

ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL

Facultad de Ingeniería en Electricidad y Computación

“Estudio de la calidad de energía y el impacto respectivo en los medidores del consumo eléctrico, componentes electrónicos y transductores, en la Escuela Superior Politécnica del Litoral.”

PROYECTO INTEGRADOR

Previo la obtención del Título de:

Ingeniería en Electricidad

Presentado por:

Barnuevo León Gustavo André

Pérez Lucio Ariel Alexander

GUAYAQUIL - ECUADOR

Año: 2022

DEDICATORIA

A Dios por permitirme cumplir esta meta, por llenarme de fuerzas y valor cuando a mi alrededor las circunstancias se vuelven adversas.

A mis padres Byron y María del Cisne, que privilegio tenerlos en mi vida, ellos son mi motor y fortaleza, no han dejado ni un solo minuto de apoyarme y confiar en mí, me han enseñado que con esfuerzo y sacrificio los sueños se cumplen.

A mis hermanas y familia que son mis compañeros de viaje, gracias por preocuparse y estar siempre presentes en cada paso que doy.

Finalmente, a mis amigos aquellos que con el pasar de los años se vuelven familia, los que celebran mis triunfos como si fueran suyos.

Gustavo André Barnuevo León

DEDICATORIA

A Dios por permitirme llegar a este momento, por darme las fuerzas para ponerme de pie y avanzar en los momentos de adversidad.

A mis padres Jaime Perez y May Lucio por enseñarme el valor del sacrificio, esfuerzo y perseverancia, porque que siempre han mostrado apoyo incondicional en mis sueños y metas.

A mi prometida Andreina Duran que ha estado a mi lado durante gran parte de mi desarrollo académico y profesional, aconsejándome e impulsándome a convertirme en un mejor profesional y ser humano.

A mis hermanos y familiares que me han visto crecer y han velado por mi en cada momento hasta el día de hoy.

Ariel Alexander Pérez Lucio

AGRADECIMIENTOS

A la Escuela Superior Politécnica del Litoral por su excelencia académica, formando nuestro crecimiento profesional, en base a conocimientos y experiencias adquiridas a lo largo de la carrera universitaria.

A toda la comunidad politécnica, en especial docentes de la Facultad de Ingeniería en Electricidad y Computación (FIEC), por permitir culminar hoy nuestros estudios.

Al Dr. Miguel Torres, tutor y amigo de quien recibimos apoyo constantemente, quien en conjunto del MsC. Jorge Aragundi, Ing. Valverde y Ing. Cruz, formaron el pilar fundamental para la elaboración del presente proyecto.

DECLARACIÓN EXPRESA

“Los derechos de titularidad y explotación, nos corresponde conforme al reglamento de propiedad intelectual de la institución; *Gustavo André Barnuevo León* y *Ariel Alexander Pérez Lucio* damos nuestro consentimiento para que la ESPOL realice la comunicación pública de la obra por cualquier medio con el fin de promover la consulta, difusión y uso público de la producción intelectual”



Gustavo Barnuevo



Ariel Pérez

EVALUADORES

Dr. Ángel Recalde
Profesor de la materia

Dr. Miguel Alberto Torres
Profesor tutor

RESUMEN

La calidad de energía es uno de los aspectos más importantes en el desarrollo del campo energético, esto implica que consumidores con alta demanda de energía deban cumplir con reglamentos y normativas. El presente estudio acerca de la calidad energética en ESPOLE tiene como finalidad la reducción de los efectos provocados por las cargas no lineales conectadas a la red eléctrica del campus y la distorsión armónica, como son; la elevada demanda, altos costos de facturación y el impacto generado al ambiente. La propuesta de solución corresponde a un modelo de filtro activo de potencia, el cual fue simulado tomando datos reales de 5 edificios del campus, que presentan mayores inconvenientes en distorsión armónica. El filtro está basado en la teoría D-Q y fue diseñado en el software Matlab-Simulink junto a otros datos, como lo son la demanda promedio del campus, parámetros de la red eléctrica, tipos de carga no lineal y tarifa horaria del consumo eléctrico. Adicionalmente, se utilizó de referencia la norma ISO50001 y el estándar IEEE-519, donde se establece que la distorsión armónica de voltaje máxima a nivel residencial es del 8 %. Los resultados presentados en el estudio indicaron una reducción en el consumo eléctrico y costos de facturación diaria de entre el 25 y 60%, mientras que en términos de distorsión armónica de voltaje se obtuvo una reducción aproximadamente 50%. Por lo tanto, la implementación del filtro indica una mejora en la eficiencia, aprovechamiento del recurso energético y reducción del impacto ambiental en el campus.

Palabras Clave: Consumo energético, Calidad de energía, Distorsión armónica, Filtro activo de potencia.

ABSTRACT

Power quality is one of the most important aspects in the development of the energy field, this implies that consumers with high energy demand must comply with regulations and standards. The purpose of this study on energy quality at ESPOL is to reduce the effects caused by non-linear loads connected to the campus electrical network and harmonic distortion, such as the high demand, high billing costs and the impact generated on the environment. The proposed solution corresponds to an active power filter model, which was simulated by taking real data from 5 buildings on campus, which have major drawbacks in harmonic distortion. The filter is based on the D-Q theory and was designed in the Matlab-Simulink software and other data, such as the average demand of the campus, parameters of the electrical network, types of non-linear load and hourly rate of electricity consumption. Additionally, the ISO50001 standard and the IEEE-519 standard were used as a reference, where it is established that the maximum voltage harmonic distortion at the residential level is 8%. The results presented in the study indicated a reduction in electricity consumption and daily billing costs of between 25 and 60%, while in terms of voltage harmonic distortion a reduction of approximately 50% was obtained. Therefore, the implementation of the filter indicates an improvement in efficiency, use of the energy resource and reduction of the environmental impact on the campus.

