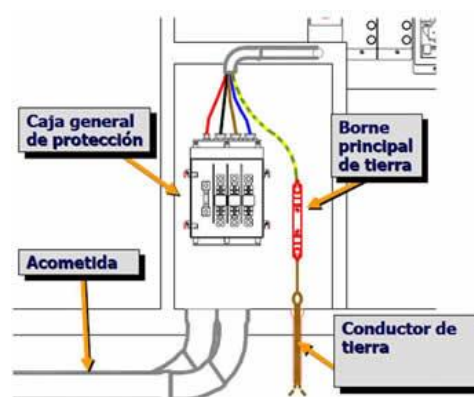


Fig. 5 Instalación de un sistema de puesta a tierra
Fuente: (Guerrero, 2019)

1.3 Armónicos

Los armónicos son generados tanto por la fuente como por la carga. Los armónicos de las cargas son originados por operaciones no lineales tales como: computadoras, equipos de soldadura, hornos de arco, rectificadores y fuentes de alimentación conmutada. (Carnovale, 2016)

1.3.1 Definición de armónicos

Los armónicos son componentes sinusoidales de una onda periódica que su frecuencia es múltiplo de la frecuencia fundamental. Tienen su origen debido a las conexiones de cargas cuyas características de voltaje y corriente son no lineales (K. Malekian, 2015).

1.3.2 Armónicos de voltaje y corriente

Las ondas de voltaje tienen una mínima cantidad de distorsión armónica, por lo general es mejor al 1%, en los puntos de generación, esto tiene origen a la no uniformidad del campo magnético de excitación y la distribución de las bobinas alrededor de las ranuras del estator en los generadores, por otra parte, el voltaje se propaga sufriendo varias transformaciones de nivel hasta llegar a los usuarios. (Subramaniam, 2017).

El usuario al poseer equipos cuyo comportamiento es no lineal, genera corrientes con componentes de frecuencia armónica. Esta corriente viaja a la fuente de alimentación dando como resultado una distorsión de voltaje debido a la relación de la corriente absorbida por las cargas no lineales y la impedancia de los componentes del sistema de potencia, igual a líneas de transmisión, distribución y transformadores. (Subramaniam, 2017).

A pesar de ello el voltaje de distorsión no se debe solo al flujo de corrientes distorsionadas a través de las impedancias de alimentación, un ejemplo, es en los sistemas de alimentación ininterrumpida (UPS) debido a su función que es la conversión de voltaje alterno a voltaje continuo y viceversa, se genera una distorsión considerable de voltaje. Es por eso que en la actualidad la mayor cantidad de distorsión armónica es causada por cargas no lineales. (Subramaniam, 2017).

1.3.3 Clasificación de armónicos

La clasificación de los armónicos se da por:

- Orden
- Secuencia
- Frecuencia

a) Clasificación por su orden.

El orden de los armónicos se clasifica en base al número de veces que la frecuencia del armónico es mayor a la fundamental.

Existen dos clases:

- Armónicos pares
- Armónicos impares

Armónico par: es aquel que tiene números pares como 2, 4, 6,

Armónicos impares: son aquellos que tienen números impares como 3, 5, 7, 9,, el número 1 es reservado para su componente fundamental y el armónico 0 hace referencia a la corriente continua (DC) (Lantsov, 2020).

b) Clasificación por su secuencia o rotación.

Según la secuencia y rotación que presenten los armónicos pueden presentar diferentes efectos como:

- Secuencia positiva (directa): En el gráfico de la Fig. 6 representa una rotación positiva, y ocasiona un calentamiento de los conductores y rotura de circuitos, este tipo de secuencia.....

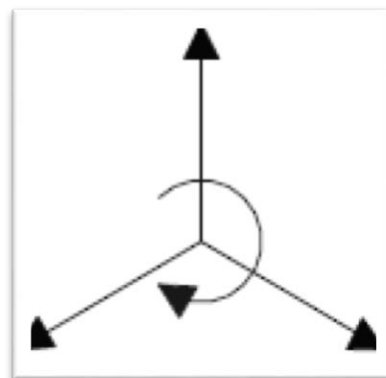


Fig. 6 Diagrama de secuencia positiva
Fuente: (Villalba, 2010)

- Secuencia negativa (inversa): en la Fig.7 presenta una rotación negativa, y ocasiona embocadura en los motores, además que la anterior secuencia produce calentamiento de conductores y en casos mayores puede quemar motores de inducción trifásicos. (Lantsov, 2020).

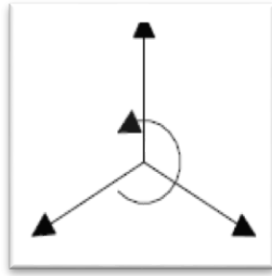


Fig. 7 Diagrama de secuencia negativa
Fuente: (Villalba, 2010)

- Secuencia cero: este tipo de secuencia hace referencia a los armónicos cero que se suman al neutro y provoca un sobrecalentamiento y si no se hace un diagnóstico adecuado puede quemar los equipos eléctricos (Lantsov, 2020).

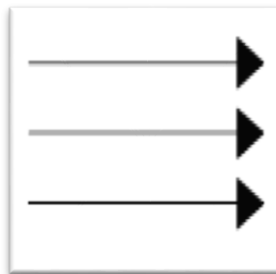


Fig. 8 Diagrama de secuencia homopolar
Fuente: (Villalba, 2010)

c) Clasificación según la frecuencia

Para la clasificación se toma en consideración la frecuencia del armónico. Algunos sistemas presentan sistemas en donde la frecuencia fundamental es de 60 Hz, y otros donde su frecuencia es de 60 Hz (Lantsov, 2020).

1.4 Armónicos homopolares

En las plantas de producción, edificios, la energía se distribuye a través de un sistema trifásico de cuatro hilos, debido a la naturaleza desequilibrada de los equipos conectados hace que la corriente fluya a través del neutro. (Kaisar, 2020).

En las cargas lineales, la corriente del neutro se debe únicamente al desequilibrio entre las fases, pero las cargas no lineales en el sistema distribución trifásico de cuatro hilos generan componentes de los armónicos homopolares, tanto para la corriente de fase, incluso en condiciones de equilibrio, los componentes del armónico homopolar no se cancelarán entre sí, sino que se sumarán en el neutro. (Ding, 2015), por lo tanto, el transformador de

distribución aumenta la interferencia de comunicación y reduce la calidad de energía, seguridad y la confiabilidad del sistema.

En la Fig. 9, se observa que para las cargas lineales que están balanceadas, la corriente de carga sinusoidal hace que su vector sea una suma pequeña para un sistema de distribución de cuatro hilos:

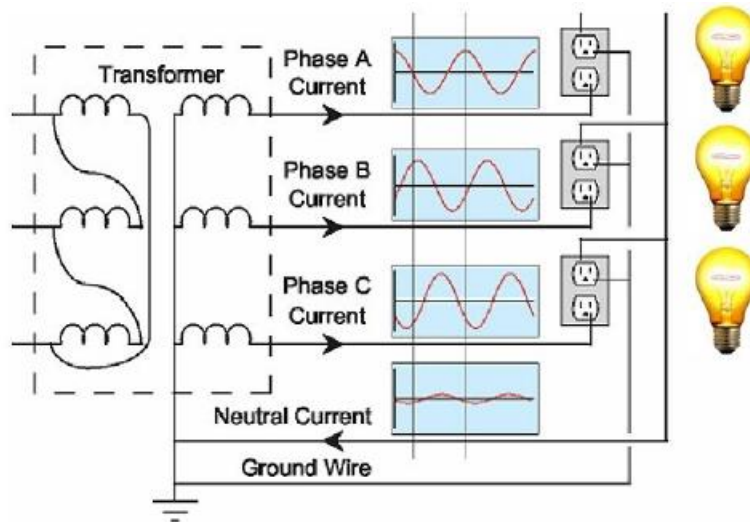


Fig. 9 Naturaleza de las corrientes de carga lineales en el neutro
Fuente: (Kaisar,2020)

En la Fig. 10, se evidencia que si la carga es de naturaleza no lineal entonces la suma de las corrientes de las tres fases no será cero. Desarrollando una corriente en el neutro.

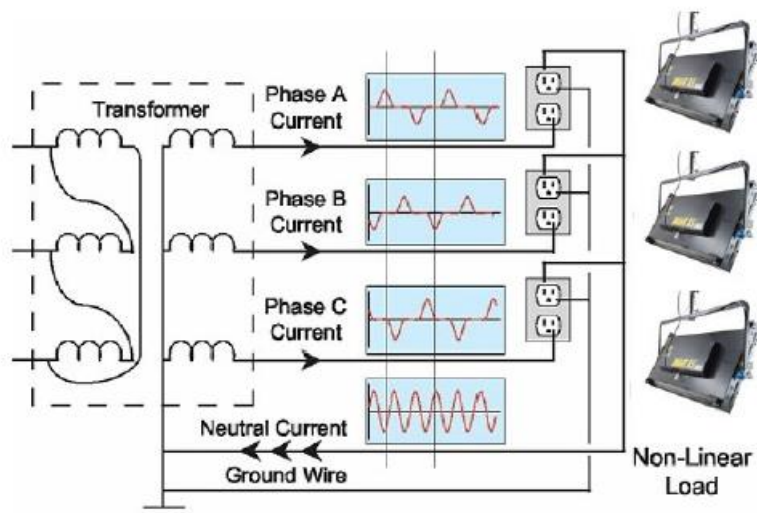


Fig. 10 Sumatoria de corrientes no lineales en el neutro
Fuente: (Kaisar,2020)

La fuente de alimentación eléctrica conectada a la carga lineal, la corriente a través de la corriente neutra es una suma vectorial de la corriente neutra de cada fase, las fases están

desfasadas 120° entre sí. Dando como resultado la suma de todas las corrientes de fase en el neutro sea igual a cero. (Kaisar, 2020).

En una red de distribución, al tener una variedad de cargas hace que la corriente de desequilibrio no sinusoidal fluya en el neutro, al tener tres veces la magnitud de la corriente neutra de cada fase, la corriente en el neutro hace que fluya una corriente excesiva en la red. Esto provoca un efecto adverso en los principales componentes de la red eléctrica y produce armónicos homopolares en la corriente.

1.5 Tipos de perturbaciones

En un sistema trifásico, los voltajes desequilibrados son un problema de calidad de energía. De los problemas más comunes en la calidad de energía son:

- Caídas de voltaje (Dips o Sags)
- Aumento de voltaje (Swell)
- Notching
- Fluctuaciones de voltaje
- Flicker

1.5.1 Caídas de voltaje (Dips o Sags)

Las caídas de voltajes (Dips o Sags) son reducciones en el valor eficaz (voltaje rms) entre 0,1 y 0,9 pu, en un tiempo que varía desde los 8.33 ms (medio ciclo a 60 Hz) hasta un minuto. (UÇAR, 2017).

Dentro de los problemas de calidad de energía, las caídas de voltaje son los causantes de mayores problemas para las industrias, quienes utilizan equipos de control para la automatización de los procesos, como consecuencia los equipos pueden funcionar de manera incorrecta causando interrupciones en los procesos. (Gomez & Oviedo, 2017).

Con la finalidad de reducir los efectos negativos de las caídas de voltaje, es necesario reconocer las causas, además de tener un adecuado monitoreo de calidad de un sistema eléctrico como:

- Realizar mantenimientos preventivos y predictivo.
- Determinar la necesidad de los equipos para la mitigación de los fenómenos electromagnéticos que deterioren la calidad de energía.
- Realizar una evaluación de sensibilidad de los equipos ante perturbaciones.

Los Sags generan un hueco de voltaje, una caída repentina de voltaje en un punto del sistema eléctrico con una reducción de 800 V a 200 V, seguida de una recuperación de voltaje tras el intervalo de tiempo de 0,1 segundos hasta 0,23 segundos, como se observa en la Fig. 11.

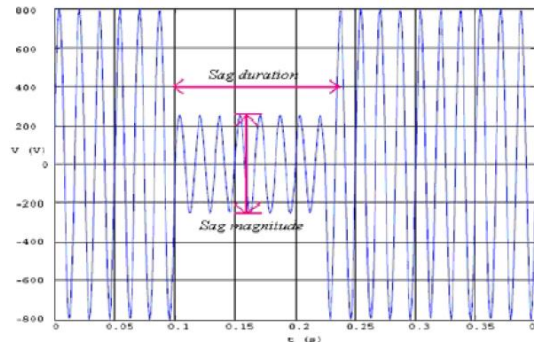


Fig. 11 Representación de caídas de voltaje (Sags)
Fuente: (Saxena, 2016)

1.5.2 Aumento de voltaje (Swells)

Los aumentos de voltaje se los describe como: "Un aumento que esta de 1,1 pu y 1,8 pu en el valor cuadrático medio entre voltaje/corriente en el rango de frecuencia de potencia en un intervalo de tiempo de 0,5 a 1 minuto". (Saxena, 2016).

El intervalo de duración del aumento de voltaje se conoce como subida de voltaje, en la Fig.12, muestra el aumento de voltaje durante la conmutación de una carga (Saxena, 2016). Las principales causas de un aumento de voltaje son:

- Falla
- Energización de un banco de capacitores; la energización de un banco de capacitores es un fenómeno frecuente en las redes de distribución usados para mejorar el factor de potencia.
- Eliminación de una carga más grande; el aumento de voltaje ocurre en el sistema de potencia cuando las cargas lineales y no lineales se desconectan repentinamente del sistema.

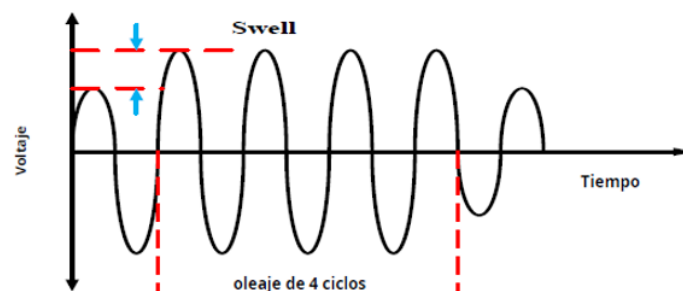


Fig. 12 Voltaje Swell durante una falla línea a tierra (SLG)
Fuente: (Prasad, 2018)

La magnitud del aumento de voltaje, la duración, el salto del ángulo de fase, el punto sobre la onda de iniciación y el punto sobre la onda de recuperación del aumento se consideran características más significativas en los swell. (Prasad, 2018). Como se muestra en la Fig. 13.

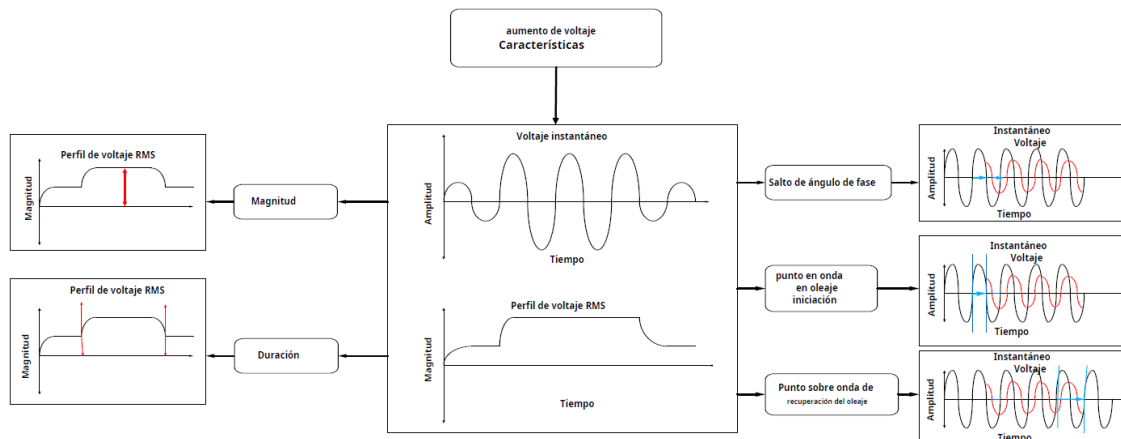


Fig. 13 Características del voltaje Swell
Fuente: (Prasad, 2018)

1.5.3 Fluctuaciones de voltaje

Son perturbaciones electromagnéticas caracterizadas por pequeñas variaciones de valor eficaz, entre +10% y -10% del voltaje nominal, que poseen una frecuencia baja o aleatoria durante una unidad de tiempo determinada. Esta perturbación de voltaje está asociada con el parpadeo de luz en las lámparas de los usuarios finales. (Anca, 2019).

Las fluctuaciones de voltaje se originan en los sistemas eléctricos de potencia debido a las conmutaciones, generalmente son producidas por consumidores que tienen carga de potencia fluctuante. Las cargas son producidas por: hornos de arco, iluminación, motores, equipos de soldadura. Las unidades de generación renovables como: turbinas eólicas, centrales undimotrices, también fuentes de flicker. (Geiger, 2017).

Para mitigar estas perturbaciones de calidad de energía existen varios métodos como lo mencionados a continuación:

- Fortalecer la red
- Aumentar el nivel de potencia de cortocircuitos
- Instalar sistemas de mitigación activos

1.5.4 Flicker

El Flicker se define como una modulación de amplitud de voltaje que tiene una frecuencia de modulación de 0,58 Hz a 35 Hz. Algunas fuentes generadoras de oscilaciones son: hornos

de arco, las soldadoras, generadores con turbinas eólicas y variadores de frecuencia. Aun así, para la frecuencia de variación de la luz 35Hz mencionada anteriormente es demasiado baja cuando se considera parpadeos de la luz. (Astanei, 2017).

El Flicker también se lo define como las variaciones de irradiación detectadas por el sistema visual humano debido a los cambios de intensidad de iluminación de las fuentes de luz causados por las fluctuaciones de voltaje, además el Flicker da como resultado el mal funcionamiento de los equipos electrónicos y bucles de enganche de fase, daños a los equipos de red, especialmente a los equipos que tienen un alto grado de sensibilidad.

Las perturbaciones en la calidad de energía se dividen en corto y largo plazo, donde el Flicker es uno de los más importantes a corto plazo, el Flicker es la fluctuación de voltaje que excede una cierta curva de amplitud versus la frecuencia causando efectos molestos en los seres humanos. En la Fig. 14, se muestra una forma de onda de parpadeo real.

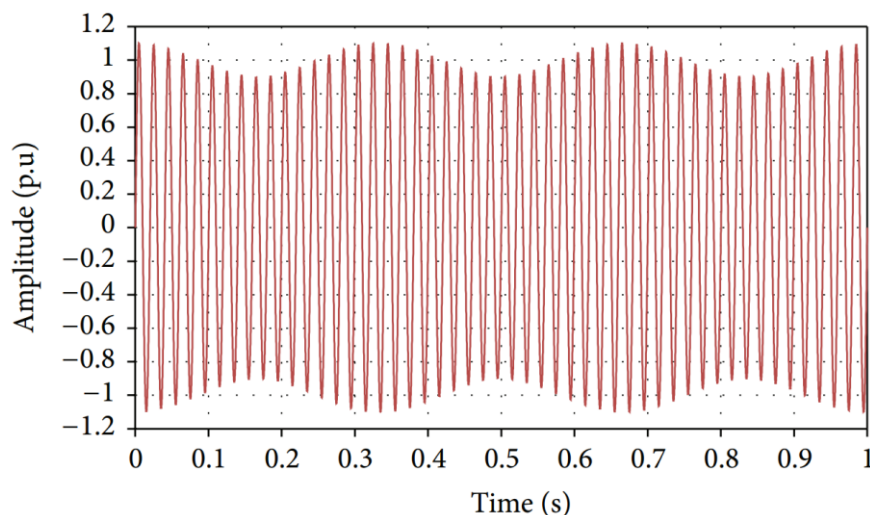


Fig. 14 Forma de onda real distorsionada por Flicker
Fuente: (Saadat, 2021)

1.6 Efectos de los armónicos

La frecuencia de energía e una red eléctrica que siempre se referencia por la regla estadounidense o británica (50 Hz o 60 Hz) no siempre llega a ser constante durante un periodo de tiempo donde las fluctuaciones permisibles son compatibles para salvaguardar la estabilidad y confiabilidad de las redes eléctricas (Halder, 2020). Por este motivo las cargas no lineales generan armónicos que son múltiplos integrales de la frecuencia fundamental de 50 Hz o 60 Hz (Halder, 2020). Estas frecuencias provocan efectos en las redes eléctricas de los cuales pueden ser divididos en tres clases principales:

- Efectos sobre el sistema de potencia.

- Efectos sobre circuitos de comunicación.
- Efectos sobre la carga del consumidor.

Por esta razón los efectos dependerán de la proporción que presente entre la carga no lineal y la carga total del sistema. La vulnerabilidad de la carga o de la fuente de potencia hacia los armónicos determina el grado que pueden ser soportados (J. A. Lopez, 2019).

Las cargas que su función principal es un calentador poseen el mínimo de vulnerabilidad hacia los armónicos, en estos casos la energía armónica es totalmente utilizada y tolerable. Sin embargo, en caso de los equipos más delicados pueden ser dañinos. Existen cargas que en su diseño asumen una entrada fundamental sinusoidal casi perfecta en estos casos el grado de afectación de los armónicos tienen un aumento notable (J. A. Lopez, 2019).

1.6.1 Efectos sobre motores y generadores

Los efectos que tiene en máquinas de inducción y máquinas sincrónicas se manifiesta con el incremento de su calentamiento debido a las pérdidas en el cobre y en el hierro por las frecuencias armónicas. De esta forma los armónicos afectan la eficiencia de la máquina y a su torque desarrollado por el motor. También las corrientes armónicas en un motor pueden aumentar la emisión de ruido audible siempre comparadas con una excitación sinusoidal. Además, los armónicos producen una distribución de flujo resultante en el entrehierro, esto causa un fenómeno denominado arrastre en motores de inducción. (Reinoso, 2015).

Los armónicos de grado quinto y séptimo poseen el potencial para crear oscilaciones mecánicas en una unión entre turbina-generador o en un sistema motor-carga. Las oscilaciones de tipo mecánica se dan cuando el par del motor oscilante, esto es causado por la interacción entre las corrientes armónicas y el campo magnético de frecuencia fundamental, excitando una frecuencia de resonancia mecánica. (Reinoso, 2015).

El calentamiento excesivo en los motores produce pérdidas como:

- a) Pérdidas en el cobre (I^2R) en el rotor: es producto en la parte resistiva efectiva debido al efecto piel.
- b) Pérdidas I^2R en el estator: es producto del incremento de corriente de magnetización y por el efecto piel.
- c) Pérdidas en el núcleo: presenta un aumento debido a las densidades de flujo pico alcanzadas.
- d) Pérdidas adicionales: depende del modelo de la máquina y sus componentes.

1.6.2 Efectos sobre los conductores

Los conductores aislados están sometidos a fuerzas y coronas de voltaje, dando como resultado un fallo en sus aislamientos. Los conductores que están sujetos a altos niveles de corrientes armónicas son expuestos a calentamientos (Khripkov, 2018). Esto se produce a la circular una corriente no sinusoidal en el conductor provoca un calentamiento adicional comparado con la corriente fundamental, esto se produce por el efecto piel (Khripkov, 2018).

En la ilustración da una mayor explicación acerca del aumento en el valor de la resistencia del conductor según su orden armónico y sobre el efecto piel que produce. El efecto Piel a medida que la frecuencia de la corriente aumenta el área efectiva por donde circula disminuye y crece en la parte exterior la densidad de la corriente, la que refleja un aumento de la corriente efectiva del conductor, esto es llamado el efecto piel o efecto peculiar. (Jintaka, 2019).

En la Fig. 15, representa el porcentaje de aumento en el valor de la resistencia del conductor según el orden del armónico y la capacidad de transporte de corriente en diferentes secciones transversales del cable.