Keywords: Energy consumption, Energy quality, Harmonic distortion, Active power filter

ÍNDICE GENERAL

| | |
|---|-----|
| EVALUADORES | 6 |
| RESUMEN | I |
| ABSTRACT | II |
| ÍNDICE GENERAL | III |
| ABREVIATURAS..... | V |
| SIMBOLOGÍA..... | VI |
| ÍNDICE DE FIGURAS | VII |
| ÍNDICE DE TABLAS..... | IX |
| CAPÍTULO 1 | 10 |
| 1. Introducción..... | 10 |
| 1.1 Descripción del problema | 11 |
| 1.2 Justificación del problema | 12 |
| 1.3 Objetivos | 13 |
| 1.3.1 Objetivo General | 13 |
| 1.3.2 Objetivos Específicos | 13 |
| 1.4 Marco teórico | 13 |
| 1.4.1 Revisión de Literatura | 13 |
| 1.4.2 Marco conceptual..... | 16 |
| 1.4.3 Marco legal | 20 |
| CAPÍTULO 2 | 25 |
| 2. Metodología | 25 |
| 2.1 Estado de la calidad de energía en ESPOL..... | 25 |
| 2.1.1 Cargas no lineales presentes en las edificaciones | 25 |
| 2.1.2 Edificios con mayor presencia de armónicos..... | 25 |
| 2.2 Fundamentos para el diseño del Filtro..... | 26 |
| 2.2.1 Criterios de selección de diseño..... | 26 |
| 2.2.2 Teoría De Potencia Reactiva Instantánea | 27 |
| 2.2.3 Aplicación de la Teoría D-Q | 28 |
| 2.3 Interconexión del Filtro Activo a ESPOL..... | 29 |
| 2.4 Modelo de Filtro Activo conectado a ESPOL en Software | 31 |
| 2.4.1 Primer Caso de estudio..... | 31 |
| 2.5.2 Segundo Caso de estudio | 31 |
| CAPÍTULO 3 | 33 |
| 3. Resultados y anÁLisis | 33 |
| 3.1 Edificio Rectorado (Bloque 6A) | 33 |
| 3.2 Edificio Biblioteca (Bloque 7B)..... | 37 |

| | |
|--|----|
| 3.3 Edificio FIEC (Bloque 11C/11D/11A)..... | 41 |
| 3.1.3 Edificio FIMCP (Bloque 12A/12G/12H/12D)..... | 45 |
| 3.5 Laboratorio STR (Bloque 11C)..... | 49 |
| 3.6 Revisión de Costos | 53 |
| CAPÍTULO 4 | 55 |
| 4. Conclusiones Y Recomendaciones | 55 |
| 4.1 Conclusiones | 55 |
| 4.2 Recomendaciones | 56 |
| BIBLIOGRAFÍA | 57 |
| APÉNDICES | 59 |
| APÉNDICE A | 59 |
| APÉNDICE B..... | 59 |
| APÉNDICE C..... | 60 |
| APÉNDICE D..... | 60 |
| APÉNDICE E..... | 61 |
| APÉNDICE F..... | 61 |
| APÉNDICE G..... | 62 |
| APÉNDICE H..... | 63 |

ABREVIATURAS

| | |
|----------|---|
| ESPOL | Escuela Superior Politécnica del Litoral |
| FIEC | Facultad de Ingeniería en Electricidad y Computación |
| FIMCP | Facultad de Ingeniería Mecánica y Ciencias de la Producción |
| STR | Simulación en tiempo real |
| IEEE | Institute of Electrical and Electronics Engineers |
| ISO | International Organization for Standardization |
| IEC | International Electrotechnical Commission |
| EN | European Standards |
| CNEL EP | Corporación Nacional de Electricidad |
| ARCERNNR | Agencia de Regulación y Control de Energía y Recursos Naturales No Rnv. |
| SNEE | Sistema Nacional de Eficiencia Energética |
| PLANNE | Plan Nacional de Eficiencia Energética |
| CNEE | Comité Nacional de Eficiencia Energética |
| SINTEF | Stiftelsen for industriell og teknisk forskning |
| NN | Neuronal Network |
| PI | Proporcional e integral |
| THD_v | Voltage Total Harmonic Distortion (Distorsion Armonica Total de Voltaje) |
| THD_i | Current Total Harmonic Distortion (Distorsion Armonica Toltal de Corriente) |

SIMBOLOGÍA

| | |
|-----------|--------------------------------------|
| V | Voltio |
| V_{L-L} | Voltaje línea a línea |
| V_{L-N} | Voltaje línea neutro |
| A | Amperio |
| kW | Kilovatio |
| kWh | Kilovatio-hora |
| kVA | Kilovoltio-Amperio |
| kVAr | Kilovoltio-Amperio-Reactivo |
| I_D | Corriente de eje directo |
| I_Q | Corriente de eje cuadratura |
| I_L | Corriente lineal |
| I_{NL} | Corriente no lineal |
| RMS | Raíz cuadrada media/Root mean square |
| h | Hora |
| min | Minuto |
| s | Segundo |
| % | Porcentaje |
| CO_2 | Dióxido de carbono |

ÍNDICE DE FIGURAS

| | |
|---|----|
| Figura 1.1 Forma de onda de la distorsión armónica..... | 17 |
| Figura 1.2 Forma de onda de equipos generadores de armónicos | 18 |
| Figura 1.3 Diagrama esquemático del filtro activo en derivación..... | 19 |
| Figura 1.4 Diagrama esquemático del filtro activo serie | 19 |
| Figura 2.1 Diagrama vectorial de la Transformada de Clarke y Park | 28 |
| Figura 2.2 Diagrama de bloques para diseño del filtro activo basado en la Teoría D-Q29 | |
| Figura 2.3 Sistema eléctrico de Potencia en ESPOL..... | 30 |
| Figura 2.4 SEP del primer caso en Matlab-Simulink..... | 31 |
| Figura 2.5 SEP del segundo caso en Matlab-Simulink..... | 31 |
| Figura 2.6 Filtro Activo de potencia propuesto (Farswan, 2022) | 32 |
| Figura 3.1 Señales de voltaje RECTORADO sin filtro activo (a) Señales de voltaje RECTORADO con filtro activo (b) | 33 |
| Figura 3.2 Señales de corriente RECTORADO sin filtro activo (a) Señales de corriente RECTORADO con filtro activo (b) | 34 |
| Figura 3.3 Espectro armónico de voltaje RECTORADO sin filtro activo (a) Espectro armónico de voltaje RECTORADO con filtro activo (b)..... | 35 |
| Figura 3.4 Espectro armónico de corriente RECTORADO sin filtro activo (a) Espectro armónico de corriente RECTORADO con filtro activo (b)..... | 35 |
| Figura 3.5 Señales de voltaje BIBLIOTECA sin filtro activo (a) Señales de voltaje BIBLIOTECA con filtro activo (b) | 37 |
| Figura 3.6 Señales de corriente BIBLIOTECA sin filtro activo (a) Señales de corriente BIBLIOTECA con filtro activo (b) | 38 |
| Figura 3.7 Espectro armónico de voltaje BIBLIOTECA sin filtro activo (a) Espectro armónico de voltaje BIBLIOTECA con filtro activo (b) | 39 |
| Figura 3.8 Espectro armónico de corriente BIBLIOTECA sin filtro activo (a) Espectro armónico de corriente BIBLIOTECA con filtro activo (b)..... | 39 |
| Figura 3.9 Señales de voltaje FIEC sin filtro activo (a) Señales de voltaje FIEC con filtro activo (b)..... | 41 |
| Figura 3.10 Señales de corriente FIEC sin filtro activo (a) Señales de corriente FIEC sin filtro activo (b) | 42 |

| | |
|---|----|
| Figura 3.11 Espectro armónico de voltaje FIEC sin filtro activo (a) Espectro armónico de voltaje FIEC con filtro activo (b)..... | 43 |
| Figura 3.12 Espectro armónico de corriente FIEC sin filtro activo (a) Espectro armónico de corriente FIEC con filtro activo (b) | 43 |
| Figura 3.13 Señales de voltaje FIMCP sin filtro activo (a) Señales de voltaje FIMCP sin filtro activo (b) | 45 |
| Figura 3.14 Señales de corriente FIMCP sin filtro activo (a) Señales de corriente FIMCP sin filtro activo (b) | 46 |
| Figura 3.15 Espectro armónico de voltaje FIMCP sin filtro activo (a) Espectro armónico de voltaje FIMCP con filtro activo (b) | 47 |
| Figura 3.16 Espectro armónico de corriente FIMCP sin filtro activo (a) Espectro armónico de corriente FIMCP con filtro activo (b) | 47 |
| Figura 3.17 Señales de voltaje STR sin filtro activo (a) Señales de voltaje STR sin filtro activo (b)..... | 49 |
| Figura 3.18 Señales de corriente STR sin filtro activo (a) Señales de corriente STR sin filtro activo (b) | 50 |
| Figura 3.19 Espectro armónico de voltaje STR sin filtro activo (a) Espectro armónico de voltaje STR con filtro activo (b)..... | 51 |
| Figura 3.20 Espectro armónico de corriente STR sin filtro activo (a) Espectro armónico de corriente STR con filtro activo (b) | 51 |

ÍNDICE DE TABLAS

| | |
|--|----|
| Tabla 1.1 Límites de distorsión armónica según la norma IEEE-519 | 23 |
| Tabla 1.2 Límites de corriente armónica según la norma IEC 6100032 | 24 |
| Tabla 2.1 Cargas no lineales presentes en el campus de la ESPOL | 25 |
| Tabla 2.2 Medidores con alta presencia de armónicos en el campus | 26 |
| Tabla 3.1: Comparación de resultados RECTORADO | 36 |
| Tabla 3.2 Comparación de resultados BIBLIOTECA..... | 40 |
| Tabla 3.3 Comparación de resultados FIEC..... | 44 |
| Tabla 3.4 Comparación de resultados FIMCP..... | 47 |
| Tabla 3.5 Comparación de resultados STR..... | 52 |
| Tabla 3.6 Revisión de costos de inversión | 53 |

CAPÍTULO 1

1. INTRODUCCIÓN

En los últimos años, la demanda de energía se ha incrementado debido a la globalización e industrialización, siendo la calidad energética uno de los principales problemas en el mercado eléctrico actual. Sin embargo, años atrás la principal preocupación de las empresas era entregar la energía requerida por los clientes, hoy se obliga que aquella energía cumpla con estándares de calidad, normativas que aseguren la confiabilidad necesaria para la protección y el rendimiento de los equipos de los consumidores. Con la creciente importancia de la calidad de la energía en el sector eléctrico, disponer de instrumentos de medición de energía se volvió significativamente relevante debido a que permite proporcionar información en tiempo real del estado del sistema eléctrico analizado.

A partir de 1920, las perturbaciones de voltaje y corriente, es decir la distorsión de onda en sistemas eléctricos de potencia, dieron su origen con la introducción de máquinas de corriente alterna y motores de inducción. Los armónicos y la potencia reactiva son los problemas de calidad de energía más importantes, que afectan el comportamiento del sistema. Con la introducción de cargas no lineales a la red, se generan estos armónicos, a distintos niveles de voltaje y corriente tales como; fuentes de alimentación informática, energía estática, convertidores, balastos electrónicos de alta frecuencia, entre otros. Esto para el usuario final se traduce en una gran desventaja en su sistema eléctrico, debido a que los medidores de facturación varían sus resultados cuando hay armónicos o cargas desequilibradas, basándose únicamente en la potencia activa. El cliente puede estar dispuesto a pagar más por una mejor calidad de energía, así como también debe pagar por contaminar la red eléctrica. Para resolver el problema de la calidad de energía, se utilizan filtros pasivos y activos, pero la desventaja del pasivo es que su filtración es limitada únicamente para los armónicos que fueron diseñados, por lo cual no se considera una solución general del sistema. No obstante, el filtro de potencia activa es excelente y ocupa muchas partes de las teorías de control, el método de extracción de armónicos y los métodos de generación de corriente de referencia del filtro.

El estudio de calidad de energía propuesto es realizado en el campus de la Escuela Superior Politécnica del Litoral, donde por todo lo antes mencionado es necesario este diagnóstico, para conocer la propagación e impacto de las perturbaciones eléctricas en los medidores de bajo costo. Por otro lado, para el presente proyecto también se plantea un modelo de filtro activo en derivación, diseñado en MATLAB-Simulink, de modo que, al observar el consumo energético en los edificios, se puedan mitigar estos desbalances registrados en los medidores, mejorando su exactitud y la confiabilidad, para la reducción de costos de facturación y el impacto al ambiente. Cabe recalcar que, para validar la factibilidad de implementación del filtro, se hace una comparación con los resultados obtenidos del estudio realizado anteriormente en la ESPOL, y con el costo de implementación de un filtro activo industrial.

El presente proyecto está compuesto de cuatro capítulos desarrollados a lo largo del documento. Lo correspondiente al primer capítulo son; la descripción y justificación del problema, objetivos que se llevarán a cabo, marco teórico que corresponde al estado del arte, marco conceptual y marco legal. En el segundo capítulo, está la metodología a aplicar, levantamiento de cargas no lineales, y selección de edificios para el caso de estudio. En el tercer capítulo, están el análisis y resultados de las simulaciones para los 5 escenarios considerados y la revisión de costos. Finalmente, el cuarto capítulo corresponde a las conclusiones y recomendaciones.