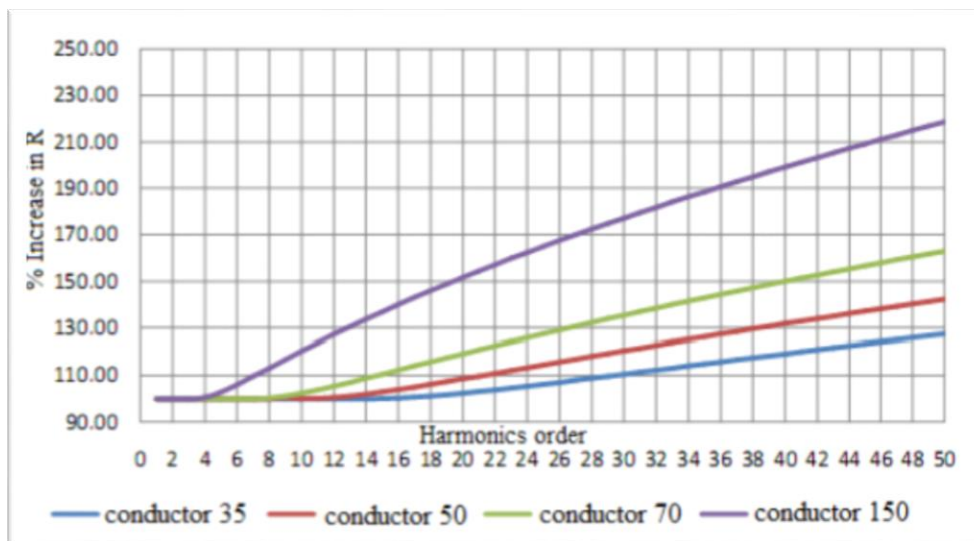


Fig. 15 Porcentaje de aumento en el valor de la resistencia del conductor según el orden el armónico
Fuente: (Jintaka, 2019)

1.6.3 Efectos sobre los equipos de protección y medición

La exactitud de los equipos de medición se ve afectada por la presencia de los armónicos. Los medidores de energía activa dan registros de la dirección de flujo de energía a las frecuencias armónicas, pero por otra parte presentan errores de magnitud que aumentan con la frecuencia. En los medidores de demanda y de energía reactiva la exactitud es menor en la presencia de armónicos. (Quinga, 2015).

La presencia de los armónicos tiene mayor influencia en la confiabilidad y estabilidad del sistema, por el motivo de que estas corrientes se filtran en la red y en algunos casos provocan un disparo en falso de apertura de las protecciones eléctricas. Esta acción hace que los equipos dejen de operar de manera estable y en el peor de los casos un apagado total del sistema. (Reinoso, 2015).

Los interruptores automáticos en las instalaciones son sometidos a picos de intensidad producidos por los armónicos. Estos picos de intensidad producen disparos inoportunos y como consecuencia pérdidas en la producción, así como costes correspondientes al tiempo que tardan en poner de nuevo en funcionamiento la instalación. (Quinga, 2015).

Los efectos en los instrumentos de medición son afectados cuando existe resonancia que da origen a altas corrientes o altos voltajes en los circuitos. En dispositivos como vatímetros que tienen un disco de inducción normalmente miden la corriente fundamental, sin embargo, el desbalance que provoca la distorsión armónica ocasiona un mal funcionamiento del instrumento. Se puede encontrar errores positivos o negativos cuando existe la presencia de distorsión armónica esto depende de dos factores el medidor y de los armónicos que se encuentren en la red. (Toledo, 2015).

1.6.4 Efecto sobre los condensadores- resonancia

La implementación de condensadores en un sistema supone un mayor inconveniente debido a la resonancia del sistema. El efecto se debe a los voltajes y corrientes que son mayores a los que sería sin resonancia.

La reactancia del banco de capacitores disminuye con la frecuencia, de esta manera el banco tiene un comportamiento como una carga para corrientes armónicas. El efecto tiene como consecuencia un calentamiento y un esfuerzo dieléctrico. El cambio habitual de componentes no magnéticos (transformadores y reactores), produce corrientes que se agregaran a la carga de los condensadores. (Reinoso, 2015).

La norma de la IEEE Std. 18-1992 proporciona los límites que deben de ser cumplidos en voltaje, corriente y potencia reactiva para los bancos de capacitores, lo que es usada para determinar el máximo nivel de tolerancia de los armónicos. Caso que se sobrepase los límites establecidos presenta en los condensadores un calentamiento y un esfuerzo dieléctrico que si no es tratado a tiempo producirá una reducción de la vida útil de los mismos. (Reinoso, 2015).

Existen condensadores que son usados en motores monofásicos de arranque para circuitos rectificadores amortiguadores que son susceptibles a esfuerzos térmicos y de voltaje, también son usados en el filtrado de armónicos y la corrección del factor de potencia. (Quinga, 2015).

Las impedancias de condensadores e inductancias dependen de la frecuencia. Las conexiones en serie y en paralelo de las mismas da a lugar a situaciones particulares, denominadas resonancias. Existen situaciones en donde los equipos de medición presentan fallas tales como:

- Error de medición de energía activa, reactiva y factor de potencia.
- Lecturas inexactas con multímetros basados en valores medio o con poco ancho de banda.

La magnitud de los costes ocasionadores por la operación del sistema y equipos eléctricos con voltajes y corrientes distorsionadas se considera a continuación:

- Elevación de un 10°C de la temperatura máxima de los aislamientos de un conductor reduciendo la vida útil del equipo.
- Incremento de un 10% del voltaje máximo del dieléctrico de un condensador que reduce a la mitad su vida útil.

1.6.5 Efectos sobre equipos eléctricos

Las distorsiones armónicas producen un mal funcionamiento de los equipos eléctricos, debido a que los equipos dependen de la determinación exacta del cruce por cero de la onda de voltaje. Es por esto que los armónicos tienden a producir un cambio de cruce del voltaje por cero o en el punto de un voltaje fase-fase provocando un desbalance con las demás fases. En estos casos los puntos son críticos para los tipos de controles de circuitos eléctricos lo que puede provocar un mal funcionamiento del equipo. (Toledo, 2015).

Existen algunos equipos que son afectados por la transmisión de armónicos hacia la fuente AC como por acoplamiento magnético o a través de alimentadores. Un ejemplo de los equipos que requieren de una AC son los equipos como computadores o dispositivos asociados a la fuente anteriormente mencionada que tienen un factor de distorsión de voltaje menor al 5%. Una presencia de armónicos alta resulta en irregularidades, mal funcionamiento de los equipos eléctricos. De la misma manera los instrumentos de medición pueden ser afectados, dando como resultado una lectura de datos errónea, esto se vuelve grave en instrumentos médicos por la presencia de armónicos hacen que exista distorsiones en la potencia de

condición ideal que deben de trabajar. Otros equipos cuyo efecto es de menor trascendencia son los equipos de radio, videograboras, sistemas de reproducción de audio y televisores. (Toledo, 2015).

Los equipos eléctricos que operan a un voltaje menor que el voltaje del sistema de distribución, está expuesto a los efectos de escalonamiento de voltaje. Esto como consecuencia provoca frecuencias armónicas, que son mayores que las que se dan en 5 Kv y en sistemas de alto voltaje. Estos efectos pueden ocasionar efectos nocivos como radio de frecuencia falsa, dando como resultado en señales de interferencia que se introducen en circuitos lógicos y de comunicación. (Toledo, 2015).

1.7 Mitigación de armónicos

La mitigación de los armónicos por configuración de transformadores se clasifica en:

- Transformador con factor K
- Transformador en Zig-zag
- Transformador con filtro activo

1.7.1 Transformador con factor K

Los transformadores están diseñados para operar a voltaje y frecuencia nominal y bajo una potencia predeterminada. El voltaje y corriente de distorsión que se introducen por la carga armónica en el transformador aumentara el contenido de corriente dentro de los devanados del transformador, lo que afecta la vida útil del devanado del transformador. (Brito, 2016). Debido al aumento de corriente es necesario establecer una capacidad del transformador equivalente al factor que depende la magnitud de la carga no lineal. La IEEE C57.110 es utilizada para establecer la capacidad del transformador equivalente para aplicaciones no lineales. En la IEEE establece dos métodos. (Brito, 2016).

- Introducción de un caso de estudio
- Alcance del trabajo

Para el diseño de un transformador con factor K se calcula la capacidad equivalente del transformador y es necesario conocer los parámetros de diseño del transformador tales como:

- Pérdidas de carga total
- Pérdidas totales
- Perdidas en los devanados
- Perdidas de cobre

1.7.2 Transformador en Zigzag

Los armónicos homopolares inyectados por cargas no lineales contaminan la calidad de los sistemas de suministro, creando un mayor porcentaje de distorsión en el conductor neutro de la fuente de alimentación (Karthi, 2017).

Si el primario se conecta en delta de un transformador de distribución solo puede eliminar los armónicos homopolares inyectados a la red, pero la corriente de neutro causada por el flujo de cargas de armónicos homopolares no se eliminará, además los filtros pasivos basados en LC pueden crear resonancia en los sistemas de alimentación, por esa razón el uso de un transformador en zigzag reduce la corriente en el conductor neutro haciendo más llamativo por las siguientes razones:

- Relativamente más económico que un sistema basado en LC
- Simplicidad
- Facilidad de instalación en los sistemas de distribución existentes
- Capacidad de mantener las corrientes neutras locales
- Elimina la necesidad de instalar un cable neutro de mayor tamaño

En la Fig. 16, suponiendo que la corriente consumida por las cargas tiene componentes fundamentales de corriente, así como corrientes del armónico homopolar que se acumulan en el punto neutro, las corrientes fundamentales en el punto neutro algebraicamente serían cero y la componente del armónico homopolar es 3 veces las corrientes de fase ya que son de igual fase y magnitud.

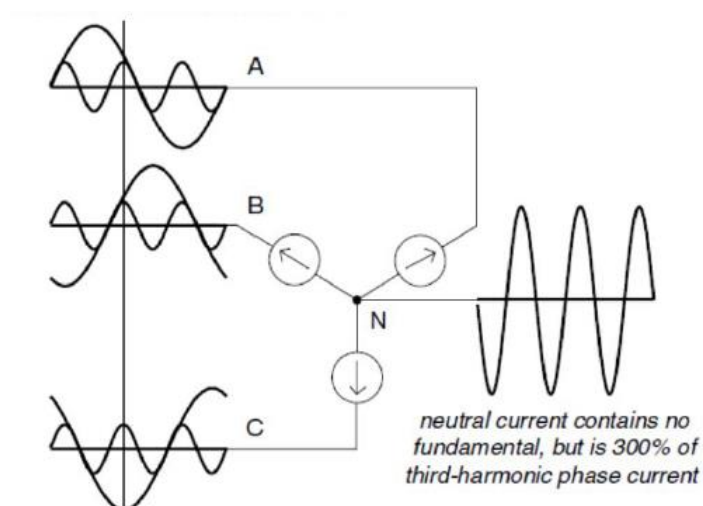


Fig. 16 Corrientes altas en el neutro en el servicio de cargas no lineales
Fuente: (Karthi, 2017)

En la Fig.17 el transformador de cancelación de armónicos mejora la forma de onda al cancelar el flujo armónico en el núcleo del transformador y, por lo tanto, reduce la distorsión de la forma de onda de voltaje, además mejora la eficiencia general del transformador al reducir las pérdidas de calor debido a las cargas armónicas.

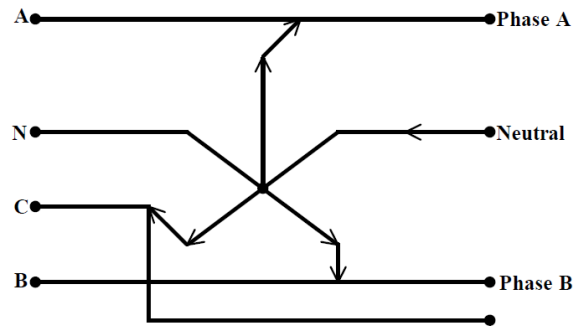


Fig. 17 Flujo de corrientes en transformadores en zigzag
Fuente: (Karthi, 2017)

1.7.3 Transformador con filtro activo

El sistema de mitigación por filtros activos emplea un inversor de filtro activo conectado en serie con el conductor neutro para suprimir los armónicos homopolares en el mismo, además los filtros activos pueden aliviar los problemas de sobrecalentamiento que se presenta en el conductor neutro como en el transformador de distribución utilizando solo un filtro activo en serie. (Bhushan, 2015).

En la Fig.18 se muestra un sistema de prueba en que se generan los armónicos de cargas no lineales conectadas y se triplican los armónicos de clase homopolar que son predominantes en las fases y en el conductor neutro, la magnitud del armónico homopolar en el conductor neutro es muy alto antes de la compensación del filtro de potencia activa en serie.

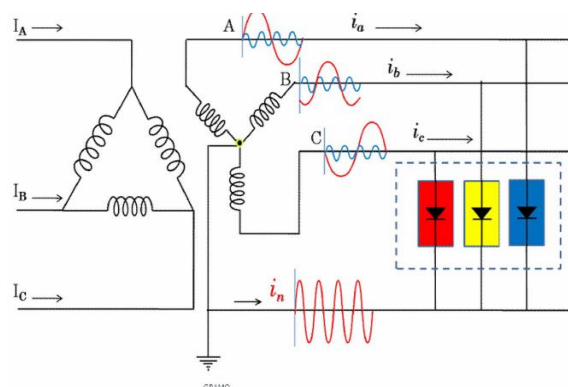


Fig. 18 Sistema de prueba para una distribución trifásica de cuatro hilos
Fuente: (Bhushan,2015)

La Fig. 19 muestra el esquema de filtrado activo, el filtro activo está conectado en serie con el conductor neutro del sistema de distribución trifásico de cuatro hilos, la corriente del neutro se mide para el controlador. Se puede utilizar un transistor bipolar de puerta aislada (IGBT) de conmutación para implementar un filtro activo.

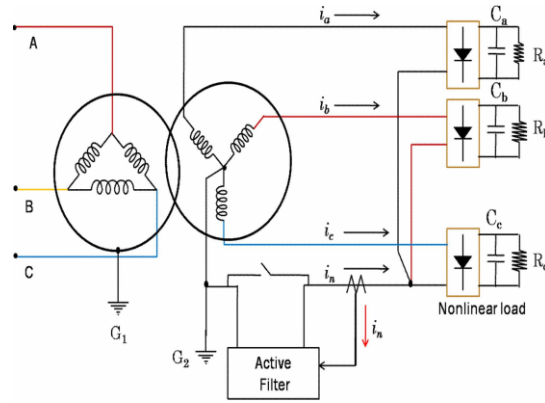


Fig. 19 Esquema de filtro activo para un sistema de distribución
Fuente: (Bhushan,2015)

CAPÍTULO 2

Diagnóstico de las Instalaciones Eléctricas Edificio FICA.

2.1 Introducción

Para iniciar con la propuesta técnica para la verificación de armónicos en el conductor neutro en las instalaciones de la Facultad de Ingeniería en Ciencias Aplicadas (FICA) en el tablero de control, se utilizó un equipo que cumpla con los requerimientos básicos establecidos por la normativa IEEE 519-1992 para posteriormente aplicar la metodología adecuada de estudio.

2.2 Descripción del lugar de estudio

La Facultad de Ingeniería en Ciencias Aplicadas (FICA) es una unidad académica de la Universidad Técnica del Norte, es uno de los 12 campus universitarios que se encuentran ubicados en el sur con la biblioteca universitaria, al este con el edificio Facultad de Ingenierías en Ciencias Agropecuarias y Ambientales (FICAYA), al oeste un espacio compartido entre el edificio FICA y con el edificio Ciencias de la Salud (FCCSS), tal como se muestra en la Fig. 20.

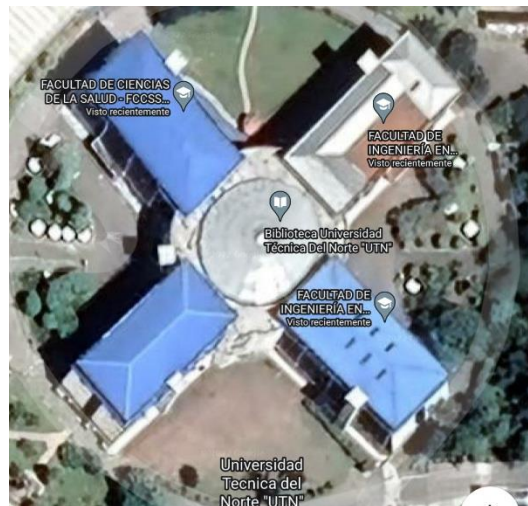


Fig. 20 Instalaciones de la Facultad de Ingeniería en Ciencias Aplicadas (FICA)
Fuente: (Google, s.f.)

El edificio FICA está constituido por 5 pisos, dentro de sus instalaciones, existen varias dependencias como: oficinas administrativas, aulas de clases, laboratorios, baños, oficinas de carrera, auditorios. Además, en cada piso cuenta con una caja de distribución de energía conectada al tablero principal de distribución en cual se encuentra ubicado en la planta baja, junto al ascensor como el observa en Fig. 21.



Fig. 21 Tablero de Control FICA
Fuente: Autor

2.3 Situación actual del sistema eléctrico de la Facultad de Ingeniería de las Ciencias Aplicadas.

La Universidad Técnica del Norte cuenta con 12 transformadores distribuidos en el campus universitario que se dividen en 10 transformadores trifásicos de 75 kVA y 2 transformadores monofásicos de 50 kVA. El transformador de 75 kVA, se encarga de abastecer a los edificios FICA, FICAYA y el sistema externo de iluminación de las facultades antes mencionadas, como se observa en la Fig. 22.



Fig. 22 Transformador de 75 kVA FICA-FICAYA
Fuente: Autor

2.4 Metodología

Para la recopilación de datos y análisis de la información se implementó la metodología mostrada en la Fig. 23 con los pasos detallados para la medición de los armónicos homopolares en el neutro presente en una instalación eléctrica de 220v de la facultad:

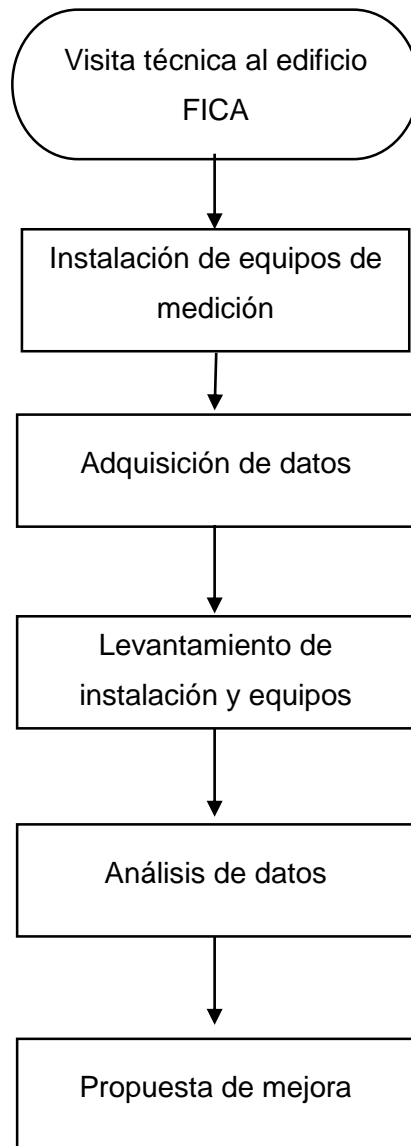


Fig. 23 Flujograma de procesos
Fuente: Autor

1. Ubicar el punto de unión común entre el transformador con el edificio, el caso de estudio se instaló en el tablero de control de edificio.
2. Identificar la topología de conexión de la alimentación del sistema: (transformador trifásico (conexión delta-estrella)).
3. Colocar los equipos de medición en el tablero de control en cada una de las fases, en el neutro y en la tierra.

4. Analizar las posibles distorsiones armónicas presentes en el neutro de las instalaciones, observando los valores eficaces de cada voltaje/corriente armónica promediada cada 10 minutos.
5. Realizar el levantamiento de la facultad, especificando de manera general cada uno de los equipos instalados en las diferentes aulas, laboratorios, auditorios.
6. Realizar una propuesta técnica con los datos obtenidos en el equipo de medición y el levantamiento de la facultad con el fin de buscar la mejor forma de reducción de armónicos en el neutro.

2.5 Requerimientos de equipos de utilizar

Debido al tipo de equipos disponibles en las instalaciones de la carrea de electricidad para realizar este tipo de mediciones se debe aplicar las normas europeas EN e IEC, la cual dispone tener las siguientes características en el equipo:

- Osciloscopio: proporciona el tipo y grado de distorsión de manera cualitativa.
- Analizador de Espectro: visualiza la distribución de potencia de una señal en función a la frecuencia.
- Analizador de Armónicos y Flicker: mide la amplitud de una función periódica y las diferentes fluctuaciones presentes en el sistema eléctrico.

Características buscar en el manual del equipo

- Analizador de Distorsión: mide la distorsión total de armónicos (THDv).
- Equipo de Medición de Armónicos Digital: el equipo debe de poseer una memoria interna que nos permita grabar la forma de onda con un suficiente ancho de banda, estos equipos brindan el uso de los datos tomados durante el periodo de tiempo para realizar cálculos fuera de línea.

2.6 Equipo de medición

El equipo que se va a utilizar es un analizador de redes marca METREL PowerQ4 Plus, suministrado por el técnico docente de la carrera, dicho analizador ha sido diseñado y comprobado de acuerdo con las normas europeas que se indican en la tabla 2.1:

TABLA 2.1
NORMATIVAS DEL ANALIZADOR DE REDES

Normativas	Descripción
Compatibilidad electromagnética (EMC) EN 61326-2-2: 2006	Emisión: Equipo de clase A con fines industriales
Seguridad (LVD) EN 61010-1:2001	Seguridad para equipos eléctricos de control, medida y uso de laboratorio.
Métodos de medición	

IEC 61000- 4- 30: 2008	Clase S: Técnicas de medida de la calidad de energía.
IEC 61557- 12: 2007	Equipos para medida o vigilancia de las medidas de protección.
IEC 61000- 4- 7: 2002 + A1	Clase II: Guía general para medidas de armónicos e interarmónicos.
IEC 61000- 4- 15: 2010	Equipos para medidas de flicker, especificaciones funcionales y diseño.
EN 50160: 2010	Características de voltaje suministrada por redes generales de distribución.

Fuente: (Manual de usuario PowerQ4 Plus)

En la tabla 1 se especificó las normas europeas como EN e IEC en las que trabaja el analizador. Todas las normativas de la serie EN son equivalentes a las normativas IEC con el mismo número de serie (EN 61010 = IEC 61010) y únicamente se diferencian en los procedimientos de armonización europeo.

2.6.1 Características y capacidad

El analizador cuenta con diferentes canales para la adquisición de datos los cuales se son:

- Características generales
- Capacidad de medición
- Características de seguridad

2.6.2 Características generales.

Sus terminales de medición de voltaje y corriente, registra todas las magnitudes simultáneamente, sin ninguna limitación, en CC y CA. Como se observa a continuación las características del equipo en la tabla 2.2:

TABLA 2.2
CARACTERÍSTICAS DEL ANALIZADOR

Certificaciones:	Certificación de conformidad CE (Unión Europea) Desarrollo, Fabricado ISO 9001- 2000 Certificación PASS. _ Instrumentos con prisión a la ficha técnica de cada modelo
Velocidad de muestreo:	25 kHz/ 10 MHz
Voltaje de Alimentación:	100 a 230 VAC 132 a 375 VDC
Frecuencia de alimentación:	45 a 65 Hz
Seguridad:	EN 61010-1: 2001
Consumo de energía:	150 mA- sin pilas

Capacidad de memoria:	1 A- durante la carga Flash de 8 MB
Interface:	USB 1.0 tipo B RS 232 tipo PS/2 de ocho patillas
Dimensiones:	(220 x 115 x 90) mm
Peso:	0.65 kg (sin accesorios)
Índices de protección:	IP 42
Posición de operación:	90°

Fuente: (Manual de usuario PowerQ4 Plus)

2.6.3 Capacidad de medición

Con el analizador Metrel PowerQ4 plus se puede medir cada fase en forma individual y trifásica, los datos obtenidos son observados por el programa PowerView V2.0 (instantánea de forma de onda o vista online). En la siguiente tabla 2.3 se observa las características de medición del analizador.