1.1 Descripción del problema

Actualmente en Ecuador el Ministerio de Energía y Recursos No Renovables establece que todos los grandes consumidores deben constar de un control y monitoreo de la calidad de su consumo energético, para de esta forma identificar anomalías en su consumo y equipos que interfieran con los registros en los medidores. Para el año 2020, en el país se generó una facturación eléctrica de \$ 1.861,62 millones USD y fueron emitidas 1.545 miles de toneladas de CO_2 . (ARCERNNR, 2021)

El presente estudio se realiza en el campus Gustavo Galindo de la ESPOL, mismo que consta de 85 medidores de bajo costo, distribuidos a lo largo del campus. Las instalaciones de la universidad cuentan con diversos equipos y sistemas como los son; centros de cómputo, instrumentos de laboratorio, centrales de aire acondicionado, conjunto de servidores, balastos, entre otros. Un estudio previo realizado por el Ing. Jorge Valverde junto al Ing. Alberto Cruz demostró que existen inconvenientes en los registros de los medidores; dado que en los edificios del campus existen diferentes equipos que son grandes generadores de armónicos y comprometen la calidad del sistema eléctrico. Por lo cual, se presenta la oportunidad de establecer la mejor estrategia para la mitigación armónica y optimización del consumo, que es el filtro activo de potencia. Considerando lo establecido se puede definir la problemática de la siguiente manera: ¿Cuáles son los factores que comprometen la calidad de los registros del consumo eléctrico en la ESPOL y que efecto produce el modelo de filtro activo en el consumo eléctrico, reducción de costos de facturación e impacto ambiental?

1.2 Justificación del problema

En base a la problemática presentada es de gran importancia un estudio de la calidad de energía, determinando cuáles factores influyen de forma negativa en el consumo energético. Las instalaciones de ESPOL, con aquel estudio de calidad energético y junto al modelo de filtro activo, disminuirán significativamente el consumo eléctrico y costos de facturación. Para el desarrollo del estudio es necesario realizar un levantamiento de las zonas que presenten mayor porcentaje de cargas no lineales, y en estas aplicar el filtro activo en derivación para conocer la reducción de la distorsión armónica total y consumo. Lo antes mencionado, con el propósito de contribuir al estudio realizado en el campus por Cruz y Valverde. Otro aspecto importante que mencionar es el impacto comercial que un estudio de estas características propone, debido a que, al ser requerido el control de calidad en el consumo energético por mandato legal, esto genera una oportunidad en el mercado que puede ser explorada estableciendo una solución a bajo costo, para que sea comercializada a otros grandes consumidores.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo General

Realizar un estudio de calidad del consumo energético en la Escuela Superior Politécnica del Litoral, empleando un modelo de filtro activo de potencia en derivación para la reducción de armónicos en los medidores de bajo costo, reduciendo el consumo energético, costos de facturación y la contaminación ambiental.

1.3.2 Objetivos Específicos

- Justificar el diseño y la viabilidad de implementación del filtro activo a los medidores de bajo costo, mediante la comparación de los parámetros técnicos y económicos entre diferentes dispositivos existentes, para una correcta validación de la propuesta.
- Diagnosticar el nivel de impacto de armónicos en la lectura de los registradores de energía y los efectos que esto implica en los costos de facturación.
- Incentivar a ESPOL y a otros grandes consumidores a desarrollar políticas para optimizar el consumo energético de forma continua, guiándose de la norma ISO50001.

1.4 Marco teórico

1.4.1 Revisión de Literatura

En lo que respecta a la calidad de energía para cualquier sistema eléctrico, la presencia de armónicos en la red es uno de los problemas más comunes, afectando la onda sinusoidal tanto de voltaje como de corriente del suministro. De acuerdo con lo antes mencionado, se presentan los siguientes artículos, mismos que corresponden a estudios y alternativas para la reducción armónicos de la red, mejorando la calidad energética del sistema.

Utilizando dos programas computacionales, Alternative Transient Program (ATP/EMTP) y Electrical Power System Analysis (ETAP), se realizó un análisis de compensación de armónicos y factor de potencia para una planta industrial en 3 diversos escenarios. El primero no presenta compensación alguna, el segundo corresponde a la inclusión de banco de capacitores de capacidad de 2.5 MVA_r y finalmente el último caso consiste en un filtro pasivo (considerando el caso 2). Los resultados en las simulaciones se justifican por el estándar IEEE 18. (Jurado & Brugnon, 2008)

Según un estudio para la compensación de armónicos por medio de un filtro activo de potencia desarrollado por Duberney Murillo (2010), demostró que los cambios realizados en el control de corriente no afectan los resultados de compensación e índices de distorsión armónica en la corriente de fuente. Generalmente esto ocurre, en escenarios de carga balanceada y voltajes simétricos en el punto de conexión de carga, por lo cual es considerado favorable, y se espera un buen funcionamiento de las estrategias de compensación.

Ouchen, Betka, & Abdeddaim (2016), propuso un filtro de potencia activa en derivación, y un enfoque de identificación basado en un lazo de fijación de fase (PLL), que no es sensible a las perturbaciones, específicamente a la tensión armónica y desequilibrada. Además, se introdujo un filtro autoajutable (STF), para extraer corrientes armónicas en lugar de la extracción clásica a partir de filtros de paso alto o bajo. Los resultados de la simulación demuestran un rendimiento dinámico y una capacidad para la eliminación de armónicos y compensación de potencia reactiva. Así mismo, Suhendar, Firmansyah, Maulana, & Zuldiag (2017), diseñó un SAPF, pero basado en la teoría P-Q combinado con filtros de paso alto (HPF) para un sistema trifásico a tensión de 220 V, y frecuencia de 50 Hz. A través de MATLAB-Simulink, se demostró que el filtro de potencia activa propuesto con un Inversor de puente H de dos niveles (CDMI), produce un menor THD, que el filtro con un Inversor multinivel de diodo abrazadera (DLHI).

De acuerdo con un estudio realizado por Martinek, Rzigky, Jaros, Bilik, & Ladrova (2019), las cargas electrónicas sobrepasaban las capacidades de soluciones técnicas tradicionales por medio de filtros pasivos para la reducción de distorsión armónica, debido a que presentan inestabilidad a los fenómenos provocados por la resonancia. La implementación de filtros activos de potencia presenta una solución más viable para casos en los cuales el consumidor cuenta con equipos que inyectan múltiples armónicos a la red.

Se comparó la teoría de potencia reactiva instantánea, con la teoría D-Q para detección y eliminación de armónicos generados por una carga no lineal. A diferencia de los demás métodos, aquí se implementó un algoritmo de alimentación directa y una red neuronal basada en inteligencia artificial, que permite la detección de armónicos para luego generar una corriente de referencia y el convertidor de fuente de voltaje (VSC) produzca la corriente de compensación. Los resultados se justifican por el estándar IEEE 519. (Naim & Tawfiq, 2020)

Cruz y Valverde (2022), realizaron un estudio de calidad de energía en el campus de la Escuela Superior Politécnica del Litoral, con el fin de verificar el estado de 83 medidores de bajo costo de la marca ZENSOR 3120, instalados en los edificios del campus. Las mediciones fueron realizadas con el equipo ECAMEC PQ3plus, que fue otorgado por la empresa CNEL EP. A lo largo del procedimiento, se presentaron inconvenientes debido a múltiples causas, entre ellas los armónicos eléctricos. Por lo cual, mediante comparaciones entre mediciones del equipo ZENSOR 3120 y ECAMEC PQ3plus, se obtuvieron lecturas que no cumplen con los estándares de calidad de energía, como la distorsión armónica (THD), que en la gran mayoría de los edificios fue bastante significativo, donde únicamente 11 de los 83 medidores presentaron errores inferiores a 2% en términos de energía activa, y 2 de estos en energía reactiva.

Los diferentes trabajos mencionados anteriormente, indican que una de las mejores soluciones a la elevada distorsión armónica es la implementación de filtros activos de potencia. Es importante mencionar que existen distintos métodos y teorías de desarrollo para modelos de filtro activo, en el caso del presente proyecto se utilizará la teoría D-Q para los edificios que se ven mayormente afectados en el campus de ESPOL, diseñando el sistema de potencia trifásico de la universidad en MATLAB-Simulink, e utilizando datos reales del consumo energético en los últimos meses de facturación.

1.4.2 Marco conceptual

Calidad de la energía eléctrica

Es la capacidad de una red eléctrica para suministrar energía a los consumidores de manera eficiente, además expresa la capacidad que posee un equipo para consumir energía. En términos técnicos, la calidad de la energía es la medida, el estudio y la mejora de la forma de onda sinusoidal de la tensión, corriente y frecuencia nominales.

Medidores de bajo costo

Estos medidores permiten el monitoreo continuo de un sistema eléctrico de potencia, proporcionando medición parámetros de; corriente, voltaje, potencia activa y reactiva, uso de energía, costo de energía, factor de potencia y frecuencia. En el mercado existen productos de alto rendimiento para medir los parámetros de calidad de la energía, pero este enfoque genera altos costos y no es apropiado para la medición. Un enfoque diferente es el uso de medidores de bajo consumo y costo de energía, que podrían ser dispositivos específicos de monitoreo constante y especializado.

Factores que influyen en la calidad de energía

Los factores más influyentes en la calidad energética de un sistema eléctrico son; armónicos eléctricos de voltaje y corriente, bajo factor de potencia, inestabilidad de voltaje y desequilibrio, componentes de secuencia negativa y cero. Estos factores afectan en; la eficiencia de los equipos eléctricos, mayor costo de energía, mantenimiento y vida útil de los equipos.

Factor de potencia (PF)

Es la relación entre la potencia activa, medida en kilovatios, y la potencia aparente, medida en kilovoltios amperios, teniendo en cuenta que solo la potencia activa es considerada en la facturación de costos de energía y a potencia aparente, también conocida como demanda, es la medida de la cantidad de energía utilizada para hacer funcionar una carga durante un período determinado.

Armónicos eléctricos

En un sistema eléctrico, un armónico es una tensión o corriente en un múltiplo de la frecuencia fundamental del sistema. Los armónicos se pueden describir como el comportamiento de la forma de onda, en relación con su frecuencia fundamental, y si esta forma de onda se desvía de la sinusoidal, contiene armónicos. Estos son generados por cargas no lineales que provocan una corriente no deseada, sobrecargas en conductores neutros debido al aumento acumulativo en los terceros armónicos creados por las cargas monofásicas, degradando la calidad del suministro de energía eléctrica además de provocar envejecimiento prematuro de los generadores, transformadores y motores.

La distorsión armónica total (THD)

Es la relación entre el valor RMS de la suma de todos los componentes armónicos y el valor RMS del componente fundamental, tanto para voltaje como para corriente. Véase en la Figura 1.1, la distorsión armónica producida.

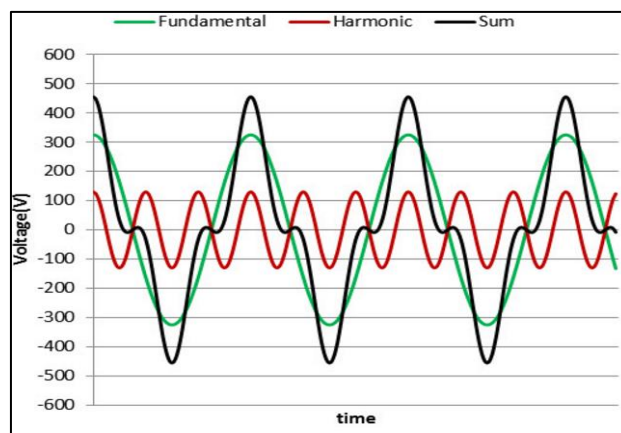


Figura 1.1 Forma de onda de la distorsión armónica

Fuente: (Seenco Group Team, 2017)

Cargas No Lineales

Una carga no lineal en un sistema de potencia se caracteriza por la introducción de una acción de conmutación y, en consecuencia, interrupciones de corriente. Este comportamiento proporciona corriente con diferentes componentes que son múltiplos de la frecuencia fundamental del sistema, es decir armónicos. Ciertos ejemplos de cargas no líneas son; computadoras, máquinas de fax, impresoras, PLC, refrigeradores, televisores, balastos. Las computadoras personales generan armónicos ya que incorporan fuentes de alimentación conmutadas. A continuación, en la

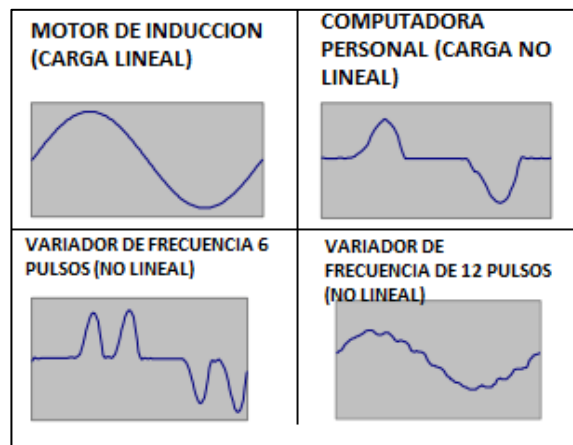


Figura 1.2 Forma de onda de equipos generadores de armónicos

Fuente: (Andrés, 2022)

Filtro activo de derivación

Shunt active power filter es uno de los dispositivos más indispensables en un sistema eléctrico de potencia, que se conecta en paralelo a la carga no lineal (véase en la Figura 1.3). Estos filtros utilizan un puente de transistores bipolares de puerta aislada de conmutación rápida, que produce una corriente de salida de la forma deseada que se inyecta en las líneas AC, compensando las corrientes reactivas y armónicas. Los filtros de potencia activa de derivación deben generar suficiente corriente armónica y reactiva para compensar los armónicos eléctricos generados por la carga no lineal.