TABLA 2.3
CAPACIDAD DE MEDICIÓN DEL ANALIZADOR

Descripción	Cantidad
Voltaje de entrada máxima (Fase- Neutro):	1000 Vrms
Voltaje de entrada máxima (Fase- Fase):	1730 Vrms
Impedancia de entrada fase- neutro:	6 MΩ
Impedancia de entrada fase- fase:	6 MΩ
Convertidor AD	16 bits, 8 canales

Fuente: (Manual de usuario PowerQ4 Plus)

Con los valores que trabaja el analizador observados en la tabla 3, el equipo dispone de 3 escalas de voltaje, dependiendo de la función del voltaje nominal de la red, como se observa continuación:

- Voltaje de fase nominal: 50 V - 110 V
- Voltaje de fase nominal: 110 V - 240 V
- Voltaje de fase nominal: 240 V - 100 V

2.6.4 Diagramas de conexiones principales

El analizador cuenta con 4 terminales de entrada de transformadores de corriente de pinza (I_1 , I_2 , I_3 , I_N) y 5 terminales de entrada de voltaje (L_1 , L_2 , L_3 , N, GND), como se observa en la Fig. 24, las ubicaciones de los conectores en el analizador de redes. El voltaje máximo permisible entre los terminales de entrada, voltaje y tierra es de 1000 Vrms (valor eficaz).



Fig. 24 Panel de conectores superior
Fuente: (Manual de usuario PowerQ4 Plus)

En sistema trifásicos para la instalación del analizador en el tablero de control, se realiza las conexiones tal como se muestra en la Fig. 25. Se colocó primero las pinzas de corriente fase A (L1), B (L2), C (L3) y N (Neutro). Las pinzas estas marcas con una flecha que indica la polaridad de señal correcta.

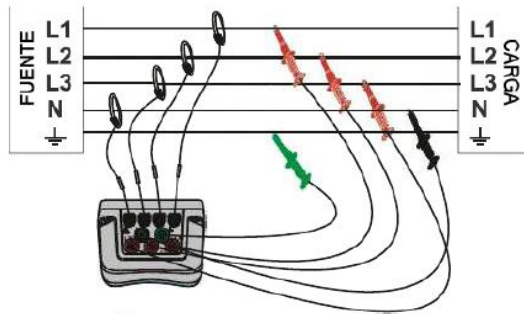


Fig. 25 Sistema trifásico de 4 hilos
Fuente: (Manual de usuario PowerQ4 Plus)

2.6.5 Programación Básica Metrel PowerQ4 Plus

La selección de las funciones de medida y el ajuste de los valores de configuración se realiza mediante el menú de la pantalla. En la Fig. 26, se muestra las diferentes funciones que posee el analizador para interactuar con los datos tanto en el momento del análisis como al finalizar el mismo.

F1	HOLD	Captura de imagen de forma de onda: Retener las mediciones en la pantalla
	SAVE	Guardar el resultado retenido en la memoria
F2	RESET	Reiniciar los valores MAX ½ y MIN ½ ($U_{Rms(1/2)}$ y I_{Rms})
	f	Mostrar la tendencia de frecuencia (disponible únicamente durante el registro)
F3	1 2 N A A	Mostrar las mediciones para la fase L1
	2 2 N A A	Mostrar las mediciones para la fase L2
	3 2 N A A	Mostrar las mediciones para la fase L3
	1 2 3 N A A	Mostrar las mediciones para el canal neutro
	1 2 3 N A A	Resumen de las mediciones de todas las fases Mostrar las mediciones de las tensiones entre fases
F4	METER	Cambiar a la vista MEDIDOR
	SCOPE	Cambiar a la vista OSCILOSCOPIO
	TREND	Cambiar a la vista TENDENCIA (disponible únicamente durante el registro)
ESC		Regresar a la pantalla "MEDICIONES"

Fig. 26 Funciones de teclas
Fuente: (Manual de usuario PowerQ4 Plus)

2.7 Software Metrel PowerView V 2.0

El software Metrel PowerView es un programa con licencia libre el cual ayuda a la exportación de los datos registrados de analizador Metrel PowerQ4 Plus. A través de una interfaz dinámica que permite encontrar los datos extraídos de manera eficiente. Como se observa en la Fig. 27, posee un entorno de trabajo que permite una selección rápida de los datos para su posterior análisis.

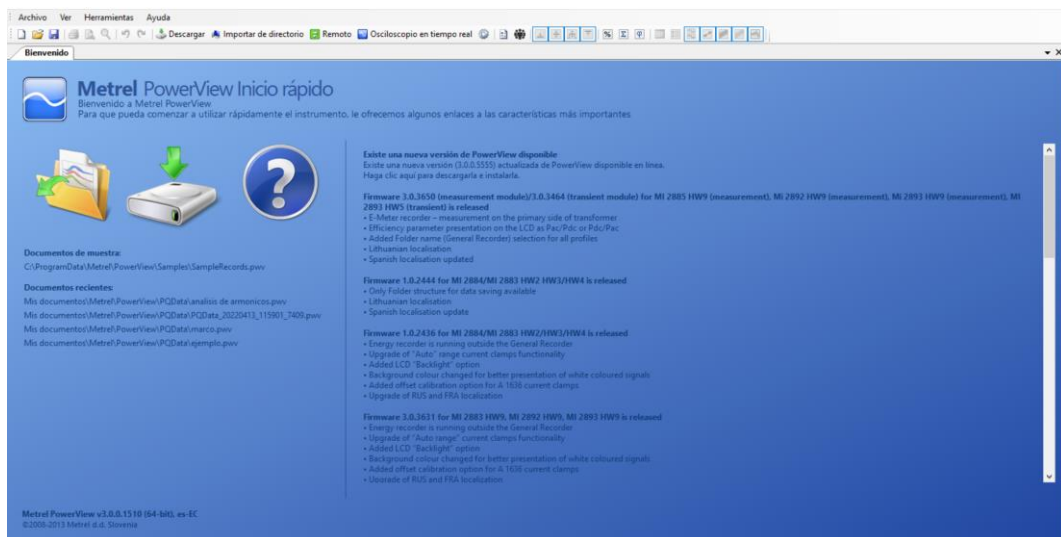


Fig. 27 Interfaz principal Metrel Power View
Fuente: Autor

2.7.1 Interfaz de usuario

El software Metrel PowerView brinda la posibilidad de deshacer/rehacer cambios de los registros extraídos del analizador, además en la sección nodos de datos permite el análisis de los datos registrados y subdividiéndolos en canales más específicos. El usuario puede añadir anotaciones personalizadas (cuadros, fechas, globos de anotaciones) a los gráficos y guardar justo con los datos.

El usuario puede crear múltiples anotaciones y la disposición del gráfico y dar a cada una de las anotaciones un nombre específico facilitando el intercambio de datos, debido a que es más accesible destacar los puntos de interés, como indica la Fig. 28.

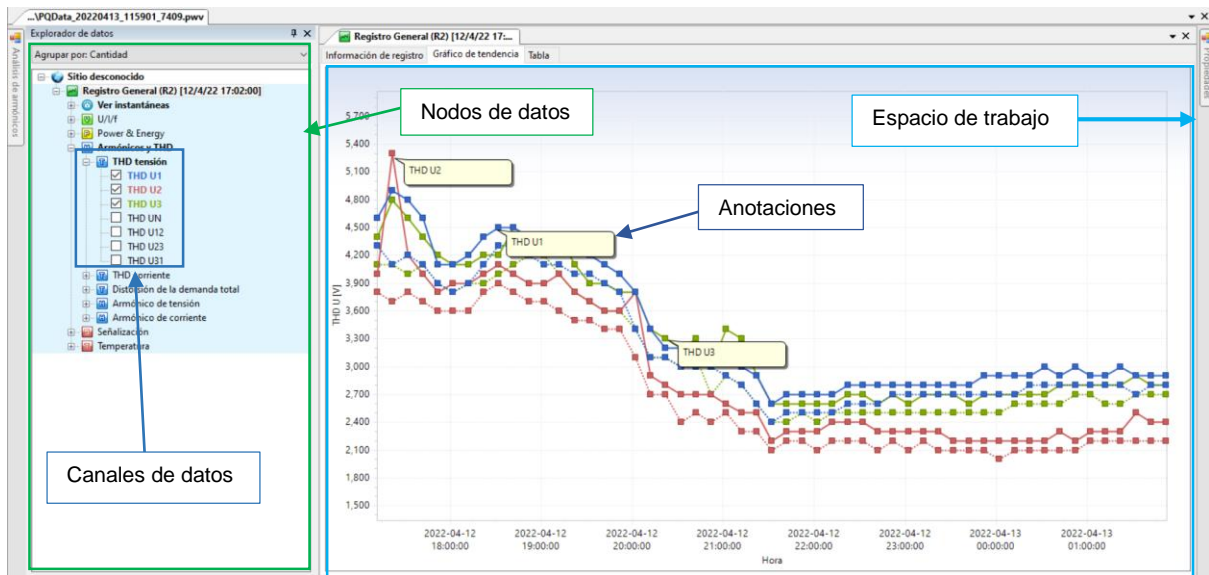


Fig. 28 Interfaz de usuario
Fuente: Autor

En interfaz que se presenta en la Fig. 27 se disponen los valores de V, I, f, potencia y energía, flicker, armónicos, THD, desbalance, señalización, temperatura.

2.8 Fórmulas de los armónicos en los sistemas eléctricos

El grado de tolerancia en un sistema de alimentación depende de la carga, los equipos más sensibles se caracterizan por la fuente de conmutación y procesamiento de datos. Sin embargo, para este tipo de cargas más sensibles a los armónicos de voltaje y corriente pueden ser perjudiciales al paso del tiempo, produciendo mayores calentamientos y esfuerzos en los aislantes.

2.8.1 Distorsión armónica de voltaje

Según la Regulación ARCERNNR – 002/20 explica que la evaluación de distorsión armónica individual de voltaje y la distorsión armónica total de voltaje, conforme a las siguientes ecuaciones:

En la ecuación 1 se describe la fórmula para el cálculo del armónico individual de voltaje

$$V_{h,k} = \sqrt{\frac{1}{200} \sum_{i=1}^{200} (v_{h,i})^2} \quad (Ec. 1)$$

Para el cálculo del factor de distorsión individual de voltaje se aplica la ecuación 2 donde interfieren los valores de: voltaje eficaz y voltaje de los armónicos.

$$DV_{h,k} = \frac{V_{h,k}}{V_{h,1}} * 100[\%] \quad (Ec. 2)$$

El THD muestra el factor de distorsión armónica total de voltaje siendo el que afecta directamente el estado actual sobre el sistema de estudio, la ecuación 3 describe la metodología de cálculo porcentual de este valor.

$$THD_k = \left[\frac{1}{V_{h,1}} \sqrt{\frac{1}{200} \sum_{h=2}^{50} (v_{h,i})^2} \right] * 100[\%] \quad (Ec. 3)$$

Donde:

- $V_{h,k}$ = Armónico de voltaje h en el intervalo de 10 minutos.
- $V_{h,i}$ = Valor eficaz (rms) de un armónico de voltaje h (para $h = 2, 3, \dots, 50$), medido cada 3 segundos ($i= 1, 2, \dots, 200$).
- $DV_{h,k}$ = Factor de distorsión individual de voltaje del armónico h (para $h = 2, 3, \dots, 50$)
- THD_k = Factor de distorsión armónica total de voltaje.
- $V_{h,1}$ = Valor eficaz (rms) de la componente fundamental de voltaje en el punto de medición.

2.8.2 Ecuaciones para dimensionamiento de filtro LCL

Para el cálculo de los parámetros del filtro LCL se aplica la metodología construcción por polos que se detalla a continuación. (Ponce, 2020).

Para el dimensionamiento de la magnitud del capacitor, se toma en consideración la función de transferencia del circuito, se procede a modelar el sistema teniendo en cuenta que es una red de un puerto.

$$Z_{th} < \frac{1}{50} \left(\frac{V_p}{I_p} \right) \quad (Ec. 4)$$

Donde:

Z_{th} = Impedancia Thévenin

V_p = Voltaje pico

I_p = Corriente pico

Con la fórmula anterior se hace uso para encontrar reactancia capacitiva, para posteriormente poder calcular la capacidad del condensador.

$$X_c = \frac{1}{\omega^2 \left[-\left(\frac{1}{Z^2}\right) \left(\frac{1}{P^2 - Z^2}\right) \omega^2 + \frac{1}{Z^2} + \frac{1}{P^2 - Z^2} \right]} \left(1 - \frac{\omega^2}{Z^2}\right) Z_{th} \quad (Ec. 5)$$

Donde:

X_c = Reactancia capacitiva

Z = Impedancia

ω = velocidad angular

Una vez calculado la reactancia capacitiva se procede a reemplazar en la ecuación para el cálculo del capacitor mediante el uso de la siguiente ecuación en donde se reemplaza el valor anteriormente calculado.

$$C = \frac{1}{2\pi * f * X_c} \quad (Ec. 6)$$

Donde:

C = capacitor

f = frecuencia

Con base al resultado obtenido en la ecuación anterior se puede dimensionar la magnitud de los inductores tanto de alta como de baja frecuencia, tenemos para el primer inductor L_1 .

$$L_1 = \frac{1}{Z^2 * C} \quad (Ec. 7)$$

Una vez encontrado el valor del primer inductor se procede al cálculo del inductor L_2 .

$$L_2 = \frac{1}{C(P^2 * Z^2)} \quad (Ec. 8)$$

Se debe de tener en cuenta los parámetros de densidad del flujo, material del núcleo y la capacidad de corriente a trabajar.

2.9 Mediciones y adquisición de datos

El equipo Metrel PowerQ4 Plus fue instalado en las acometidas del tablero principal de distribución de la facultad para efectuar las mediciones correspondientes, para instalar el equipo se debe tener en cuenta las siguientes consideraciones:

- Determinar la secuencia de fases para no tener errores de medición.
- Las líneas de tierra y neutro debe ser conectadas al mismo punto de medición.
- Deber tener una alimentación externa fija para evitar que el equipo entre en estado de suspensión o se apague para evitar pérdida de información.
- Se debe tener en cuenta la dirección del flujo de corriente para la colocación de las pinzas.

Con las consideraciones anteriormente mencionadas se procedió a detectar en el tablero de control la secuencia de las fases para conectar las pinzas de corriente y las entradas de voltaje, como se observa en la Fig. 29.

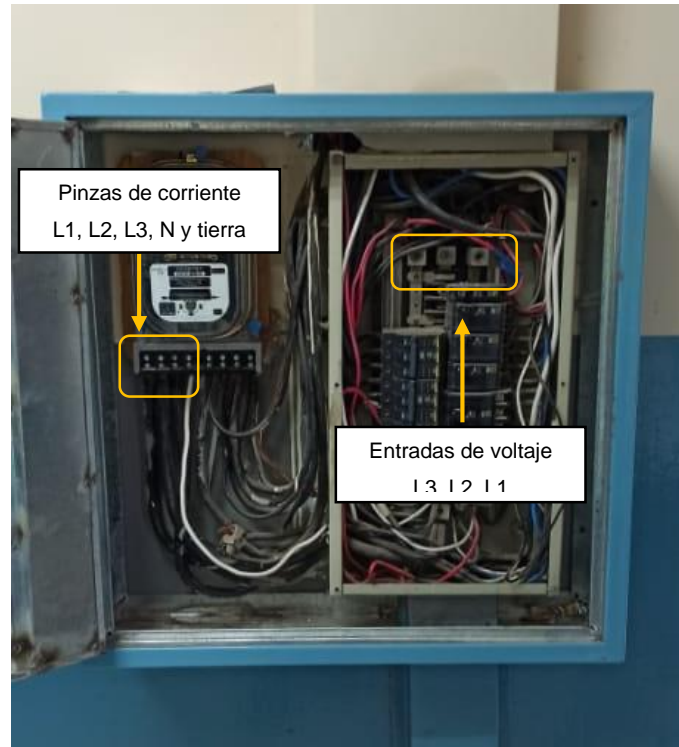


Fig. 29 Detección de las fases en el tablero de control
Fuente: Autor

A continuación, se realizó la conexión de las pinzas de voltaje: conexión con la toma de tierra y luego con N, A (L1), B (L2) y C (L3), sucesivamente. Para obtener un resultado correcto en la adquisición de datos en el tablero de control. Se debe de comprobar dos veces las conexiones con la ayuda de un multímetro para la correcta instalación de las pinzas. Asegúrese de que las pinzas de voltaje estén firmemente conectadas, como se observa en la Fig. 30.

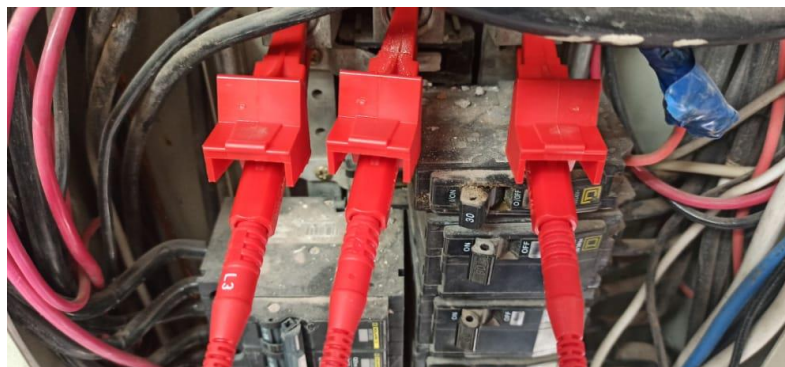


Fig. 30 Conexión de las pinzas de voltaje
Fuente: Autor

Las pinzas de corriente se instalaron en la entrada del medidor del tablero de control teniendo en cuenta la orientación correcta de las fases para una correcta adquisición de datos, como se observa en la Fig. 31 la orientación de las fases con las pinzas de corriente.



Fig. 31 Instalación de pinzas de corriente
Fuente: Autor

Finalmente, con la conexión de las pinzas de corriente y voltaje instaladas en el tablero de control se procedió a iniciar el periodo de medición conectando los terminales en el analizador como se observa en la Fig. 32.



Fig. 32 Instalación del analizador de redes en el tablero de control
Fuente: Autor

2.9.1 Programación del equipo Metrel PowerQ4 Plus

Se utilizó un intervalo de medición de 10 minutos suficientes datos para definir con un alto margen de confiabilidad. Cabe resaltar que el intervalo de medición se define como un lapso en el periodo de medición en el que se promedia el valor de la energía a frecuencia fundamental, es decir a 60 Hz, que se rige la Regulación ARCERNNR- 002/20 (Agencia de regulación y control de energía y recursos naturales no renovables).

A efectos de obtener la información apropiada y cumplir con lo establecido con la regulación aplicada, la medición se realizó por el lapso de 7 días continuos, como se observa en la Fig. 33.



Fig. 33 Programación de intervalo de medición
Fuente: Autor

2.10 Levantamiento de sistemas y equipos del edificio FICA

Para comparar la situación actual de la red eléctrica de la facultad se realizó un levantamiento de las instalaciones y equipos para verificar el nivel actual de carga y comparar con los datos del analizador de redes. Se realizó el análisis por pisos, en cada uno de ellos se encontró: aulas de clase, laboratorios y oficinas, contando con diversos equipos eléctricos y electrónicos que aportan carga a la red principal; a continuación, en la tabla 2.4 se muestra la distribución de la carga de iluminación por cada uno de los espacios del edificio FICA.

TABLA 2.4
LEVANTAMIENTO ILUMINACIÓN FICA

Levantamiento iluminación edificio FICA					
Cantidad	Ubicación	Tipo	Cantidad Tubos / Potencia (W)		Carga Instalada (W)
13	Aulas	Tubo Fluorescente	105 (20 W)	3 (40 W)	2220
8	Laboratorios	Tubo Fluorescente	65 (20 W)	1 (40 W)	1340
4	Pasillos	Tubo Fluorescente	39 (20 W)	0	980
		Tubo Led	10 (20W)	0	
8	Oficinas	Tubo Fluorescente	9 (20 W)	0	360
		Tubo Led	9 (20 W)	0	
2	Auditorios	Tubo Fluorescente	50 (20 W)	0	1000
Carga total Instalada					5900

Fuente: Autor

Con la información recopilada en la tabla anterior se observó que la iluminación del edificio FICA en su mayoría predominan tubos fluorescentes, con una potencia de 20 W son las que predominan con un 98,6% (287 tubos) y de 40 W con un 1,37% (4 tubos) teniendo una carga instalada de 5,9 kW. A continuación, en la tabla 5 se detalla la carga instalada de los equipos eléctricos y electrónicos de la facultad.

TABLA 2.5
LEVANTAMIENTO DE EQUIPOS EDIFICIOS FICA

Levantamiento de equipos edificio FICA					
Ubicación	Equipos	Cantidad	Potencia (W)	Carga Instalada (W)	
Aulas	Proyector	13	200	2600	
Laboratorios	Proyector	8	200	1600	
	Computadoras	131	120	18120	
Oficinas Revisar	Computadoras	34	80	960	
Auditorios	Proyector	8	120	200	
	Computadoras	1	200	65	
Carga total Instalada					23545

Fuente: Autor

La carga instalada de los equipos de oficina y los equipos audiovisuales representa una cantidad elevada del consumo de la facultad con un valor de 23,85 kW. En los equipos encontrados en el levantamiento se encuentran componentes que inyectan armónicos, en la tabla 2.6 se especificó cada uno de ellos.

TABLA 2. 6
COMPONENTES DE EQUIPOS

Descripción	Componentes de inyección armónica
Tubo fluorescente	Balastro electrónico
Computadoras	Fuente de alimentación, transistores
Proyector	Transitares

Fuente: Autor

Debido a que los equipos encontrados en el levantamiento, presentan componentes no lineales como: transistores IGBT's, fuentes conmutadas y balastos electrónicos, se concluye la existencia de armónicos que por su naturaleza producen armónicos del tercero al quinto orden, de tal forma que serán corroborados con el análisis que se obtiene mediante el analizador de redes.

2.11 Adquisición de datos del equipo de medición

Después de haber culminado el periodo de medición de datos se procedió a retirar el equipo del punto de medición y proceder a realizar la extracción de los datos de la memoria del mismo, esto se lo realizo mediante el programa Metrel PowerView v3, en la cual se presenta la siguiente interfaz principal que se observa en la Fig. 34.

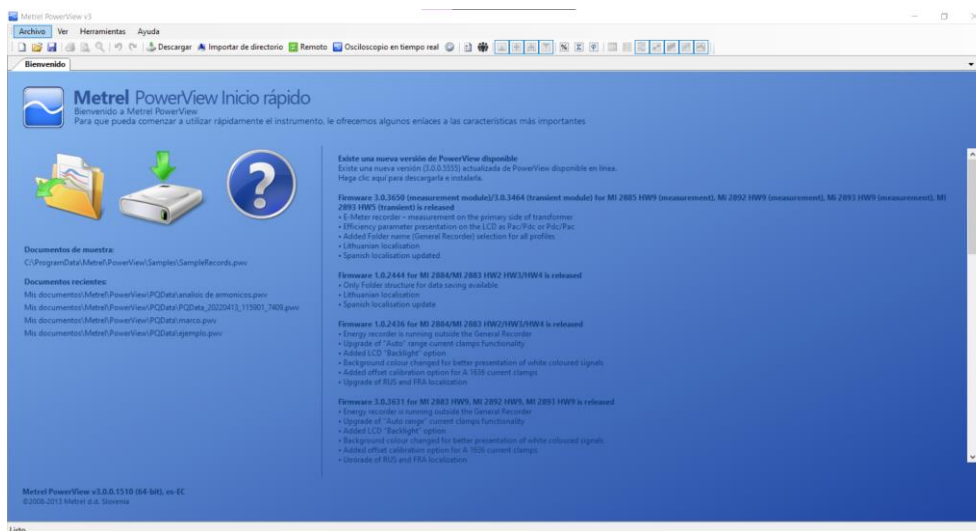


Fig. 34 Interfaz principal Metrel PowerView
Fuente: Autor

Una vez ejecutado el programa se procedió a cargar el archivo que contiene la información extraída del analizador de redes que se observa en la Fig. 35.

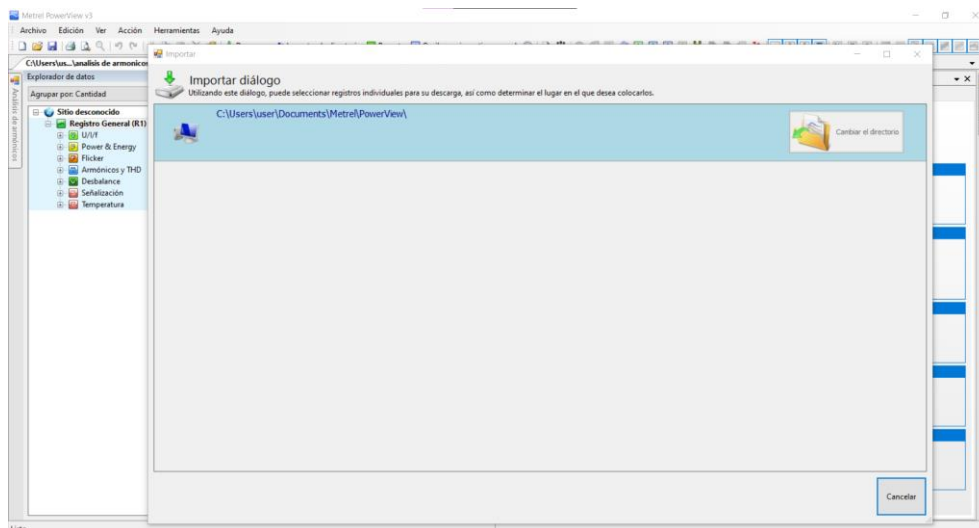


Fig. 35 Importación de datos al programa Metrel PowerView
Fuente: Autor

2.12 Análisis de datos Analizador Metrel PowerQ4 Plus

Una vez importado los datos de analizador al software Metrel PowerView, se realizó un análisis de potencia consumida como se muestra en la Fig. 36.

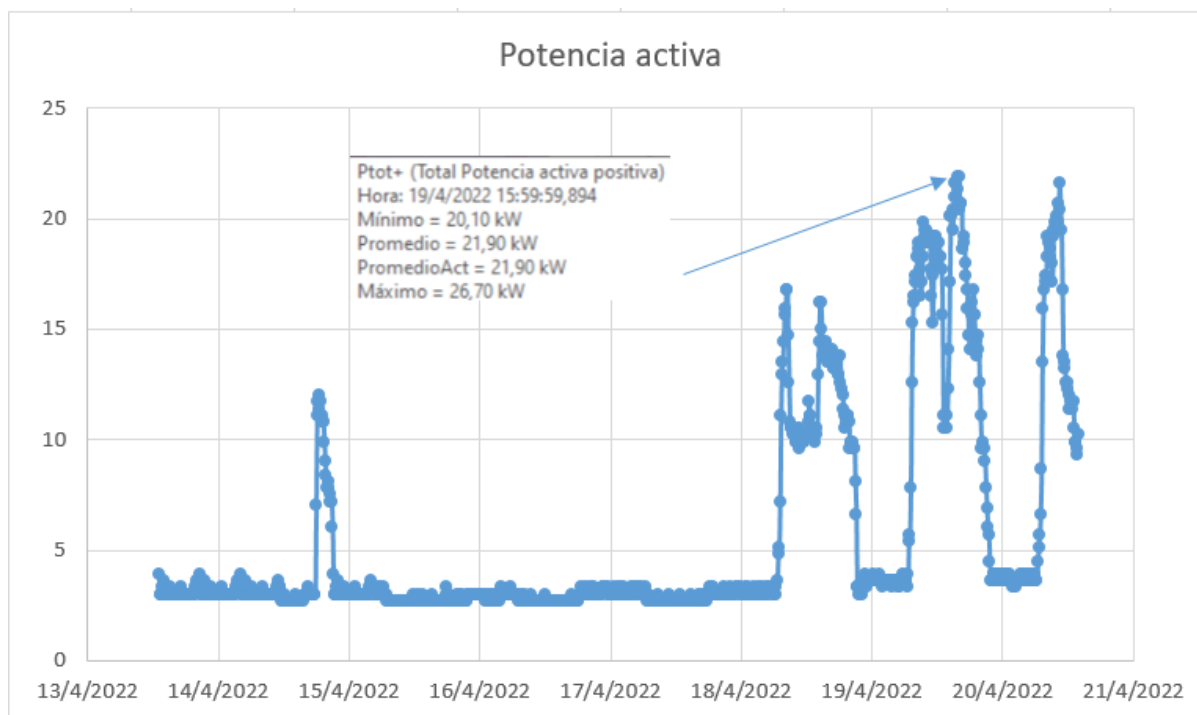


Fig. 36 Potencia consumida edificio FICA
Fuente: Autor

Mediante la información del analizador se observa que en el edificio existe un consumo de potencia media de 21,30 kW lo cual al comparar con la carga máxima instalada nos demuestra que se encuentra en los rangos de consumo. El análisis realizado por el analizador de redes es mayor en comparación al levantamiento debido a los equipos que no se tuvieron acceso en las instalaciones, también por los equipos que llevan los docentes, secretarias y estudiantes a la facultad dando una potencia menor en el levantamiento de los equipos e iluminación.

A continuación, realizo el análisis de armónicos homopolares existentes en la red del edificio FICA, se tomando en cuenta el análisis de armónicos de fase y los armónicos inyectados en el conductor neutro.

2.12.1 Distorsión armónica total de voltaje en el edificio FICA

La distorsión armónica total (THDV) es el parámetro que indica la distorsión en voltaje o corriente causada por los armónicos en la señal fundamental, también se lo puede determinar como el valor eficaz del armónico respecto a la corriente fundamental o limpia (60Hz). (Brito, 2016).

La principal afectación de los armónicos que presenta un sistema es por la conexión de los equipos en la red generando una distorsión armónica total (THD) en los sistemas trifásicos se tiene un retorno en el conductor neutro (solo los armónicos homopolares), pudiéndose expresar como ejemplo que si en un sistema trifásico se tiene un consumo de 25 A por fase se tendría un retorno de 75 A del armónico homopolar por el neutro.

Con los datos del analizador se determinó el nivel porcentual de la distorsión armónica total, en la Fig. 37 muestra el THDV generado en las fases.

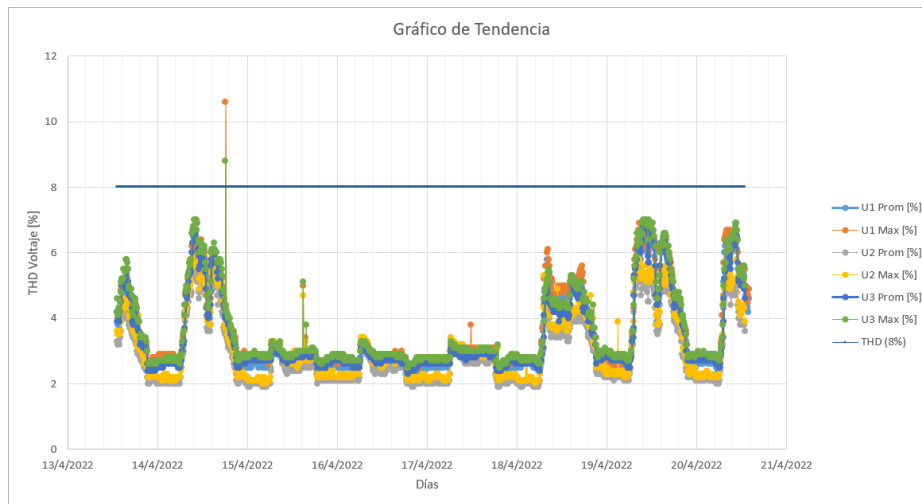


Fig. 37 THDV del edificio FICA
Fuente: Autor

Con la gráfica mostrada se evidencio que el nivel de THDV generado en el edificio FICA se tiene un valor superior en la fase uno y tres, pero no superan los límites (8%) establecidos por la Regulación ARCERNNR – 002/20.

2.12.2 Armónicos de fase en el edificio FICA

Los armónicos homopolares son característicos de las instalaciones de bajo voltaje de las cuales la mayoría de sus cargas presentan componentes no lineales (transistores, IGBT's entre otros) componentes utilizados principalmente en electrodomésticos y fuentes conmutadas (computadoras, balastos electrónicos (tubos fluorescentes), entre otros).

Con el levantamiento se observó que el 95% de las cargas corresponden a sistemas no lineales (computadoras, equipos audiovisuales e iluminación), como explica el autor Carnovale: "Los armónicos de las cargas son originados por operaciones no lineales tales como: computadoras, equipos de soldadura, hornos de arco, rectificadores y fuentes de alimentación conmutada". (Carnovale, 2016), por esta razón los equipos presentes en la facultad inyectan armónicos a la red, a continuación, en Fig.38 se indica los niveles de armónicos individuales en cada uno de las fases, con el factor de distorsión armónica individual (5%), establecido por la Regulación ARCERNNR – 002/20.

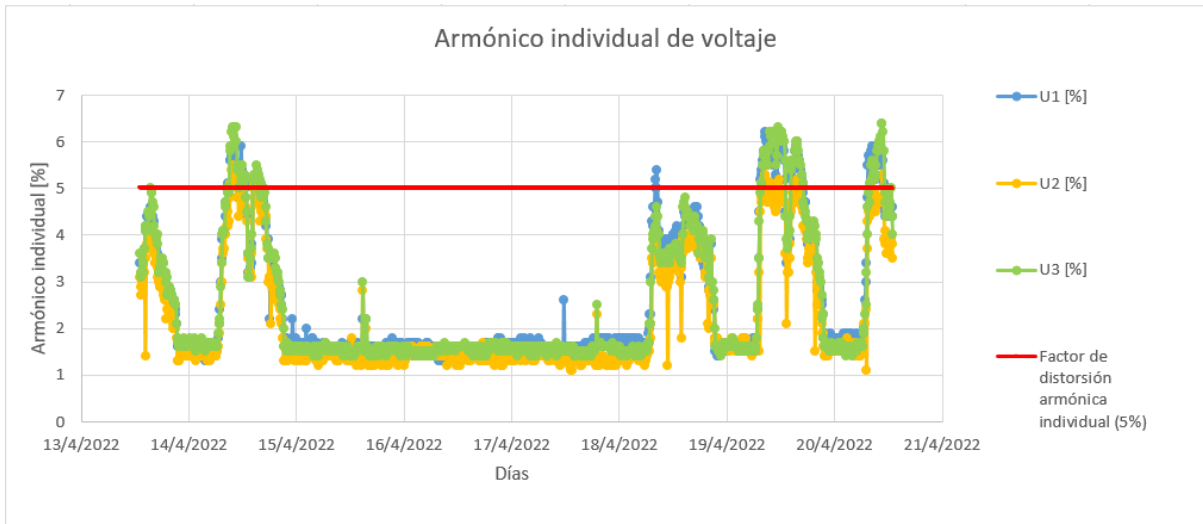


Fig. 38 Armónicos individuales edificio FICA
Fuente: Autor

Con gráfica anterior se observó la existencia de armónicos homopolares con un factor de distorsión en la fase uno de 10.21% y en la fase tres con 9.92%, observando que en las fases anteriormente mencionadas son las de mayor afectación, demostrando la existencia de desbalance en las fases como se observa en la Fig.39.

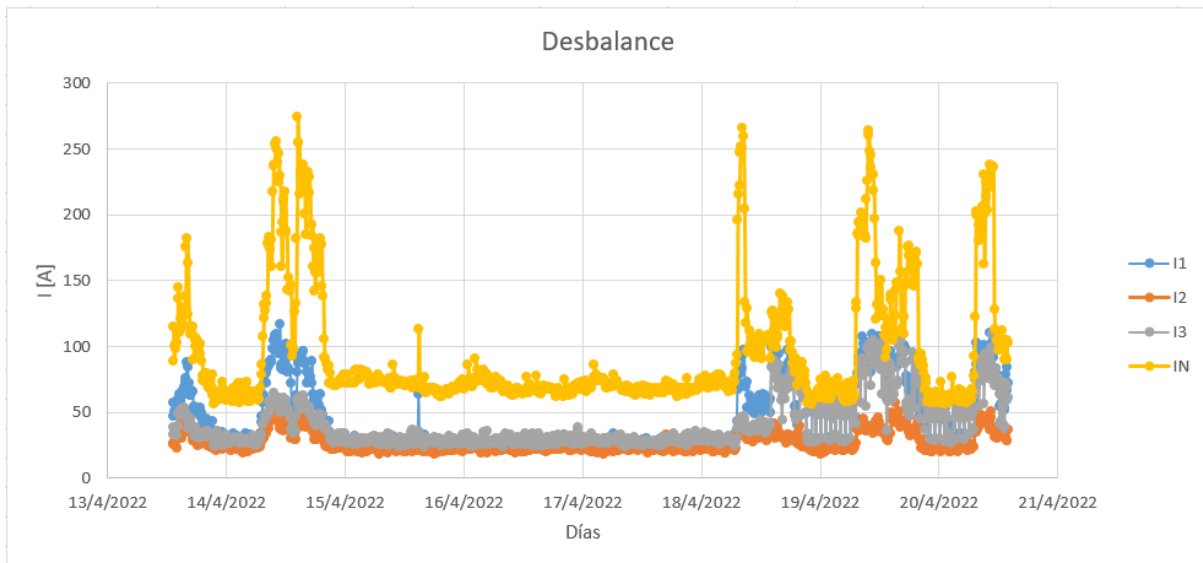


Fig. 39 Desbalance de carga en las fases
Fuente: Autor

En la gráfica anterior se observa la corriente en el conductor neutro supera al de las fases, confirmando la presencia tanto con la gráfica de armónicos individuales (voltaje) y en la gráfica de desbalance de corrientes la existencia de armónicos homopolares en el conductor neutro que incumplen de manera individual pero no grupal. Esto se debe a que el analizador de redes no registra el armónico de voltaje en el conductor neutro, solo registra THDV y IHDV

(distorsión armónica individual de voltaje) en las fases, esto se refleja en el desbalance de las cargas de la Fig. 39.

Además, en las Fig. 37 y Fig. 38 se observan que en los días no laborables (fines de semana y feriados) presentan un nivel bajo de contaminación armónica, demostrando que las oficinas, laboratorios y aulas son los espacios con mayor contaminación de armónicos.

2.12.3 Armónicos de corriente por el conductor neutro en el edificio FICA

En la Fig. 37 se observa que los armónicos en las fases son muy elevados dando como resultado un crecimiento de armónicos en el conductor neutro, pasando por el conductor solo los armónicos homopolares, como se observa en la Fig. 40.

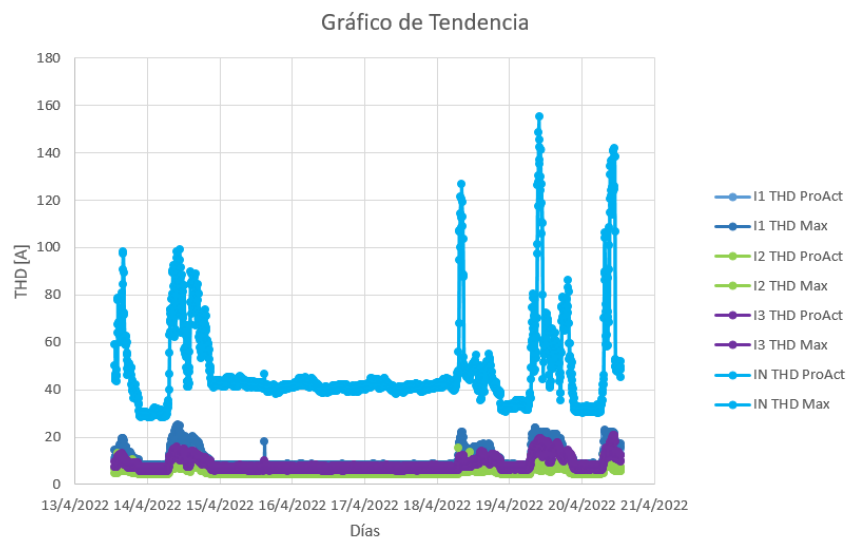


Fig. 40 THDI edificio FICA
Fuente: Autor

En la gráfica anterior se observa la existencia de armónicos de corriente en el conductor neutro, también el nivel de corriente en el conductor anteriormente mencionado es mayor al de las fases con se observa en la Fig. 39. Es necesario enfatizar que en los armónicos de corriente no hay un porcentaje de incumplimiento establecido por alguna regulación nacional e internacional, porque los armónicos de corriente son producidos por la carga, pero los mismos provocan armónicos de voltaje.

Con los datos obtenidos de los armónicos de corriente de las fases y en el conductor neutro se establece los valores de armónicos en el edificio FICA como se observa en la tabla 2.7.

TABLA 2.7
LECTURA DE ARMÓNICOS EN EDIFICIO FICA

Fase

Corriente	L1	L2	L3	Neutro
THD	25,2	13,5	20,7	125,8
Contenido armónico en %				
3ro	6,2	5,5	6,4	31,5
5to	2,7	3,4	2,8	7,3
7mo	1,9	1,9	2	6,3
9no	1,7	1,7	1,7	5,8
11vo	1,7	1,7	1,7	5,87
13vo	1,1	1,4	1,1	4,4
15vo	1,2	1,1	1,3	3,9

Fuente: Autor

En la tabla anterior se observa las distorsiones armónicas totales en cada una de las fases y se aprecia que en el conductor neutro se tiene un valor más elevado, dando como consecuencia un calentamiento por la sobrecarga adicional, como explica el autor Suhel Kaiser Shaikh, en su estudio “Análisis y Aplicación de Transformador Zigzag en Sistema de Distribución para Mitigación de armónicos triples”. (Kaisar, 2020).

Con la tabla 7 se evidencia la presencia de armónicos en el conductor neutro. Como se observa las componentes de los equipos instalados en la facultad como son: Equipos de oficina, equipo audiovisual, tubos fluorescentes. Produciendo un alto contenido de armónicos en el sistema debido a que se agregan corrientes de armónicos homopolares en el conductor neutro, la lectura de la corriente en el neutro es 1,3 veces a la corriente de fase como se aprecia en la Fig. 39. En condiciones de carga completa, estas corrientes en el neutro a largo plazo provocaran un sobrecalentamiento debido a la corriente adicional. (Kaisar, 2020).

Con los datos obtenidos en el analizador y en el lavamiento que se realizó en la facultad se observa la presencia de armónicos homopolares, pero los datos se realizaron el tablero de control y al ser una parte del transformador no se obtienen valores elevados en la distorsión armónica total, pero si un desbalance de las fases.

Capítulo III

Propuesta Técnica para la reducción de armónicos homopolares en el conductor neutro Edificio FICA.

El presente capítulo se procede a realizar el análisis de mitigación de armónicos homopolares en el conductor neutro de la facultad. Para ello, se utilizará varios criterios de evaluación como: desbalance de cargas, puesta a tierra y métodos de reducción de armónicos individuales y grupales en el tablero de control del edificio FICA, de tal modo que con estas estrategias se pueda medir la eficiencia a través de la reducción del neutro.

3.1 Procedimiento y metodologías enfocadas a la reducción de armónicos

Como se describe en capítulo anterior, los problemas causados por los armónicos de voltaje y/o corriente son muy perjudiciales tanto para las cargas que ocasionan las perturbaciones como para el sistema general, deteriorando notoriamente el comportamiento normal de las cargas como también generando pérdidas de energía no deseadas (transformador y conductores eléctricos de la facultad), las mismas que con el nivel de distorsión presentado en el IHD (distorsión armónica individual) de la Fig. 38 con el transcurso del tiempo pueden llegar a ser representativas; además en todos los dispositivos por los cuales circulan corrientes armónicas se produce un deterioro prematuro de su vida útil, disminuyendo así la eficiencia y causando importantes pérdidas económicas.

Es importante por lo anteriormente mencionado realizar una descripción de los procesos enfocados a solucionar los problemas causados por los armónicos en el tablero principal, buscando una disminución parcial de los efectos de las tasas de distorsión armónica de voltaje y corriente.

3.2 Desbalance de cargas del tablero de control de la facultad FICA

En un contexto general, el desbalance de cargas tiene origen por los armónicos de fase en donde se presenta una afectación mayor en la fase uno y tres del tablero de control de la facultad como se observa en la Fig. 39. Para tener un mayor análisis de la distribución de elementos conectados en el tablero de control se observa en la Fig. 41, adicionalmente se encuentra el diagrama detallado en el **Anexo A**.

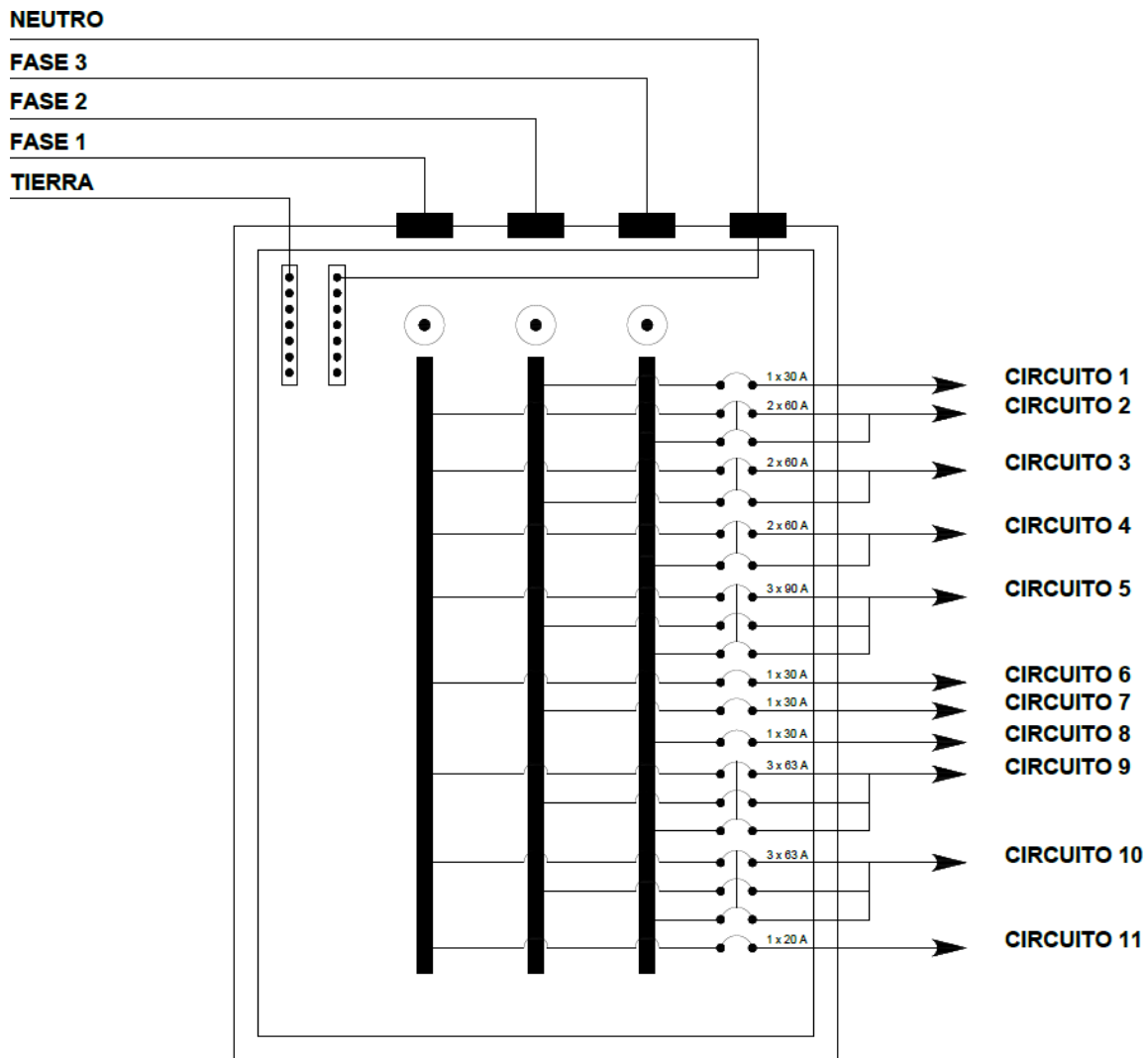


Fig. 41 Distribución del tablero principal del edificio FICA
Fuente: Autor

Con la distribución del tablero de la Fig. 41 se observó la división de las fases que se encuentran distribuidas de manera inadecuada y por ende existe un desbalance en la fase 1 y 3. Con los datos de corriente obtenidos del analizador de redes y con la Fig.41 se establecen los puntos críticos de cada una de las fases exponiendo el valor máximo de corriente en diferentes horas durante el tiempo de medición, como se observa en la tabla 3.1.