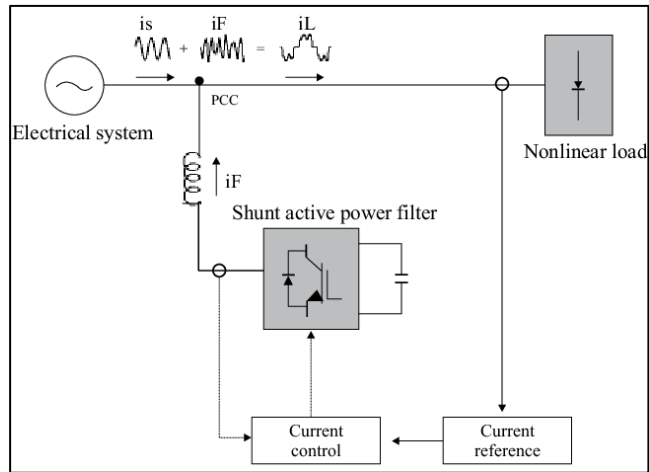


Figura 1.3 Diagrama esquemático del filtro activo en derivación

Fuente: (Suárez, Amarís, & Robles, 2010)

Filtro activo serie

Series active filter funcionan principalmente como reguladores de voltaje y aisladores de armónicos entre una carga no lineal y la red pública distribuidora (véase en la Figura 1.4). Este tipo de enfoque se recomienda especialmente para la compensación de desequilibrios de voltaje y caídas de voltaje del suministro AC.

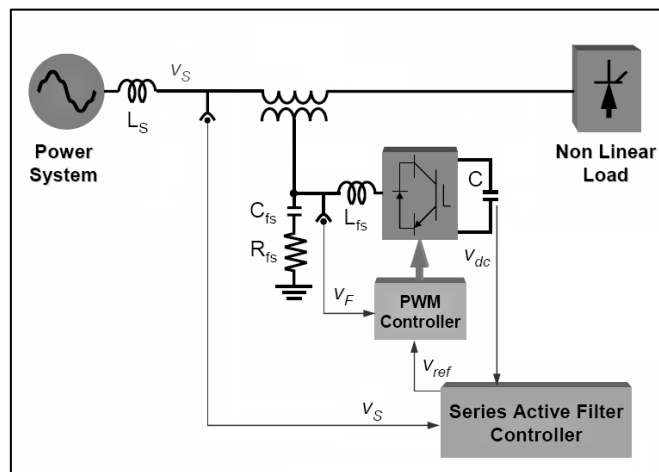


Figura 1.4 Diagrama esquemático del filtro activo serie

Fuente: (Salim, Benchouia, Goléa, & Zouzou, 2010)

1.4.3 Marco legal

A continuación, de la “Ley Orgánica de Eficiencia energética” establecida por la Asamblea Nacional de la Republica del Ecuador (2019) se presenta.

Artículo 1.- La presente Ley tiene como propósito establecer las regulaciones y marco legal de las operaciones del Sistema Nacional de Eficiencia Energética (SNEE), para promover el uso eficiente, adecuado y sostenible de la energía en todas sus formas de uso, con el propósito de aumentar el índice de seguridad energética en el país, por consecuente aumentar la producción de energía, incentivar una cultura de sustentabilidad ecológica reduciendo los efectos del cambio climático y asegurar los derechos de los ciudadanos de vivir en un entorno saludable con decisiones transparentes. La presente Ley es aplicable a toda actividad, ya sea pública o privada, institucional o particular que involucren la transformación y/o consumo de energía en cualquier forma y para todo propósito. (Ley Orgánica de Eficiencia Energética, 2019)

Artículo 2.- Se declara de interés nacional y como política de Estado, el uso eficiente, racional y sostenible de la energía, en todas sus formas, como elemento clave en el desarrollo de una sociedad solidaria, competitiva en lo productivo y preocupada por la sostenibilidad económica y ambiental. El Plan Nacional de Desarrollo debe contemplar dentro de sus procesos y lineamientos, elementos destinados específicamente a la política nacional de eficiencia energética y al uso racional de la energía. (Ley Orgánica de Eficiencia Energética, 2019)

Artículo 4.- En el presente artículo se define el uso racional y eficiente de la energía como; “Las prácticas conscientes de los individuos y la adopción de hábitos y cambios tecnológicos que intentan evitar el desperdicio en el uso de la energía en la cadena energética, conveniente en términos económicos, asegurando un igual o superior nivel de calidad y una reducción del impacto ambiental negativo”. (Ley Orgánica de Eficiencia Energética, 2019)

Artículo 5.- Se establece el Sistema Nacional de Eficiencia Energética (SNEE) como el conjunto de instituciones, políticas, planes y programas de inversión estructurados para el cumplimiento de los objetivos y metas establecidos en el Plan Nacional de Eficiencia Energética (PLANEE). El Ministerio rector de las políticas públicas de eficiencia energética, a través del Comité Nacional de Eficiencia Energética (CNEE) vigilará que el SNEE en todos sus ejes de acción esté funcionando de forma articulada para alcanzar las metas del PLANEE. (Ley Orgánica de Eficiencia Energética, 2019)

Artículo 15.- Los consumidores de los sectores público, industrial, comercial turístico, y recreativo serán categorizados, por sector y actividad de acuerdo con su consumo energético y los rangos correspondientes serán establecidos por la Ley. (Ley Orgánica de Eficiencia Energética, 2019)

- Grandes consumidores de energía.
- Medianos consumidores de energía.
- Pequeños consumidores de energía.

Artículo 16.- Los consumidores en los sectores público, industrial, comercial, turístico y recreativo, deberán procurar la implementación de acciones de eficiencia energética, mediante la adquisición de nuevas tecnologías, políticas de concientización empresarial, y optimización de uso de la energía en sus procesos productivos, con lo cual podrán ser beneficiarios de los incentivos que se establezcan para el efecto, así como del otorgamiento de certificados de ahorro de energía, de conformidad con los parámetros y condiciones establecidos en el Reglamento a esta Ley. (Ley Orgánica de Eficiencia Energética, 2019)

Artículo 17.- A nivel nacional, todo consumidor de energía debe velar permanentemente porque sus consumos estén enmarcados en el uso racional de la energía, y adaptar sus comportamientos de consumo, orientándolos al ahorro energético, sin que esto signifique disminuir sus condiciones de confort y producción. (Ley Orgánica de Eficiencia Energética, 2019)

Para el desarrollo del presente estudio se requiere tener en consideración diferentes estándares y normas internacionales las cuales se describen a continuación:

- Norma ISO50001.- Para proponer una respuesta eficiente a los efectos del cambio climático y las mejoras requeridas en cuanto al apropiado consumo energéticos la ONUDI (Organización de las Naciones Unidas para el Desarrollo Industrial) solicitó a la ISO (Organización Internacional de Normalización), el desarrollo de una normativa estándar para la regulación de la gestión del consumo energético, este estándar se denominó ISO 50001; por medio de la aplicación de este estándar una organización, empresa o industria es capaz de reducir sus emisiones de CO₂ y mejorar otros aspectos ecológicos relacionados a la contaminación mientras que se optimiza la gestión del consumo energético y se reducen los costos de facturación. La Norma ISO 50001 es una pauta que orienta a las organizaciones a comprender y administrar el uso de la energía eléctrica, aprovechando al máximo las estrategias contemporáneas que presentan los mejores resultados alrededor del mundo. Para ello se requiere implementar un SGE (Sistema de Gestión de la Eficiencia), lo cual consiste en definir el accionar los procedimientos para realizar una mejora continua del consumo energético dentro de una organización, así como de los protocolos de prevención y mitigación de impacto ambiental. La Norma ISO 50001 presenta como propuesta un SGE que les permite a las organizaciones la aplicación de procedimientos y métodos necesarios para establecer mejoras en su desempeño de su consumo energético por medio de accionares objetivos sustentados en los registros de consumo y parámetros de eficiencia energética. Es importante mencionar que la ISO 50001, no establece valores límite o parámetros de la eficiencia energética, sino que provee de métodos para la gestión del consumo de energía para un sistema de mejora continuo. (ISO 50001, 2018)

- IEEE 519.- En la presente norma se establecen los límites aceptables de distorsión armónica (THD), para niveles de distribución, esto significa para redes de consumo menores a 1 kV, la distorsión armónica máxima permitida es de 8%, mientras que para ondas armónicas individuales son del 5%. Un elevado porcentaje de distorsión armónica presentan grandes complicaciones en los sistemas de energía eléctrica, estos sistemas por lo general cuentan con convertidores trifásicos conectados a la red, los cuales inyectan armónicos a la red, como por ejemplo son los laboratorios de cómputo, hornos, centrales de aire acondicionado, sistemas de generación de energía renovables, motores de velocidad variable. (IEEE-519, 2014)

Tabla 1.1 Límites de distorsión armónica según la norma IEEE-519

| Nivel de Voltaje | Armónica individual (%) | THD (%) |
|---------------------------|-------------------------|---------|
| Bajo Voltaje | 5.0 | 8.0 |
| Medio Voltaje | 3.0 | 5.0 |
| Alto Voltaje (Grupo 1) | 1.5 | 2.5 |
| Alto Voltaje (Grupo 2) | 1.0 | 1.5 |

Fuente: (IEEE-519, 2014)

- Norma IEC 6100032.- Esta norma corresponde a los límites establecidos para las emisiones de corriente armónica, para equipos cuya entrada de corriente por fase es menor o igual a 16 A. (IEC 61000-3-2, 2005)

Para equipos de clase B se aplican los valores detallados a continuación:

Tabla 1.2 Límites de corriente armónica según la norma IEC 6100032

| Orden armónico h | Corriente armónica Máxima permitida (A) |
|---------------------|--|
| Armónicos Impares | |
| 3 | 2.30 |
| 4 | 1.14 |
| 7 | 0.77 |
| 9 | 0.40 |
| 11 | 0.33 |
| 13 | 0.21 |
| $15 \leq h \leq 39$ | 0.25/h |
| Armónicos pares | |
| 2 | 1.08 |
| 4 | 0.43 |
| 6 | 1.84/h |
| $8 \leq h \leq 40$ | 1.84/h |

Fuente: (IEC 61000-3-2, 2005)

La mención de aquellas normas permite a los investigadores contemplar el panorama legal y regulatoria bajo el cual se debe desarrollar el modelo de solución propuesto, puesto que al tener en cuenta los estándares nacionales e internacionales que son aplicados con el propósito de cumplir con el consumo responsable y de calidad de la energética por parte de los grandes consumidores es más factible orientar la búsqueda de resultados a los objetivos propuestos por los investigadores.

CAPÍTULO 2

2. METODOLOGÍA

2.1 Estado de la calidad de energía en ESPOL

2.1.1 Cargas no lineales presentes en las edificaciones

Cruz & Valderde (2022), realizaron un dimensionamiento en cada edificación del campus de la universidad, donde las cargas no lineales se presentan a continuación:

Tabla 2.1 Cargas no lineales presentes en el campus de la ESPOL

| EDIFICACIÓN | | CARGAS NO LINEALES | | | | |
|-------------|--------------------|--------------------|------------------------|-----|---------------|--------------------------|
| Bloque | Descripción | Máquinas Fax | Grandes fotocopiadoras | UPS | Rack de datos | Conjunto de computadoras |
| 1A | CTI | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ |
| 5B | Sala de profesores | ✓ | ✓ | | ✓ | ✓ |
| 12G | Aulas FIMCP | | | | ✓ | ✓ |
| 12H | Laboratorios FIMCP | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | |
| 6A | Rectorado | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ |
| 11C | Laboratorios FIEC | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ |
| 11D | Aulas FIEC vieja | ✓ | | | ✓ | ✓ |
| 11A | Aulas FIEC | | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ |
| 13N | CEMA | ✓ | ✓ | | ✓ | ✓ |

Fuente: Elaborado por el autor

2.1.2 Edificios con mayor presencia de armónicos

Las mediciones fueron realizadas en base a términos de; tensión, corriente, potencia, energía activa y reactiva, para de los 83 medidores. Por lo tanto, para el caso de estudio se seleccionaron los siguientes medidores repartidos en el campus.