TABLA 3.1
DESBALANCE DE CARGA

Desbalance de cargas					
Fecha	Hora	Fase1	Fase 2	Fase 3	Neutro
14/4/2022	10:50	117,3	37,5	50,1	229,3
14/4/2022	15:40	96,3	60,3	62,7	237,5
20/4/2022	10:50	102,6	38,1	109,2	236,8
14/4/2022	14:20	80,1	47,7	59,7	274,6

Fuente: Autor

En la tabla 9 se observa que la fase 1 y fase 3 tienen una elevada carga en comparación a la fase 2, en la fase del neutro supera la carga en comparación a las fases. Confirmando la afectación de armónicos individuales de voltaje en el conductor neutro que incumple de manera individual.

Como se observa en la tabla 8 en el neutro tiene una corriente máxima de 274,6 A registrado el 20/04/2022 teniendo una circulación de corriente mayor que al de las fases debido a que la corriente producida en las líneas no es consumida en su totalidad y sumando la presencia de armónicos aumenta considerablemente la corriente en el neutro. Para un mayor análisis del desbalance que existe en el tablero de control del edificio FICA se realizó una simulación en Simulink/Matlab con los datos obtenidos por el analizador de redes como se observa en la Fig. 42.

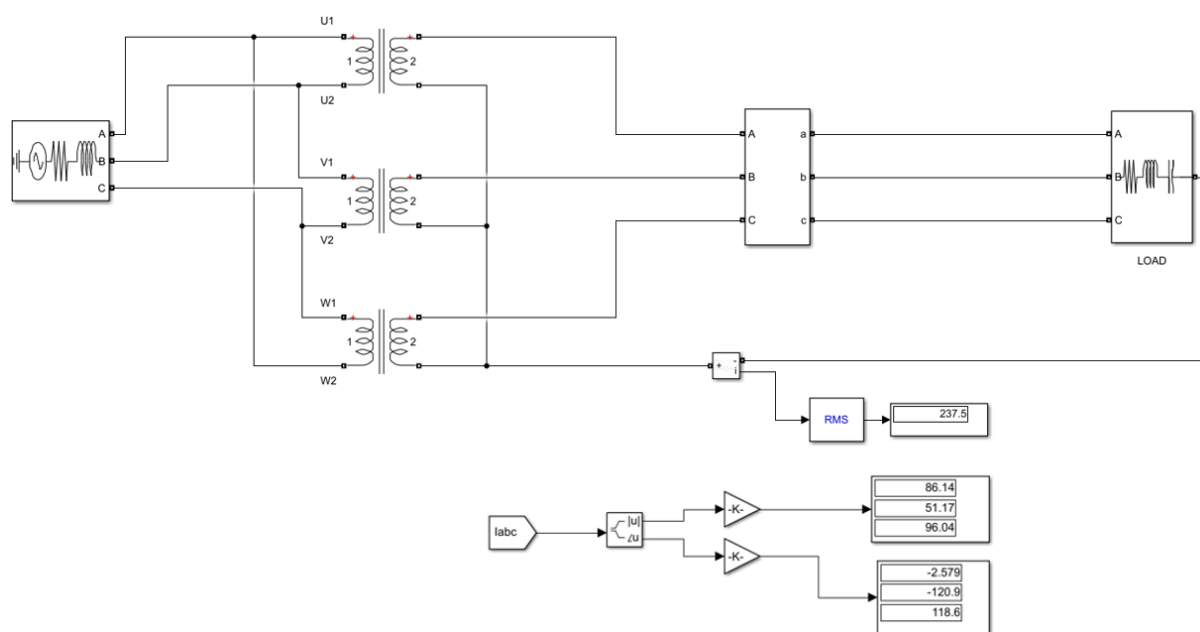


Fig. 42 Desbalance de cargas Simulink
Fuente: Autor

En la figura 42 se observó que la corriente de la fase 1 es de 86,14 A, fase 2 de 51,17 A y fase 3 de 96,04 A, además en el neutro se tuvo un valor de corriente de 237.5 A denotando un desbalance de cargas en la simulación similar a las registradas por el analizador de red e indicando que la fase 1, fase 3 y el neutro son las de mayor afectación.

Como el autor Calderón (2020) en su trabajo de grado con el tema “Análisis de la Eficiencia energética en los sistemas eléctricos en laboratorios y talleres de la facultad de Mecánica de la ESPOCH” se observa los valores de desbalance correspondientes:

TABLA 3.2
BALANCE DE CARGAS

Corrientes del tablero del edificio de la Facultad de Mecánica - ESPOCH		
Fases	I_{max.} [A]	I_{min.} [A]
L1	44,73	2,68
L2	59,82	7,34
L3	48,79	5,73
N	70,6	1,6

Fuente: Calderón, 2020

En tabla 3.2 se observa que las corrientes del tablero del edificio de la facultad de estudio no son elevadas tanto en las fases como en el neutro debido que en tablero de análisis no existía la presencia de armónicos dando como resultado un nivel bajo en el neutro en relación al de las fases. En comparación al estudio que se realizó en el edificio FICA en donde se observa que el desbalance tiene un incremento en el neutro debido a la presencia de armónicos.

3.3 Propuesta de balance de cargas del tablero de control de la facultad FICA

Para la propuesta de balance de cargas en el tablero de control del edificio se tomó en consideración los valores de carga los valores obtenidos por el analizador de redes, a partir de este punto fue necesario realizar un análisis de carga por circuitos para determinar cuáles son los que tienen mayor incidencia sobre la red, con los datos mencionados se pueden verificar en la tabla 3.3:

TABLA 3.3
DISTRIBUCIÓN DE CARGA POR CIRCUITO

Circuitos	Capacidad de la protección	Calibre de conductor (AWG)	Fase que se alimenta	Corriente (A)
Circuito 1	1x30 A	10	2	7,5
Circuito 2	2x60 A	8	1-3	8
Circuito 3	2x60 A	8	1-2	6
Circuito 4	2X60 A	8	1-3	10
Circuito 5	3x90 A	6	1-2-3	12
Circuito 6	1x30 A	12	3	8
Circuito 7	1x30 A	10	1	4

Circuito 8	1x30 A	12	2	3,3
Circuito 9	3x63 A	6	1-2-3	8
Circuito 10	3x63 A	6	1-2-3	15
Circuito 11	1x20 A	8	1	2
Anexo Cir. 12	----		1	10
Anexo Cir. 13	----	----	1	11
Anexo Cir. 14	----	----	2	3
Anexo Cir. 15	----	----	3	10

Fuente: Autor

Como se observa en la tabla 3.3 existen 4 circuitos adicionales los cuales no cuentan con un sistema de protección en el tablero principal, sino que se derivan directamente hacia los tableros de distribución cuya carga es representativa al total consumido dentro del edificio. Estos valores se asemejan a los obtenidos mediante los promedios del analizador mostrando ciertas variaciones, esto es debido a la hora en la que se toma las muestras.

Con las cargas representativas del edificio se determina que un balance de carga equitativa representaría los valores que se muestran a continuación:

TABLA 3. 4
REDISTRIBUCIÓN DE CARGAS

Descripción	Corriente (A)
Fase 1	70
Fase 2	69
Fase 3	73
Corriente total:	212

Fuente: Autor

Para tener un balance correcto en las tres líneas en función de la carga actual que presenta el edificio el valor de corriente promedio aproximado debería encontrarse en un rango de 70 y 73 A por fase. Una vez determinado la capacidad promedio se procedió a realizar la redistribución de los circuitos en cada una de las fases en función a la carga que presentaban cada uno y los nuevos calibres de los conductores, la distribución sugerida se representa de la siguiente manera:

TABLA 3.5
REDISTRIBUCIÓN DE CARGA POR CIRCUITO

Circuito	Protección		Calibre de conductor	Fase	Corriente (A)
	Antigua	Nueva	(AWG)		
Circuito 1	1x30 A	1x25 A	12	2	7,5
Circuito 2	2x60 A	2x25 A	12	1-3	8
Circuito 3	2x60 A	2x25 A	12	1-2	6
Circuito 4	2X60 A	2x25 A	12	1-3	10
Circuito 5	3x90 A	3x25 A	12	1-2-3	12
Circuito 6	1x30 A	1x25 A	12	3	8
Circuito 7	1x30 A	1x20 A	14	1	4
Circuito 8	1x30 A	1x20 A	14	2	3,3
Circuito 9	3x63 A	3x25 A	12	1-2-3	8
Circuito 10	3x63 A	3x30 A	10	1-2-3	15
Circuito 11	1x20 A	1x25 A	12	1	2
Circuito 12	---	1x25 A	12	1	10
Circuito 13	----	1x25 A	12	1	11
Circuito 14	---	1x25 A	12	2	3
Circuito 15	----	1x25 A	12	3	10

Fuente: Autor

En la tabla 3.5 se puede demostrar que en las líneas que presentaban una carga elevada fueron distribuidas de tal manera que se pueda llegar a un balance en función a la carga real que demanda cada circuito fue necesario redimensionar las protecciones, porque las protecciones antiguas se encontraban sobredimensionadas en su totalidad y el sobredimensionamiento podría provocar daños en la red y en los equipos.

Después del redimensionamiento de las protecciones del tablero de control se procede a distribuir los circuitos de manera equitativa para que las cargas se encuentren equilibradas como se observa a continuación:

TABLA 3.6
REDISTRIBUCIÓN DE PROTECCIONES A LAS FASES

Circuito	Protección		Fase
	Nueva	Corriente (A)	
Circuito 1	3x25 A	12	1-2-3
Circuito 2	3x25 A	8	1-2-3
Circuito 3	3x25 A	15	1-2-3
Circuito 4	2x25 A	8	1-3

Circuito 5	2x25 A	6	1-2
Circuito 6	2x25 A	10	1-3
Circuito 7	1X25 A	7,5	2
Circuito 8	1X25 A	8	2
Circuito 9	1x25 A	4	2
Circuito 10	1x25 A	3,3	2
Circuito 11	1x25 A	2	2
Circuito 12	1x25 A	10	3
Circuito 13	1x25 A	3	2
Circuito 14	1x25 A	11	1
Circuito 15	1x25 A	10	3

Fuente: Autor

En la tabla 3.6 se observa que la ubicación de las protecciones se tuvo prioridad a las protecciones trifásicas, luego bifásicas y al final se hizo una distribución equitativa de las cargas monofásicas para llegar a los valores necesarios para obtener un balance en el sistema.

Para tener un mayor análisis de la redistribución de elementos conectados en el tablero de control se observa en la Fig. 41, adicionalmente se encuentra el diagrama detallado en el **Anexo B**.

TABLERO PRINCIPAL

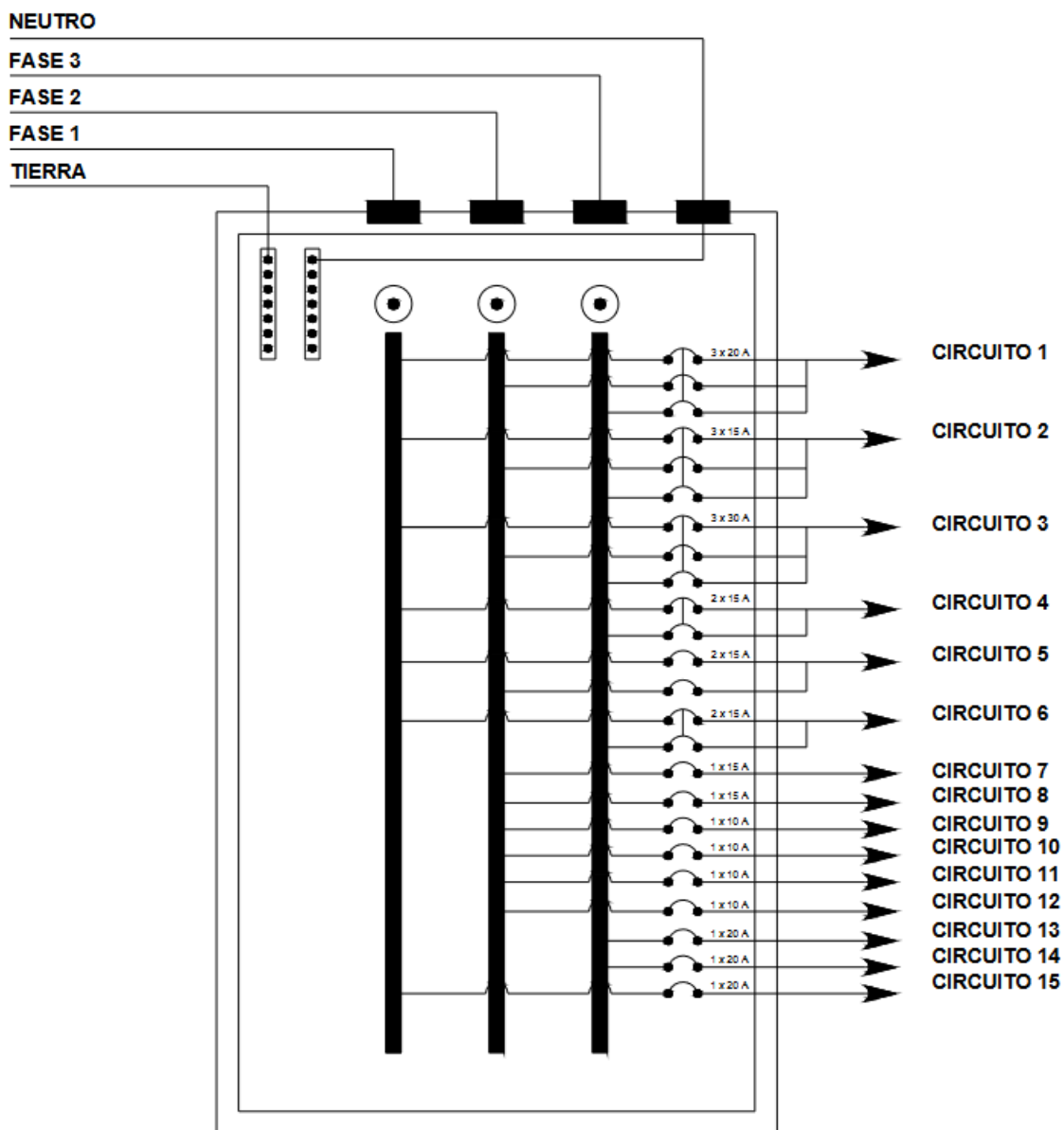


Fig. 43 Rediseño del tablero de control edificio FICA
Fuente: Autor

Con la redistribución del tablero de la Fig. 41 se observa la nueva división de las fases que se encuentran distribuidas de manera equitativa y por ende existe un balance entre las fases.

3.4 Diagnóstico de puesta a tierra

Para complementar el estudio del sistema eléctrico del tablero de distribución fue necesario analizar el estado actual del sistema de protección en este caso de la puesta a tierra, se realizó un estudio comparativo entre la instalación del transformador principal y el tablero general. Como se observa en Fig.44.



Fig. 44 Medición de puesta a tierra con termómetro
Fuente: Autor

Los datos se muestran a continuación:

TABLA 3.7
DATOS DE MEDICIÓN PUESTA TIERRA TRANSFORMADOR PRINCIPAL

Descripción	Elementos conectados	Medición
<ul style="list-style-type: none"> Resistencia del suelo (método Wenner) 	<ul style="list-style-type: none"> 4 picas Soterramiento de picas 10 cm Distancia entre picas 2m 	5.36 Ω
<ul style="list-style-type: none"> Varilla de la puesta a tierra del transformador 	<ul style="list-style-type: none"> 4 picas Soterramiento de picas 10 cm Distancia entre picas 2m 	4.42 Ω

Fuente: Autor

En la tabla 3.7 se evidencia las mediciones realizadas mediante el método de Wenner tanto la resistencia del suelo como la resistencia de la protección, notándose que se encuentra en los rangos de 5.36 Ω para la tierra general y 4.42 Ω para el sistema de protección, esto expresa que se encuentra entre los rangos de resistencia aceptable para este tipo de sistemas.

TABLA 3.8
DATOS DE MEDICIÓN PUESTA TIERRA TABLERO GENERAL

Descripción	Elementos conectados	Medición
<ul style="list-style-type: none"> Resistencia del suelo (método Wenner) 	<ul style="list-style-type: none"> 4 picas Soterramiento de picas 20 cm 	3.80 Ω

	<ul style="list-style-type: none"> • Distancia entre picas 4m 	
<ul style="list-style-type: none"> • Resistencia de tierra selectiva de 4 polos con pinza amperimétrica 	<ul style="list-style-type: none"> • 4 picas, 1 pinza de corriente • Soterramiento de 20cm • Distancia entre picas 4m 	1.09 Ω
<ul style="list-style-type: none"> • Medición de tres polos 	<ul style="list-style-type: none"> • 3 picas • Soterramiento de 20cm • Distancia entre picas 4m 	1.11 Ω

Fuente: Autor

Las mediciones realizadas en la tabla 3.8 son los valores obtenidos en el tablero general de distribución del edificio FICA, donde se verifico la resistencia del suelo cuyo valor se encuentra en 3.80 Ω y la resistencia del sistema de protección en 1.11 Ω , en ambos casos se aplicó el método de Wenner es decir la medición cuatro picas, estos valores se encuentran en un aceptable, además, se encuentra en un rango mejor que los datos obtenidos en el transformador principal teniéndose como una observación que se requiere realizar un mantenimiento preventivo más frecuente en las líneas de puesta a tierra para que este valor no aumente y se mantenga los parámetros correspondientes.



(a)



(b)

Fig. 45 (a) Medición de puesta a tierra tablero de control
 (b) Medición de resistencia del suelo
 Fuente: Autor

En la Fig. 45-a se muestra los datos obtenidos en la medición del tablero de distribución edificio FICA, la Fig. 45-b se muestra los datos obtenidos de la resistencia del suelo del tablero de control, la medición se realizó mediante un telurómetro marca FLUKE 1625-2.

3.5 Propuestas de mitigación de armónicos homopolares en el conductor neutro

Antes de seleccionar los métodos de mitigación de armónicos homopolares, en la tabla 16 presenta un cuadro estándar de los métodos de mitigación que se pueden incorporar a la red, que este caso se ha clasificado por ventajas y desventajas que presentan cada una de las metodologías.

TABLA 3.9
TABLA COMPARATIVA DE ATENUACIÓN DE ARMÓNICOS

Comparación de formas de mitigación de Armónicos		
	Ventajas	Desventajas
Transformador Zig-Zag	<ul style="list-style-type: none"> • Económico • Facilidad de instalación en sistemas de distribución existentes • Capacidad para mantener las corrientes neutras locales • Elimina la necesidad de un cable neutro de mayor calibre 	<ul style="list-style-type: none"> • Proporciona en la parte secundaria un voltaje compuesto inferior a la del transformador original • Solución: aumentar el número de espiras en un 15,4% con relación a la conexión primario (estrella)
Filtros activos	<ul style="list-style-type: none"> • Se puede utilizar de forma independiente o se puede introducir en un sistema de alimentación interrumpida (UPS) 	<ul style="list-style-type: none"> • Costoso
Filtros pasivos	<ul style="list-style-type: none"> • Económico • Componentes: capacitor e inductor • Evita que las corrientes armónicas no fluyan al sistema y desvíen flujo de potencia armónica 	<ul style="list-style-type: none"> • Crea resonancias indeseables en los sistemas de alimentación
Filtro híbrido	<ul style="list-style-type: none"> • Resuelve problemas de potencia reactiva y corrientes armónicas 	<ul style="list-style-type: none"> • La menos efectiva en comparación a filtros activos y pasivos • No es adecuada para la compensación inter armónica de baja frecuencia

Fuente: Autor

De la tabla 3.9 anterior se seleccionó dos métodos que son los más viables para mitigación de armónicos homopolares en el edificio FICA, a continuación, se procede a detallar cada uno de ellos, con la ayuda de Simulink se realiza una simulación para demostrar el porcentaje de reducción de los armónicos.

3.6 Propuesta de mitigación de armónicos por transformador ZIGZAG

La característica natural de la corriente alterna con alto contenido de armónicos y la afectación en el conductor neutro causado por cargas no lineales de fuentes de alimentación, balastos electrónicos, sistemas UPS, variadores de velocidad ajustable, provocan una caída de potencial en el neutro, lo que crea una distorsión excesiva de voltaje y de calentamiento de los cables.

Los armónicos homopolares inyectados por cargas no lineales contaminan la calidad de los sistemas de suministro y crean un mayor porcentaje de distorsión en el neutro de la fuente de alimentación. El primero conectado en delta de un transformador solo puede eliminar los armónicos homopolares inyectándolos a la red. Por lo tanto, la corriente del neutro causada por el flujo de cargas de armónicos homopolares no se eliminan, provocando problemas típicos de sobrecarga del neutro, interferencias telefónicas, mal funcionamiento de los dispositivos de protección.

Con lo anteriormente expuesto la instalación de un transformador Zig-Zag beneficia a la reducción de corriente neutra causada por los armónicos homopolares y eliminando la necesidad de un cable neutro de mayor tamaño.

Para entender el desempeño del transformador Zig-Zag, se realizó la simulación por el programa Simulink de Matlab permitiendo analizar el comportamiento del transformador en condiciones de operación típicas. Por consiguiente, los resultados obtenidos en la simulación se utilizarán para determinar las ventajas y desventajas con respecto a los problemas de armónicos y desbalance de cargas.

3.6.1 Esquema de configuración del diagrama en ZIG-ZAG

Los transformadores en Zig-Zag también se utilizan para obtener el punto neutro de los sistemas trifásicos de 3 hilos. Pero en los últimos años, los transformadores en Zig-Zag se conectan en derivación con cargas no lineales para mitigar los problemas de calidad de energía. En la Fig 46. se representa el flujo de corrientes en transformadores en Zig-Zag.

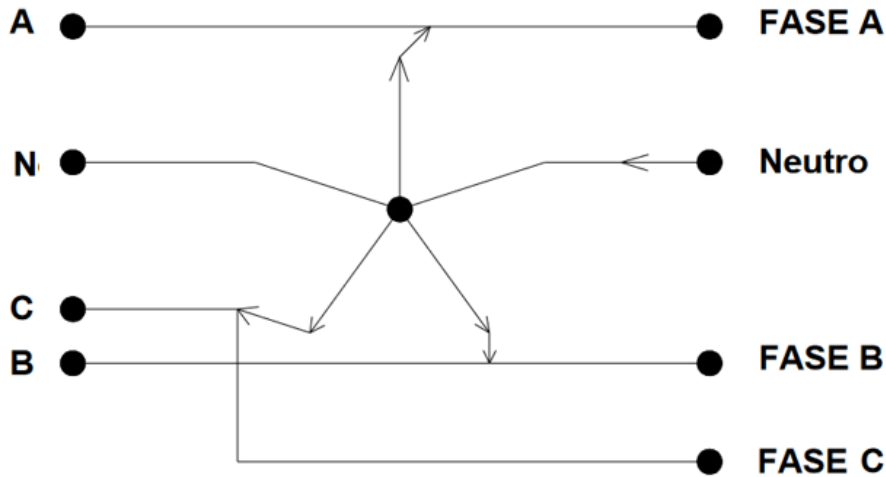


Fig. 46 Flujo de corrientes en transformadores en Zig-Zag
Fuente: Autor

De la Fig.46, el transformador de cancelación de armónicos mejora la forma de onda al cancelar el flujo de armónicos en el núcleo del transformador y, por lo tanto, reduce la distorsión de la forma de onda de voltaje. También mejora la eficiencia general del transformador al reducir las pérdidas de calor debido a las cargas armónicas.

Un transformador en Zig-Zag tiene dos devanados de bobina para cada fase. Alrededor del núcleo, la dirección en que la segunda bobina se enrolla alrededor del núcleo, la dirección del flujo creado en el núcleo por el segundo devanado es la opuesta la del primer devanado. Para realizar la propuesta de mitigación de armónicos en el tablero de control del edificio FICA se procedió a realizar un diagrama unifilar con una proyección a la instalación en el edificio de análisis como se observa en la Fig. 47.

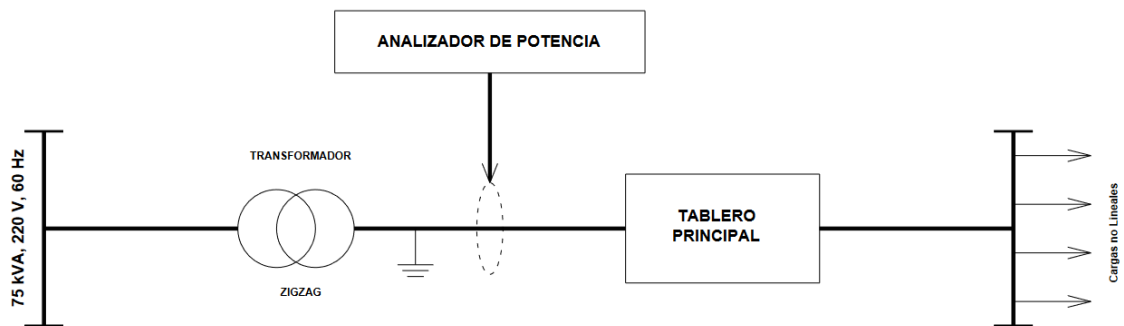


Fig. 47 Diagrama unifilar del esquema de configuración
Fuente: Autor

En la Fig. 47 muestra el diagrama unifilar de la configuración del objeto de estudio. El transformador Zig-Zag está conectado entre el sistema del tablero de control del edificio FICA y el sistema de suministro de 75 KVA, 60 Hz. Se ha utilizado el analizador de redes Power

MetrelQ4 Plus para el registro de los diferentes componentes armónicos inyectados por las cargas no lineales. La lectura se ha realizado con el analizador de redes sin el transformador Zig-Zag y con una simulación en Simulink con el transformador Zig-Zag.

3.6.2 Simulación del transformador ZIGZAG en Simulink

Para el análisis de los efectos que producen el transformador Zigzag en la red de distribución trifásica de cuatro hilos, se realizó la simulación a través del software MATLAB/Simulink, para el análisis de su comportamiento con las corrientes en el neutro y los armónicos, además de equilibrar los voltajes en los terminales de carga.

Para la simulación del transformador Zig-Zag se usaron los datos obtenidos por analizador redes y la implementación de un bloque que simule las cargas no lineales (PWM de 6 pulsos (modulación por ancho de pulso)), como se observa en la Fig. 48.

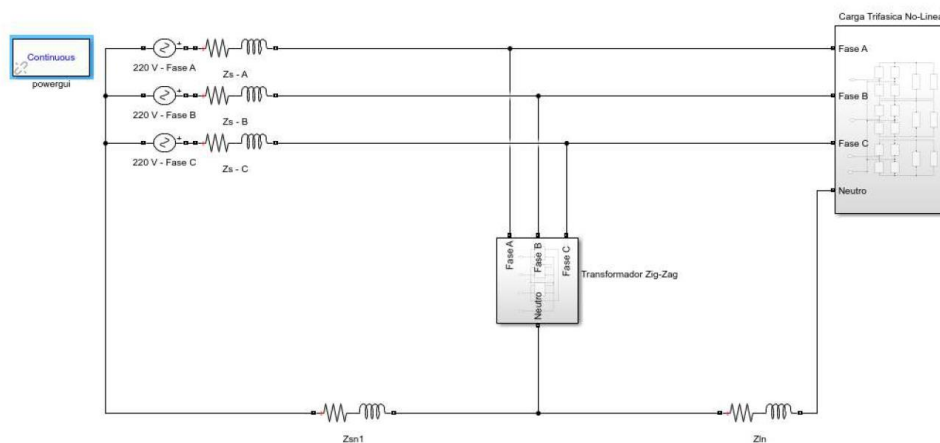


Fig. 48 Circuito eléctrico de un sistema trifásico de distribución de cuatro hilos
Fuente: Autor

En la Fig. 48, se muestra el circuito utilizado en la simulación para analizar la respuesta del transformador Zig-Zag en el edificio FICA. El circuito está constituido por una etapa de potencia (hace referencia a la salida de un transformador trifásico con su respectivo neutro), el transformador Zig-Zag y por ultimo una carga trifásica que simula a las cargas de los diferentes equipos y luminarias conectados a la red de distribución.

Para el diseño y conexión del transformador Zig-Zag se hizo uso de la Fig. 46 indicando el flujo de corrientes y con ello implementar en un circuito como se observa en la Fig. 49.

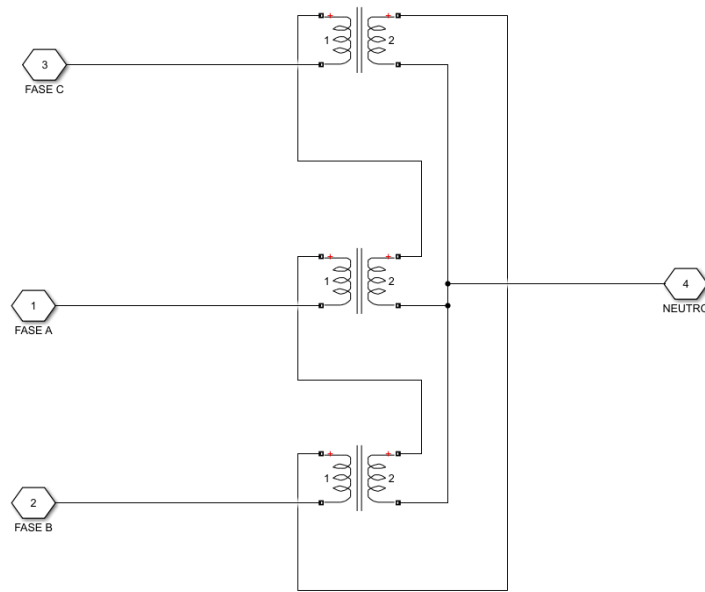


Fig. 49 Conexión del transformador Zig-Zag
Fuente: Autor

De la Fig. 49 se observa la conexión del transformador Zig-Zag, se implementó para balancear, atenuar la circulación de armónicos en el sistema de distribución del Edificio FICA, además se implementó un neutro para cumplir con el diagrama de la Fig.46.

Para la carga implementada en la simulación se realizó una carga no lineal con un PWM de 6 pulsos conectado de onda completa en cada una de las fases y el neutro como se observa en la Fig. 50.

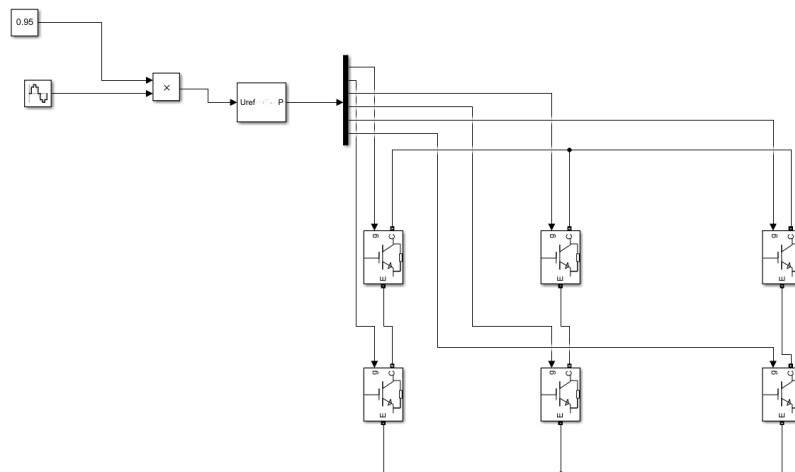


Fig. 50 Señal no lineal PWM de 6 pulsos
Fuente: Autor

El circuito de la Fig. 50, se hizo una alimentación en paralelo. Mediante esta carga no lineal se emulo el efecto que producen los dispositivos electrónicos a la red del sistema de

distribución de cuatro hilos. Los dispositivos con fuentes de alimentación electrónica inyectan armónicos a la red, por lo general los rectificadores se suelen utilizar o aprovechar la onda sinusoidal, de manera brusca o por pulsos a diferencia de hacerlo suavizado. Estos pulsos crean ondas distorsionadas que originan armónicos de retorno hacia otro camino del sistema de distribución.

3.6.3 **Análisis de la simulación de las propiedades del transformador ZIG-ZAG en el sistema de distribución del edificio FICA.**

Se analizó el impacto del transformador Zig-Zag con las especificaciones del tablero de control del edificio FICA para presentar las condiciones más comunes en un sistema de distribución de cuatro hilos como se indica a continuación:

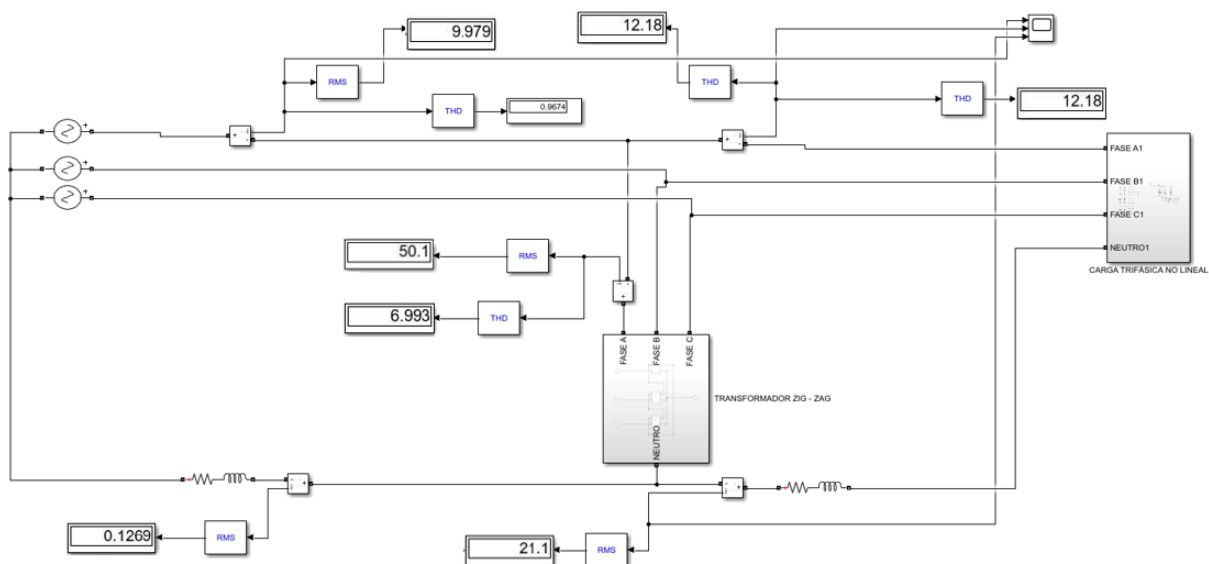
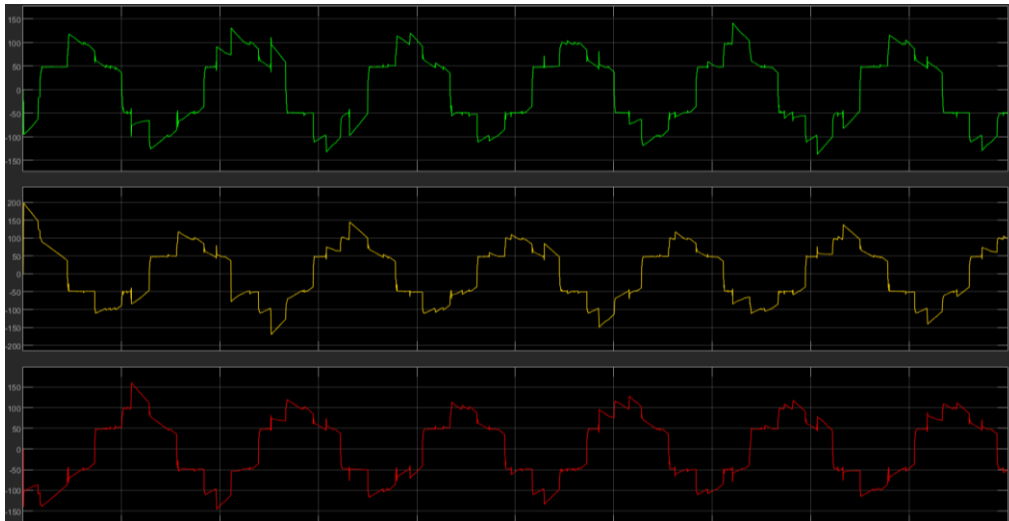
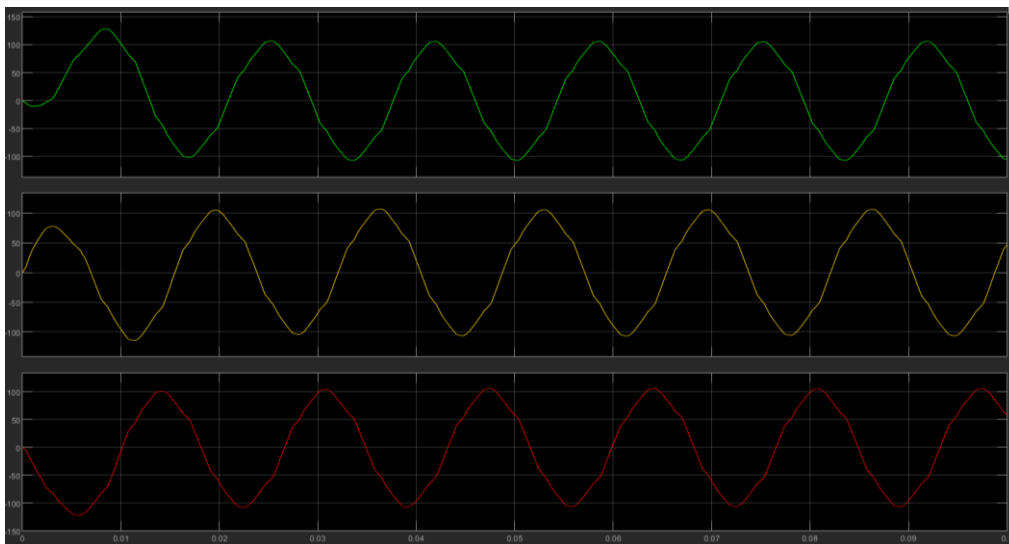


Fig. 51 Circuito de simulación
Fuente: Autor

En la Fig. 51, se observan los resultados de la simulación y mediciones en la fase A, bajo cargas no lineales balanceadas conectadas al sistema de distribución de cuatro hilos. Hacia la carga fluye una corriente con magnitud de 12,19 A, los rectificadores AC/DC son la principal causa de inyectar corrientes de armónicos homopolares a la red de distribución trifásica. Para observar el comportamiento del transformador se realizó la siguiente simulación.



(a)



(b)

Fig. 52 a) Señal con distorsión a la entrada del transformador Zig-Zag,
 b) Señal filtrada a la salida del transformador Zig-Zag
 Fuente: Autor

Las corrientes armónicas son componentes de secuencia cero, se puede observar en figura anterior el efecto que causan las corrientes de tercer orden, además de provocar un flujo de corriente por el conductor neutro desde la carga con magnitud de 21,11 A, también se muestra una onda de corriente armónica atenuada por el transformador Zig-Zag. La magnitud de corriente que fluye hacia el neutro del lado de generación es de 0.127 A RMS. Esto quiere decir que el transformador Zig-Zag atenuó el 99.37% de la corriente de los armónicos homopolares en el lado de carga de una forma efectiva.

3.7 Propuesta de mitigación de armónicos por Filtro híbrido LCL

Un filtro es un elemento cuya función principal es la de atenuar ciertas frecuencias o gama de frecuencias de una señal eléctrica que circula a través de él, este tipo de filtros se diseñan para que puedan superar la información contenida en las señales de interferencias, ruido y distorsión indeseada. Para modelar este tipo de dispositivo se toma como base su función de transferencia.

La topología de un filtro LCL está formada por una bobina conectada a la salida del inversor, un condensador y una segunda bobina, conectada a la red por cada fase. En la Fig. 53 se aprecia la composición de la topología mencionada.

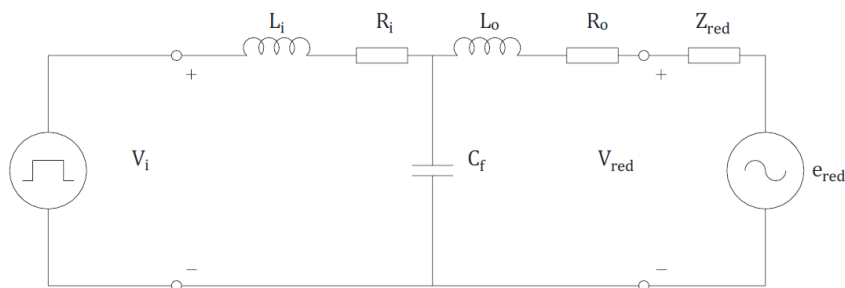


Fig. 53 Topología LCL
Fuente: (Ponce, 2020)

En la fig. 48 se observa la composición del filtro híbrido contando con dos bobinas y un capacitor, la principal ventaja de este filtro es que, para altas frecuencias, la atenuación al ser un filtro de tercer orden, la atenuación se da a 60 db/dec . Además, presenta características como la de una menor inductancia equivalente, mayor economía y menor cantidad de pérdidas, pero la desventaja del filtro LCL es introducir una frecuencia de resonancia dentro del sistema, siendo necesario la utilización de métodos de amortiguamiento.

3.7.1 Diseño del Filtro LCL

Para dimensionar un filtro LCL es necesario en primera instancia calcular de la magnitud del capacitor, para ello se toma en consideración la ecuación 4.

$$Z_{th} < \frac{1}{50} \left(\frac{220 \sqrt{2} V}{117,3 A} \right)$$

$$Z_{th} < 0.053$$

Una vez determinada la impedancia de Thévenin se procede a calcular el valor de la reactancia capacitiva usando la ecuación 5 que se detalla a continuación.

$$X_c = 189.66$$

Con este valor se procede a despejar el valor de la capacitancia requerida a partir de la ecuación 6.

$$C = 13.98 \text{ mF}$$

A continuación, obtenemos los valores de las inductancias. La inductancia 1 se obtendrá a partir de la ecuación 7.

$$L_1 = 558 \text{ mH}$$

La inductancia L2 se obtendrá mediante la ecuación 8.

$$L_2 = 456.48 \text{ mH}$$

Con los datos obtenidos y mediante el software Simulink se procede a realizar una simulación para observar el comportamiento de la señal resultante.

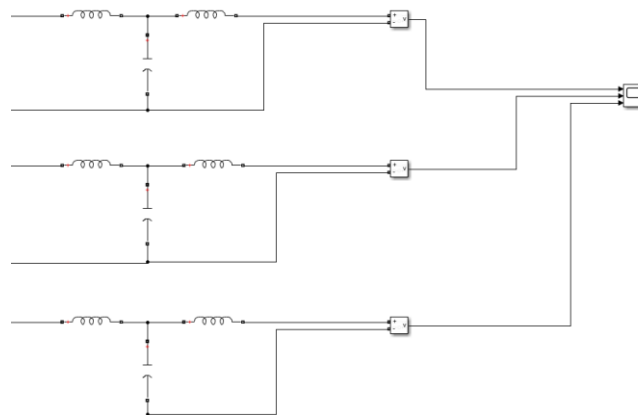
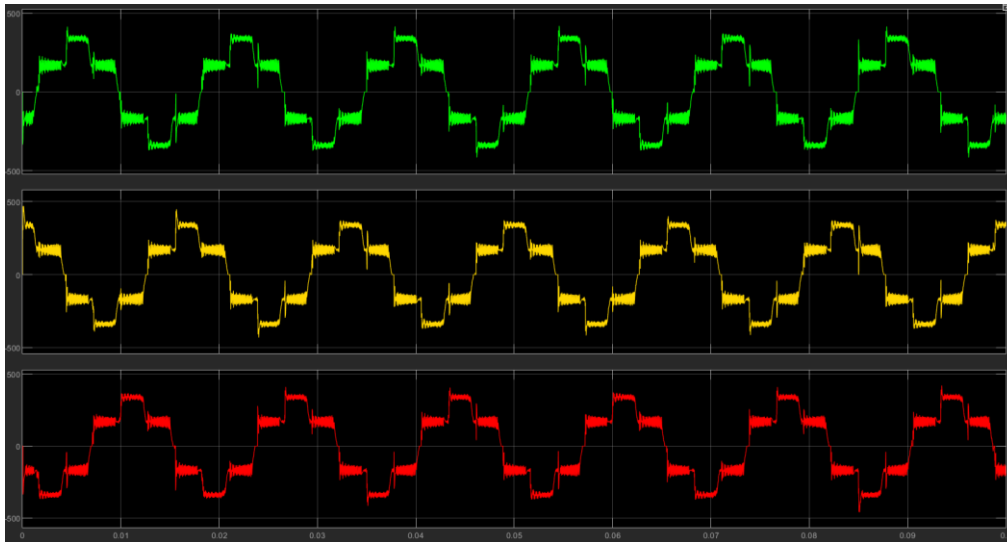
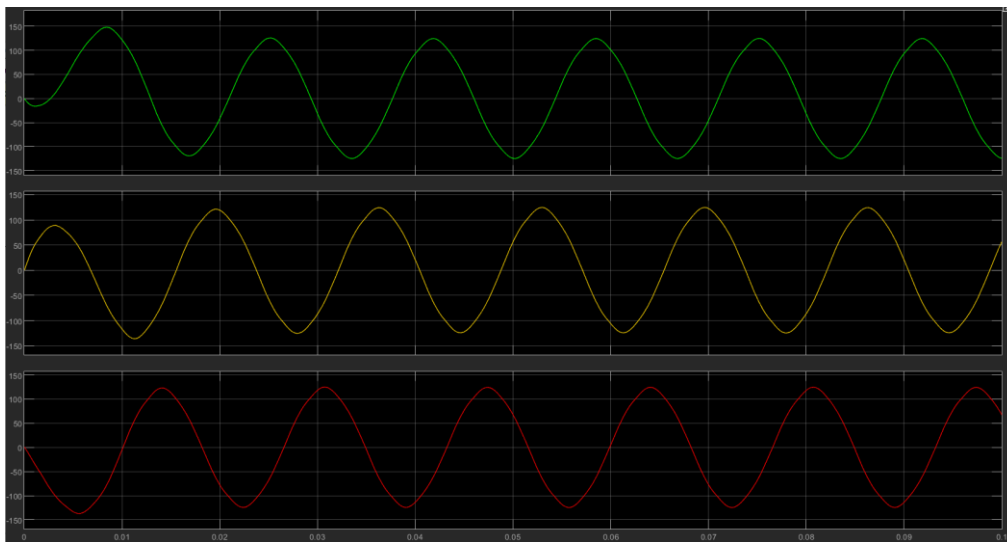


Fig. 54 Circuito de simulación LCL
Fuente: Autor

En la Fig. 54 se muestra el diseño de un filtro LCL el cual está conformado por dos bobinas, una bobina de alta y una de baja frecuencia, también incluye un capacitor este diseño se encarga de filtrar y eliminar las distorsiones en la señal mediante la simulación se pudo comprobar los efectos del circuito que se muestran a continuación.



(a)



(b)

Fig. 55 a) Señal con distorsión a la entrada del filtro LCL
 b) Señal filtrada a la salida del filtro LCL
 Fuente: Autor

En la Fig. 55-a se observa la señal resultante por el efecto de las fuentes conmutadas y diferentes equipos electrónicos no lineales que contaminan la red de alimentación siendo estos que causan el efecto de distorsión en la señal obteniendo una onda con alto contenido armónico, en la Fig. 55-b muestra el resultado de la señal al atravesar por un filtro LCL denotando que la señal de alta y baja frecuencia son filtradas eliminándose el contenido armónico obteniendo una onda sinusoidal filtrada.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

4.1 Conclusiones

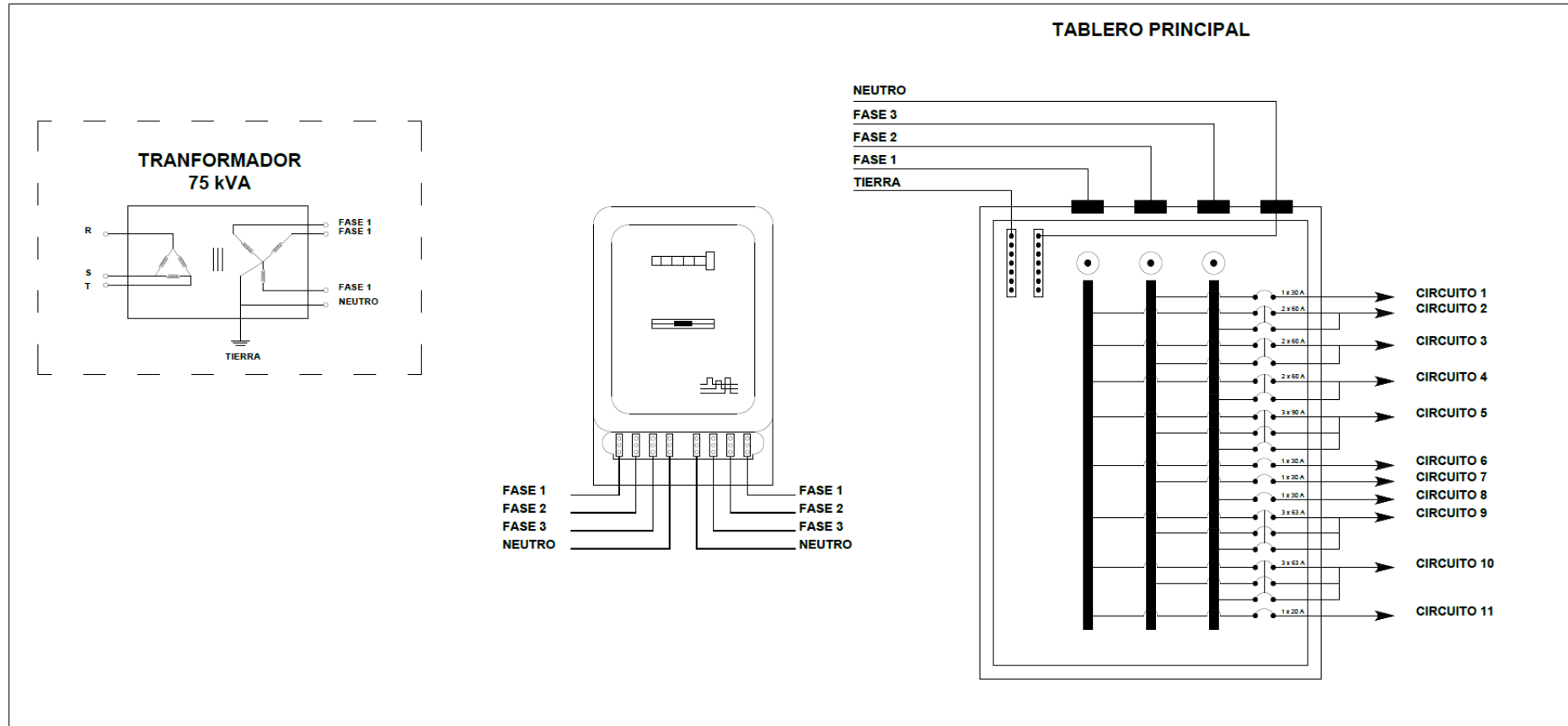
- En el análisis de bajo voltaje del lado secundario del transformador, se observó que la inserción de cargas no lineales produce corrientes y tensiones de frecuencia diferente a la del diseño del sistema eléctrico (60 Hz), las cuales fluyen a través de la red eléctrica derivada a dispositivos y tensiones de frecuencia diferentes como para equipos que no fueron diseñados, en el estudio realizado se pudo verificar y constatar la existencia de este tipo de señales en la red de alimentación principal del edificio FICA debido a la gran cantidad de equipos electrónicos que actualmente se acoplan a la red, notándose la calidad de energía que se cuenta actualmente.
- Una de las alternativas que se plantea es el diseño de un filtro híbrido tipo LCL, el cual está conformado por dos bobinas, una de alta y una de baja frecuencia además de un condensador para el filtrado de la señal, ya que estos impiden el paso de una frecuencia armónica particular el cual debe ser acoplado a la red.
- El transformador en ZigZag es una de las opciones viables para mitigar armónicos. Esto se debe a que cada fase del transformador ZigZag tiene dos devanados idénticos que se enrollan en direcciones opuestas para dar alta impedancia a las corrientes de fase normales y una baja impedancia a las corrientes de falla a tierra.

4.2 Recomendaciones

- Para un análisis futuro se debe realizar las mediciones con el analizador en las bajantes del transformador (no en el tablero de control), porque el transformador abastece a los edificios FICA, FICAYA y el sistema externo de iluminación de las facultades antes mencionadas. Por consiguiente, los datos obtenidos del tablero de control del edificio FICA no son elevados en la distorsión armónica total (THDV), pero sumando los puntos que abastece el transformador aumentaría la contaminación en el conductor neutro.
- Se debería continuar con el desarrollo mediante la construcción del modelo analizado en el presente trabajo de grado en la cual se puede construir el filtro híbrido con los datos obtenidos del análisis y de la simulación, mediante la electrónica de potencia lo que permite abarcar un gran campo a costos nominales reducidos y permite tener una visión más cercana a la forma de trabajo de los equipos y la capacidad real de mitigación al aplicarse dentro de un sistema real, para así corregir las pérdidas económicas y técnica.
- Es recomendable para futuros trabajos realizar la redistribución del tablero principal, esto debido a que las protecciones de los diferentes circuitos se encuentran sobredimensionadas y varios de ellos no tienen una protección física en dicho tablero lo que dificulta el análisis de las cargas para los posteriores estudios.

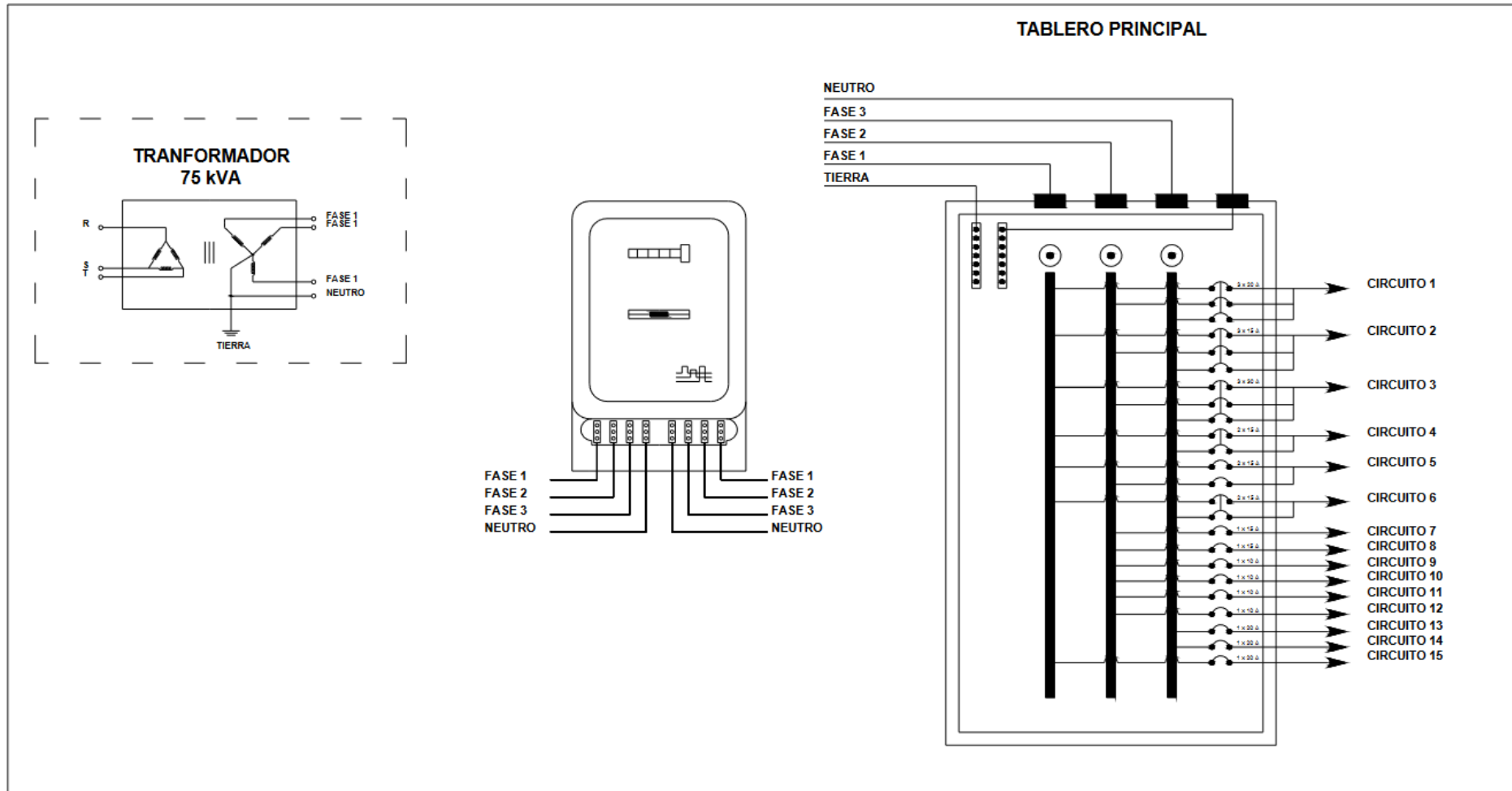
Anexos

5.1 Anexo A: Tablero de distribución edificio FICA

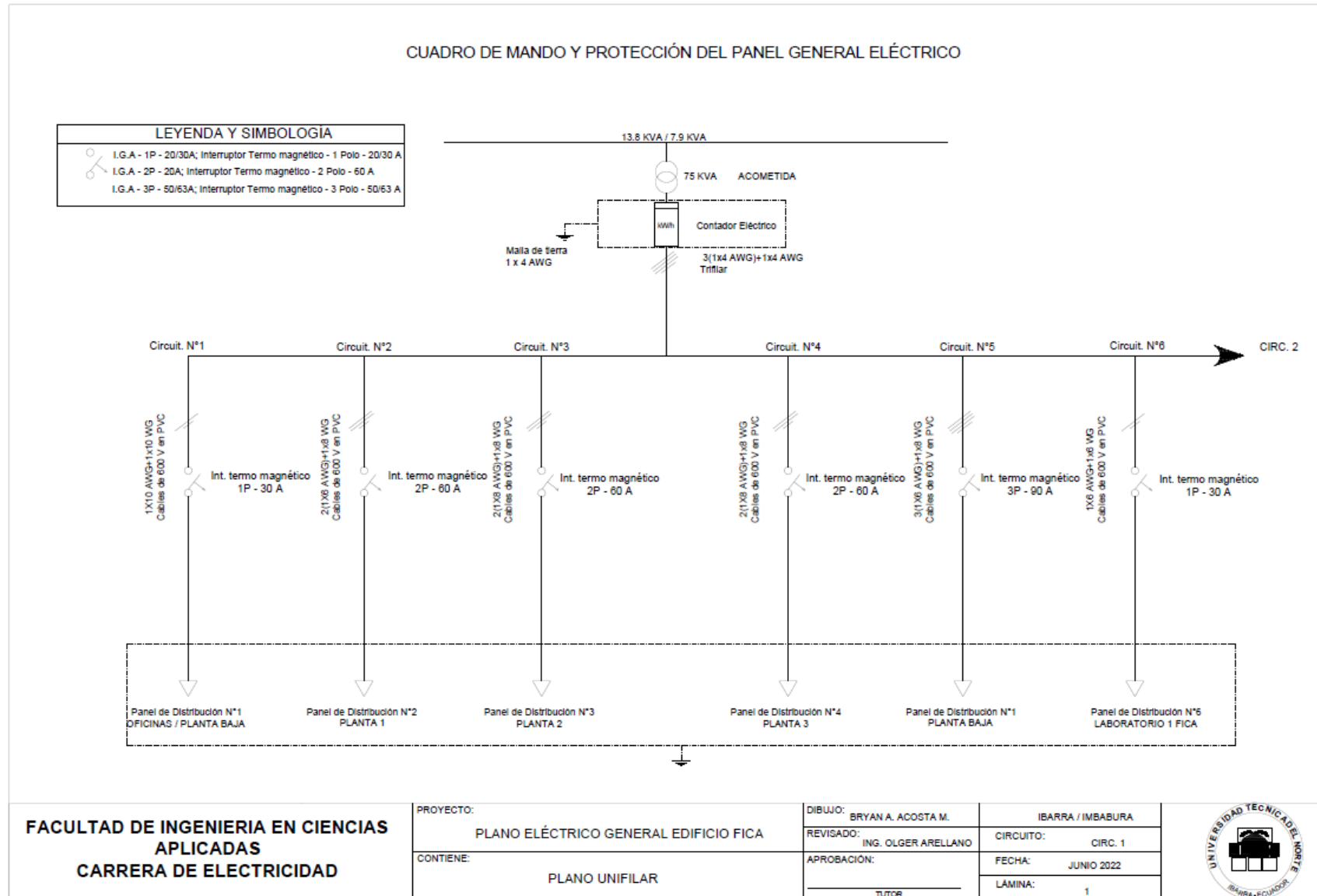


5.2 Anexo B: Redistribución de tablero general edificio FICA




BALANCE DE CARGAS EN LA RED DE ALIMENTACIÓN

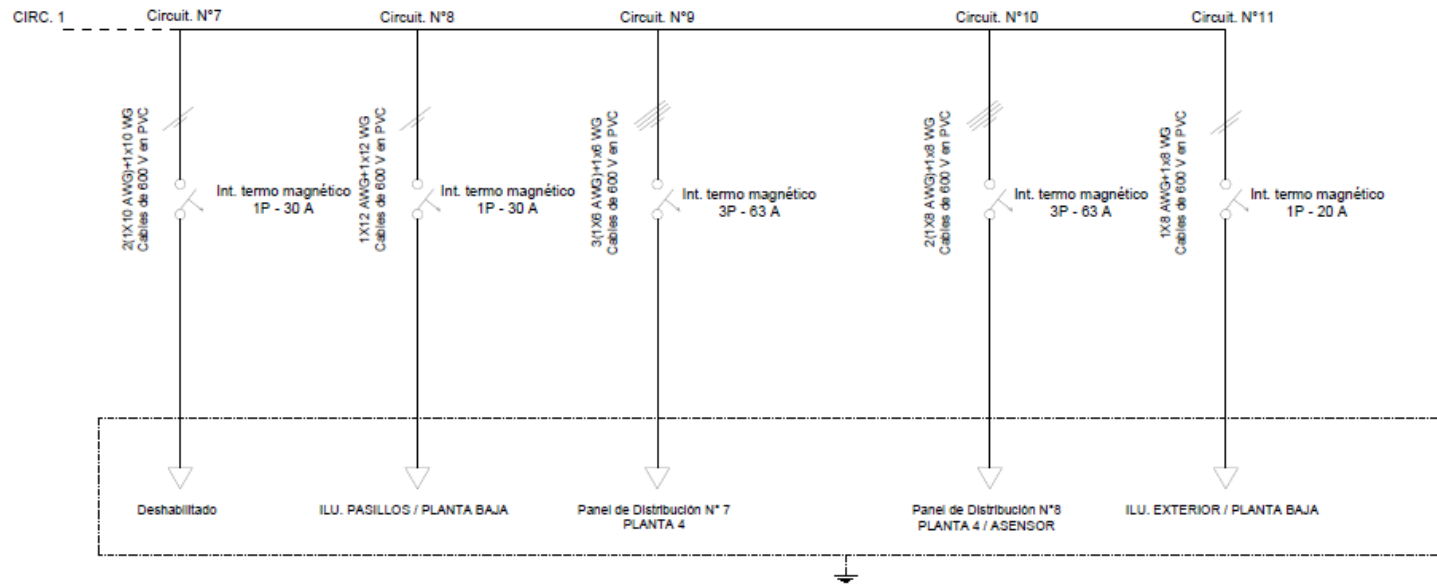


5.3 Anexo C: Cuadro de mando y protección del panel general eléctrico



CUADRO DE MANDO Y PROTECCIÓN DEL PANEL GENERAL ELÉCTRICO

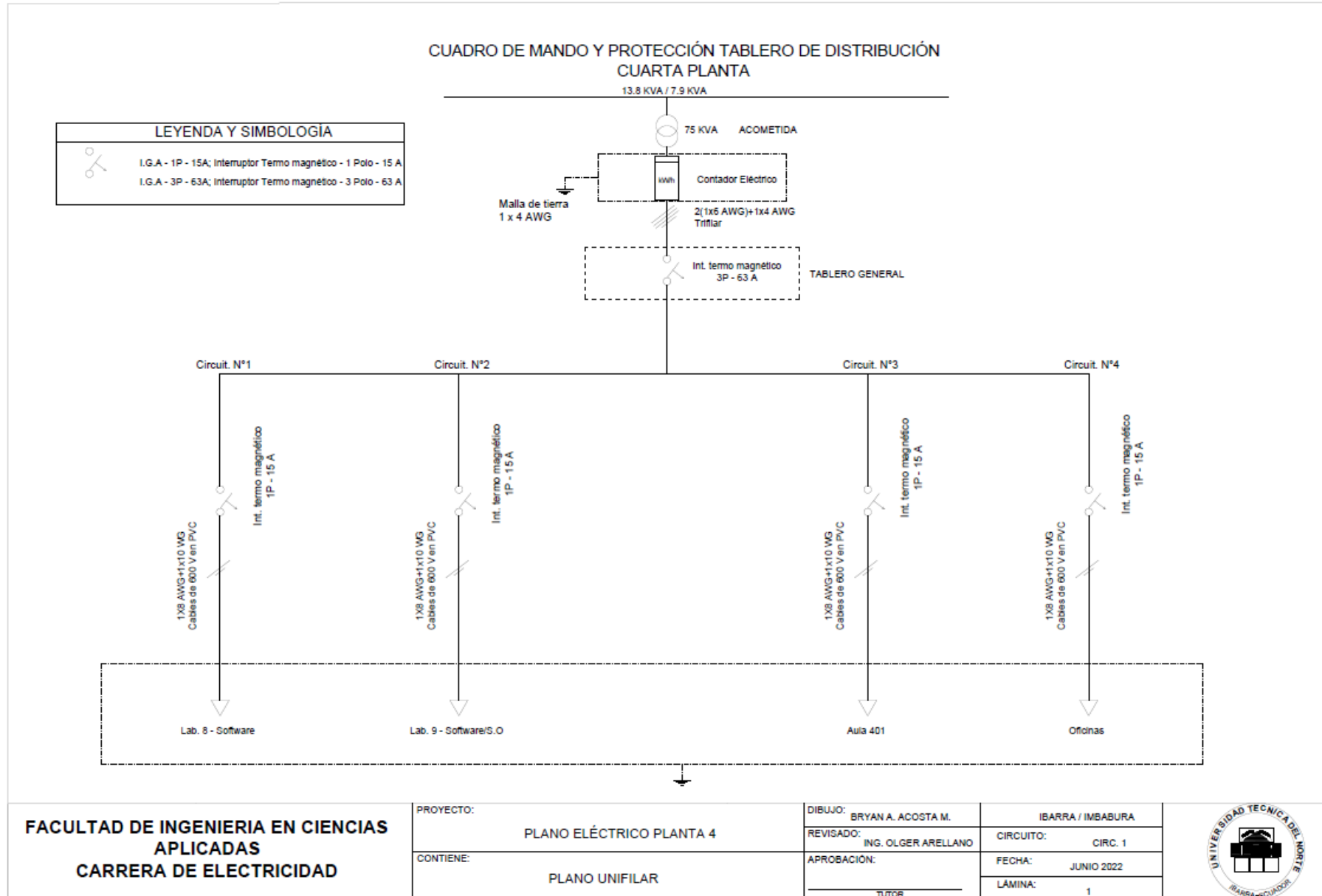
LEYENDA Y SIMBOLOGÍA	
	I.G.A - 1P - 20/30A; Interruptor Termo magnético - 1 Polo - 20/30 A
	I.G.A - 2P - 20A; Interruptor Termo magnético - 2 Polo - 60 A
	I.G.A - 3P - 50/63A; Interruptor Termo magnético - 3 Polo - 50/63 A



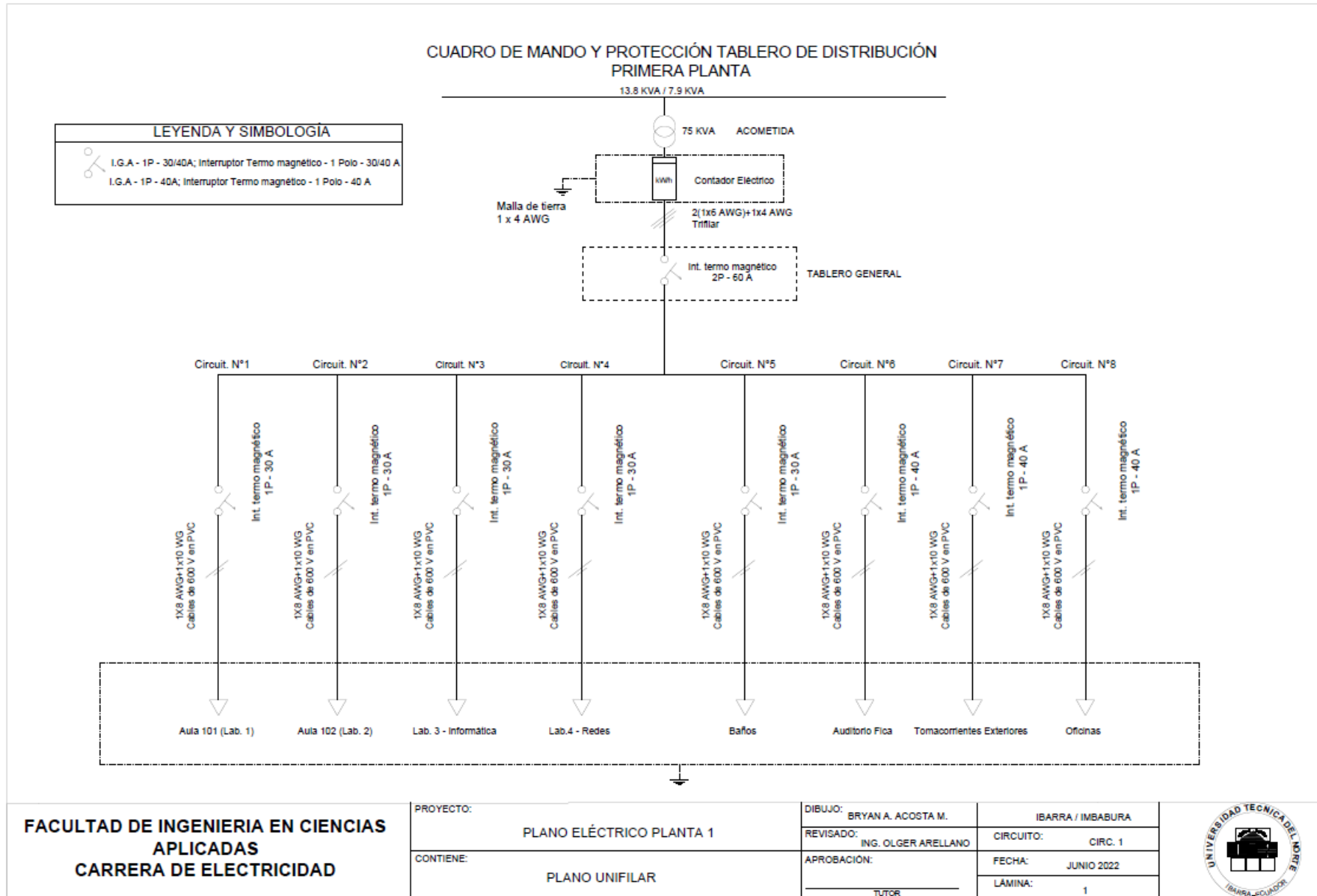
FACULTAD DE INGENIERIA EN CIENCIAS APLICADAS CARRERA DE ELECTRICIDAD	PROYECTO:	PLANO ELÉCTRICO GENERAL EDIFICIO FICA		DIBUJO:	BRYAN A. ACOSTA M.	IBARRA / IMBABURA
	CONTIENE:	PLANO UNIFILAR		REVISADO:	ING. OLGER ARELLANO	CODIGO: CIRC. 2
					APROBACIÓN:	FECHA: JUNIO 2022
					TUTOR	LÁMINA: 2



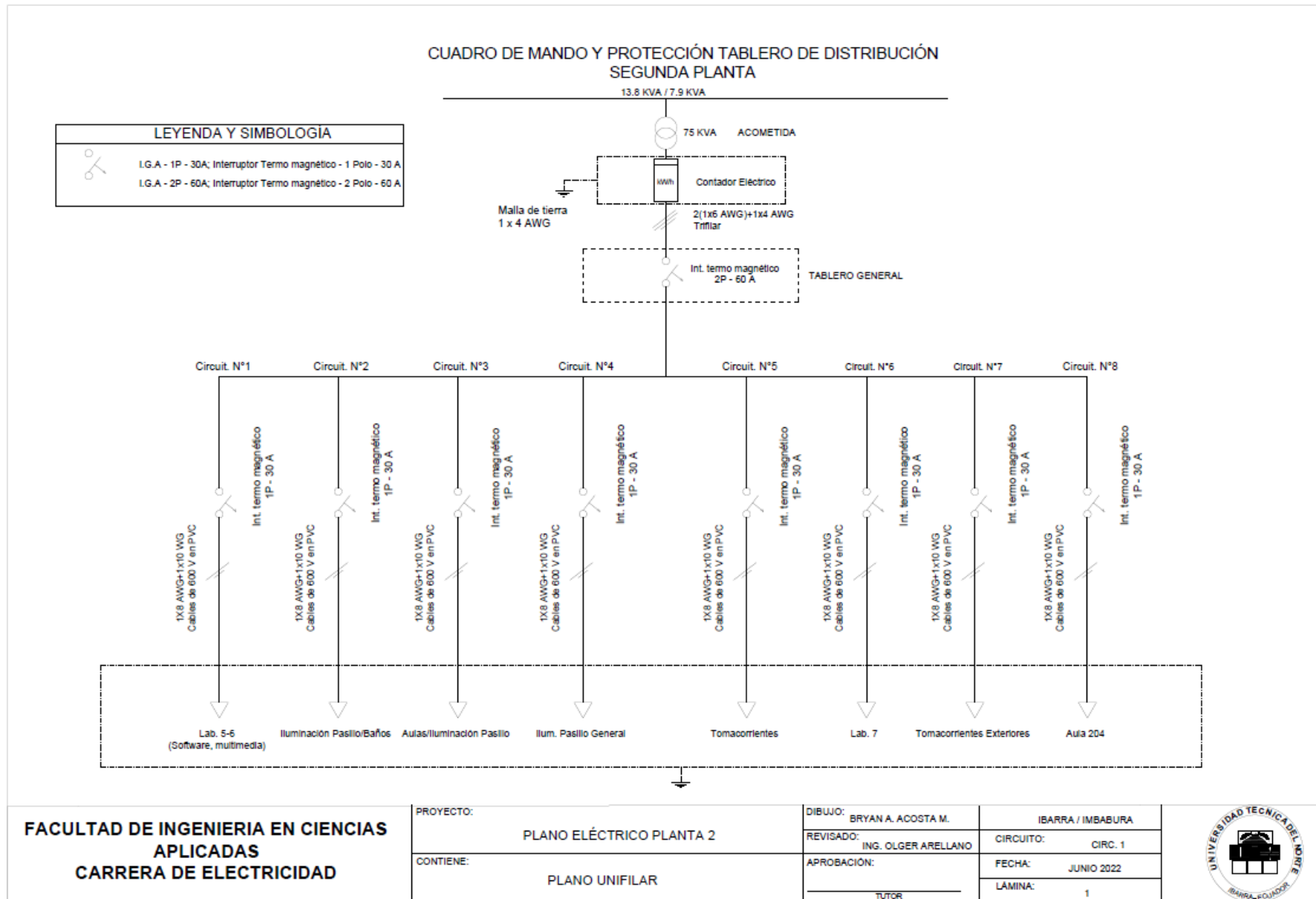
5.4 Anexo D: Cuadro de mando y protección tablero de distribución planta baja



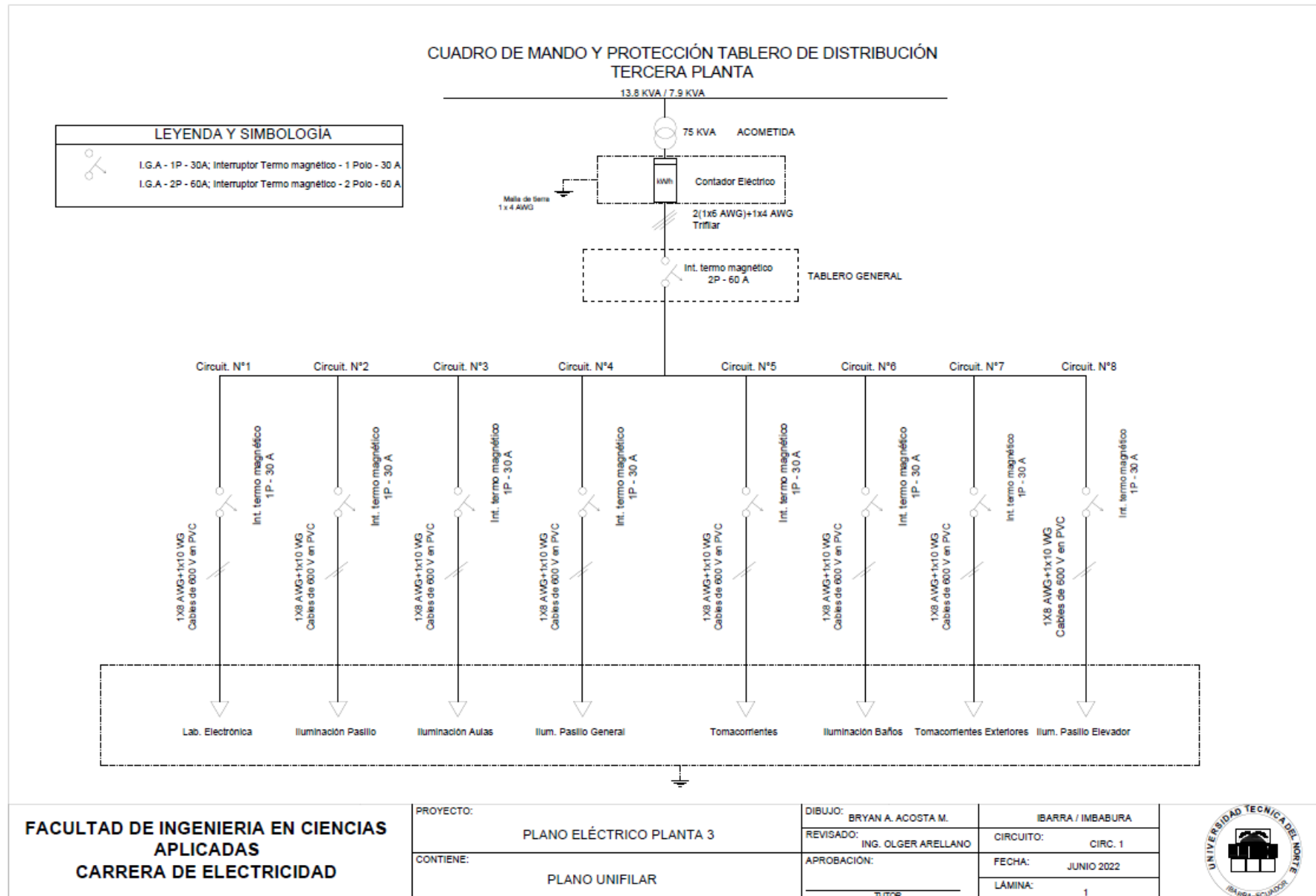
5.5 Anexo E: Cuadro de mando y protección tablero de distribución primera planta



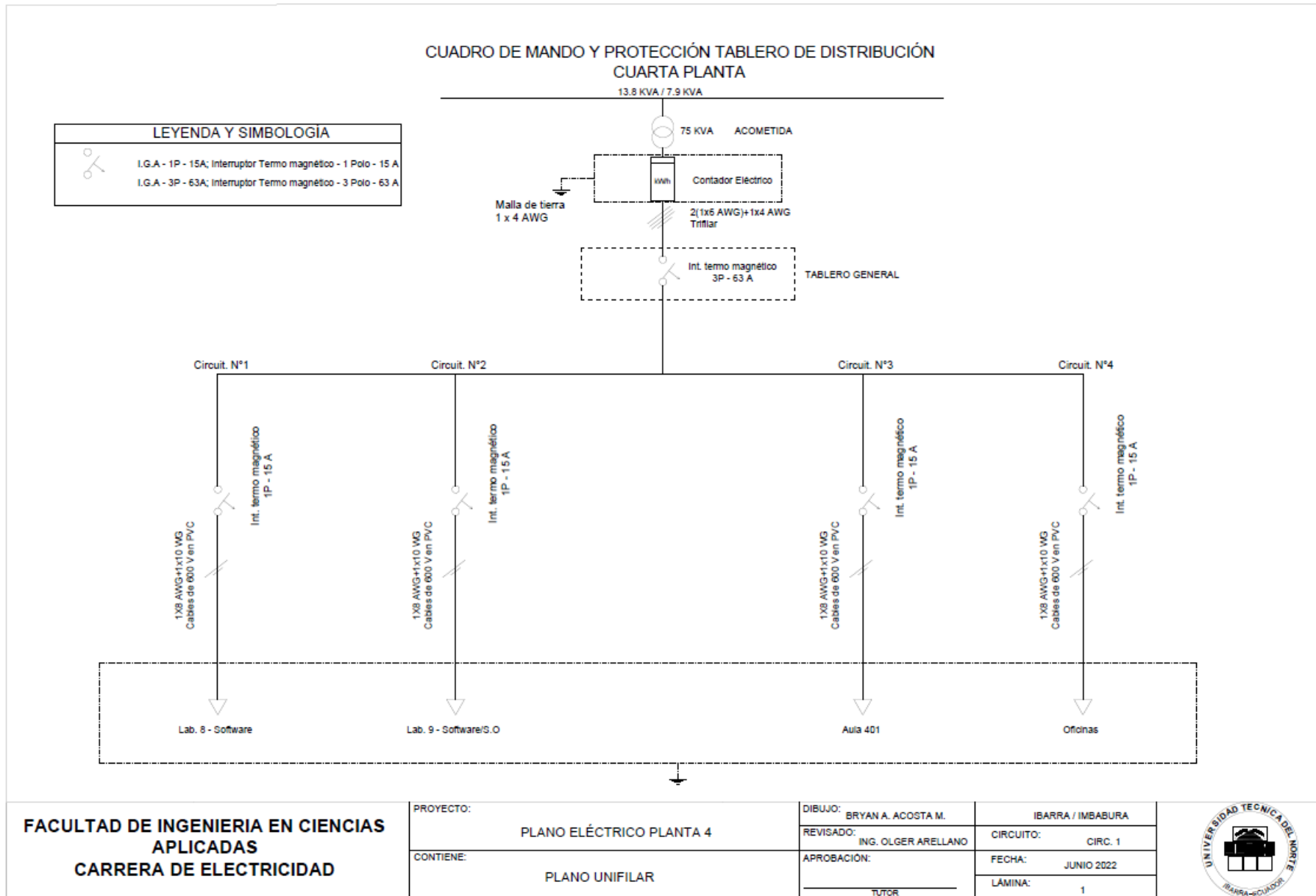
5.6 Anexo F: Cuadro de mando y protección tablero de distribución segunda planta



5.7 Anexo G: Cuadro de mando y protección tablero de distribución tercera planta



5.8 Anexo H: Cuadro de mando y protección tablero de distribución cuarta planta



Bibliografía

- Anca, M. A. (2019). Sistema basado en conocimiento para el análisis de tensión fluctuaciones y parpadeo. *2019 8va Conferencia Internacional sobre Sistemas de Energía Modernos (MPS)*.
- ARCERNNR. (2020). "ESTADÍSTICA MANUAL Y MULTIANUAL del sector Eléctrico Ecuatoriano 2020". 121-316.
- ARCERNNR. (s.f.). Regulación ARCERNNR 002/20. *Directorio de la Agencia de Regulación y Control de Energía y Recursos Naturales no Renovables, 2020*.
- Astaneï, F. M. (2017). *Detección de parpadeo de luz usando imágenes de alta velocidad*. Iasi: IEEE.
- Babu, M. R. (2020). Harmonic analysis for power loss minimization in radial distribution system. Paper presented at the 2020 11th International Conference on Computing, Communication and Networking Technologies, ICCCNT 2020, doi:10.1109/ICCCNT49239.2020.9225526 Retrieved from www.scopus.com.
- Becirovic, M. H. (2015). "Optimal control of small hydropower plants and power transformer tap changer in distribution network in order to minimize active power losses,". *2015 5th International Youth Conference on Energy (IYCE)*, pp. 1-8, doi: 10.1109/IYCE.2015.7180736.
- Bhushan, R. &. (2015). Mitigación de Armónicos en un Conductor Neutro para Sistema de Distribución Trifásico de Cuatro Hilos usando Filtro de potencia activa en serie. India: IEEE.
- Brito, B. R. (2016). El uso de estándares de calidad de energía para establecer una capacidad de transformador equivalente bajo condiciones armónicas.
- Carnovale, T. M. (2016). "Application of IEEE STD 519-1992 Harmonic Limits,". *Conference Record of 2006 Annual Pulp and Paper Industry Technical Conference*, pp. 1-9, doi: 10.1109/PAPCON.2006.1673767.
- Chen, Y. L. (2019). "Research on Evaluation Method of Open-loop Scheme of Electromagnetic Loop Network Based on Comprehensive Weight,". *2019 4th International Conference on Intelligent Green Building and Smart Grid (IGBSG)*, pp. 218-222, doi: 10.1109/IGBSG.2019.8886223.
- Cumanan, Z. D. (2016). "Group Secret Key Generation in Wireless Networks: Algorithms and Rate Optimization,". *in IEEE Transactions on Information Forensics and Security*, vol. 11, no. 8, pp. 1831-1846, Aug. 2016, doi: 10.1109/TIFS.2016.2553643.

- Das, S. S. (2015). "Optimum placement and sizing of DGs using analytical method for different types of loads,". *2015 Annual IEEE India Conference (INDICON)*, pp. 1-5, doi: 10.1109/INDICON.2015.7443207.
- Ding, T. W. (2015). Método de diseño para armónicos de tercer orden con filtro de paso alto. IEEE.
- Ezzat, M. M. (2017). Low-voltage ride-through techniques. *En Industrial Electronics Society IECON*.
- Geiger, D. M. (2017). Evaluación de fluctuaciones de voltaje y parpadeo usando Valores RMS de medio ciclo.
- Gomez & Oviedo, E. P. (2017). Module for Recording Voltage Sags in Low Voltage Systems. Bogotá-Colombia: IEEE.
- Halder, T. (2020). "Effects & Symptoms of the Harmonics of the Diode Rectifier in the Power Quality Issues,". *IEEE 9th Power India International Conference (PIICON), 2020*, pp. 1-6, doi: 10.1109/PIICON49524.2020.9112964.
- Hasan, M. R. (2020). An overview of unbalance compensation techniques using power electronic converters for active distribution systems with renewable generation. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032120301088>, doi.org/10.1016/j.rser.2020.109812.
- Iqbal, M. J. (2021). "Neural Networks Based Shunt Hybrid Active Power Filter for Harmonic Elimination,". *IEEE Access*, vol. 9, pp. 69913-69925.
- J. A. Lopez, M. A.-G. (2019). "Effects of Frequency Drift and Harmonics in Power Factor Correction Systems,". *International Conference on Mechatronics, Electronics and Automotive Engineering (ICMEAE)*, 2019, pp. 98-101, doi: 10.1109/ICMEAE.2019.00025.
- Jintaka, S. K. (2019). "Correlation of Harmonics Distorted Current to Current-Carrying Capacity in Different Cable Cross Section,". *2019 International Conference on Electrical Engineering and Informatics (ICEEI)*, pp. 320-323, doi: 10.1109/ICEEI47359.2019.8988896.
- K. Karthi, R. R. (2017). "Role of ZigZag transformer on neutral current reduction in three phase four wire power distribution system,". *International Conference on Intelligent Computing, Instrumentation and Control Technologies (ICICT)*, pp. 138-141, doi: 10.1109/ICICT1.2017.8342548.
- K. Malekian, A. G. (2015). "Analysis and modeling of time-varying harmonics in frequency domain,". *2015 9th International Conference on Compatibility and Power Electronics (CPE)*, pp. 43-48, doi: 10.1109/CPE.2015.7231047.
- Kaisar, S. M. (2020). Análisis y Aplicación del transformador Zigzag en Sistemas de Distribución para mitigación de armónicos de tercer orden. India: IEEE.

- Karthi, K. &. (2017). Papel del transformador ZigZag en la reducción de corriente neutra en energía trifásica de cuatro cables Sistema de distribución. India : IEEE.
- Khripkov, V. Z. (2018). "Comparative Analysis of Mathematical Models for the Coefficient of Conductor Resistance Increase Due to Higher Harmonics,". *2018 XIV International Scientific-Technical Conference on Actual Problems of Electronics Instrument Engineering (APEIE)*, pp. 133-136, doi: 10.1109/APEIE.2018.8545749.
- Lantsov, V. (2020). "A New Algorithm for Solving of Harmonic Balance Equations by Using the Model Order Reduction Method,". *2020 Ural Symposium on Biomedical Engineering, Radioelectronics and Information Technology (USBREIT)*, pp. 295-297, doi: 10.1109/USBREIT48449.2020.9117768.
- Pandu. (2021). "Power Quality Enhancement in Sensitive Local Distribution Grid Using Interval Type-II Fuzzy Logic Controlled DSTATCOM,". *in IEEE Access*, vol. 9, pp. 59888-59899, doi: 10.1109/ACCESS.2021.3072865.
- Prasad, M. M. (2018). *Comparación de rendimiento de las características del voltaje Swell en el sistema de distribución de energía*. Coimbatore: IEEE.
- Quinga, D. (2015). Estudio Complementario de Análisis de la Calidad de Energía Eléctrica en el Bloque 15. Quito: Escuela Politécnica Nacional.
- R. Sharma, N. G. (2018). "Performance Investigation of Fractional PI Controller in Shunt Active Filter for a Three Phase Four Wire System,". *4th International Conference on Computing Communication and Automation (ICCCA)*, pp. 1-7, doi: 10.1109/CCAA.2018.8777576.
- Reinoso, M. (2015). Efectos de las cargas no lineales en las pérdidas de los transformadores de distribución - aplicación en la empresa eléctrica Quito S.A. Quito: Escuela Politécnica Nacional.
- Saxena, R. K. (2016). Optimización de Sag/Swell de tensión utilizando tensión dinámica restauradora (DVR). Gwalior, India: IEEE.
- Shariatpanahi, S. A. (2016). "Multi-Server Coded Caching". *in IEEE Transactions on Information Theory*, vol. 62, no. 12, pp. 7253-7271, Dec. 2016, doi: 10.1109/TIT.2016.2614722.
- Shariatpanahi, S. A. (2016). "Multi-Server Coded Caching,". *in IEEE Transactions on Information Theory*, vol. 62, no. 12, pp. 7253-7271, Dec. 2016, doi: 10.1109/TIT.2016.2614722.
- Shariatpanahi, S. A. (2016). Multi-Server Coded Caching,. *in IEEE Transactions on Information Theory*, vol. 62, no. 12, pp. 7253-7271, Dec. 2016, doi: 10.1109/TIT.2016.2614722.

- Subramaniam, A. S. (2017). "Voltage and current-harmonics induced ageing in electrical insulation,". *2017 International Symposium on Electrical Insulating Materials (ISEIM)*, pp. 403-406, doi: 10.23919/ISEIM.2017.8088770.
- Toledo, M. (2015). Análisis y Propuesta para la Mitigación de la Contaminación Armónica en las Subestaciones de la Empresa Eléctrica Centrosur. Cuenca: Universidad Politécnica Salesiana Sede Cuenca.
- UÇAR, F. F. (2017). Detección e índice simples basados en la transformada de Hilbert y Análisis de caídas de voltaje utilizando datos sintéticos. Turkey: IEEE.
- Virulkar, B. R. (2015). "Mitigation of harmonics in a neutral conductor for three-phase four-wire distribution system using series active power filter,". *IEEE International Conference on Electrical, Computer and Communication Technologies (ICECCT)*, 2015, pp. 1-6, doi: 10.1109/ICECCT.2015.7225998.