Tabla 2.2 Medidores con alta presencia de armónicos en el campus

| Medidor | Ubicación | Tipo | VL [V] | Pt [kW] | I [A] | INL [A] | IL [A] | % INL |
|-----------------|----------------|----------------|--------|---------|--------|---------|--------|-------|
| MQTT-RECTORADO | 6A | Administrativo | 230 | 120,55 | 524,13 | 157,24 | 366,89 | 30 |
| MQTT-BIBLIO_PRI | 7B | Administrativo | | 110,34 | 479,74 | 167,91 | 311,83 | 35 |
| MQTT-FIEC | 11C/11D/11A | Facultad | | 33,30 | 144,78 | 72,39 | 72,39 | 50 |
| MQTT-LAB-STR | 11C | Laboratorio | | 8,30 | 36,09 | 21,65 | 14,44 | 60 |
| MQTT-FIMCP | 2A/12G/12H/12I | Facultad | | 51,20 | 222,61 | 100,17 | 122,44 | 45 |

Fuente: Elaborado por el autor

Como se observa en la tabla anterior, se tiene 5 medidores considerados como caso de estudio, donde se tiene el bloque, tipo de edificio, voltaje, potencia activa, corriente total, corriente lineal, corriente no lineal su porcentaje. Cabe recalcar que, estos parámetros son añadidos en el modelo de MATLAB-Simulink, en la carga no lineal del edificio.

2.2 Fundamentos para el diseño del Filtro

2.2.1 Criterios de selección de diseño

Para el presente caso de estudio se realizó la implementación de un filtro activo de potencia en los medidores de bajo costo que se utilizan en el campus de ESPOL ya que, a diferencia de un filtro pasivo, estos se adaptan a diferentes ordenes de armónicos, debido a las cargas no lineales presentes en la universidad, entonces se requiere un método que cuente con la mejor adaptabilidad, mientras que el filtro activo propuesto será en derivación (conexión paralelo), dado que es el tipo de filtro que según lo antecedentes literarios propone resultados más efectivos. Otro parámetro es la factibilidad de implementación, ya que se requieren fundamentos que demuestren un incremento en la calidad del consumo de la energía y a su vez reduzcan los costos de facturación. El último aspecto es la contribución al entorno social, bajo la premisa de que la optimización en la calidad del consumo reduzca la huella de carbono. Sin embargo, el modelo propuesto debe encajar con todos los parámetros descritos para establecer una solución a la problemática que presente la mayor cantidad de beneficios.

Para el modelo del filtro se aplicó el software Matlab-Simulink, debido a que es una herramienta computacional con múltiples funciones que se adapta

a los requerimientos de la propuesta de solución. Para el diseño del modelo se tomó como referencia el filtro trifásico de potencia a 50 Hz del Dr. Rajesh Farswan (2022).

2.2.2 Teoría De Potencia Reactiva Instantánea

La teoría de potencia reactiva instantánea también conocida como “Teoría P-Q” fue introducida por primera vez en el año 1983 por el científico H. Akagi, cuyo método revoluciono los filtros armónicos de potencia en la época; la presente teoría consiste en una conversión de un sistema trifásico de tensión y corriente a un sistema de datos de dos fases aplicando la transformada de Clarke, en la cual el sistema de las fases “a, b, c” se convierte en un sistema en el plano α - β .

En las ecuaciones a continuación se presenta la expresión del modelo matemático utilizada para realizar el cambio en el sistema.

$$\begin{bmatrix} V_\alpha \\ V_\beta \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & \frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$\begin{bmatrix} I_\alpha \\ I_\beta \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & \frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix} \quad (2)$$

De acuerdo con la teoría D-Q, en un sistema trifásico balanceado en el cual, se considera que la componente cero de la tensión y la corriente es despreciable, la potencia activa y reactiva puede ser expresada de la siguiente manera:

$$\begin{aligned} p &= V_\alpha I_\alpha + V_\beta I_\beta \\ q &= V_\alpha I_\beta - V_\beta I_\alpha \end{aligned} \quad (3)$$

Por lo que la corriente puede expresarse como se detalla a continuación

$$\begin{bmatrix} I_{c\alpha} \\ I_{c\beta} \end{bmatrix} = \frac{1}{V_\alpha^2 + V_\beta^2} \begin{bmatrix} V_\alpha & -V_\beta \\ V_\beta & V_\alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p \\ q \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$\begin{bmatrix} I_{ca} \\ I_{cb} \\ I_{cc} \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -1/2 & \sqrt{3}/2 \\ -1/2 & -\sqrt{3}/2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{\alpha} \\ I_{\beta} \end{bmatrix} \quad (5)$$

La teoría explica que la potencia reactiva instantánea se debe al flujo de energía entre fases, el cual no representa el flujo de potencia desde la fuente hacia la carga. En caso de que la potencia reactiva sea compensada entonces las componentes armónicas de la corriente reactiva serán eliminadas. Los componentes α y β son llevadas de vuelta al sistema original de 3 fases para volver a ser inyectados en la línea.

2.2.3 Aplicación de la Teoría D-Q

Para el desarrollo de la aplicación de la teoría D-Q se requiere hacer uso de la “teoría de la transformada de Park”, en la cual la resultante del voltaje y corriente se mantienen constantes mientras el plano α - β se rota de tal forma que el eje conformado por estas se convierte en un eje rotacional conformado por las componentes D-Q.

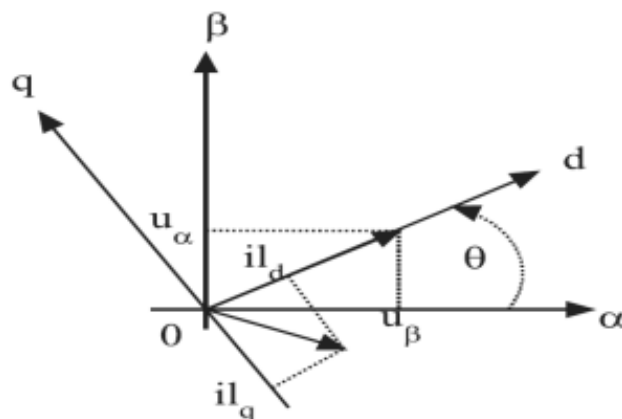


Figura 2.1 Diagrama vectorial de la Transformada de Clarke y Park

Fuente: (Naim & Tawfiq, 2020)

$$\begin{bmatrix} I_D \\ I_Q \end{bmatrix} = \sqrt{\left(\frac{2}{3}\right)} \begin{bmatrix} \cos \theta & \sin \theta \\ -\sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix} \quad (6)$$

Las Corrientes I_D e I_Q contienen una componente de corriente continua y una componente de tiempo variable de corriente alterna. La componente AC es la responsable de inyectar armónicos a la red. Mediante el filtro de armónicos se es posible descomponer la componente DC y luego manipular la corriente AC para generar una puerta de pulsos por la cual se inyectará la corriente de compensación en la línea de la carga.

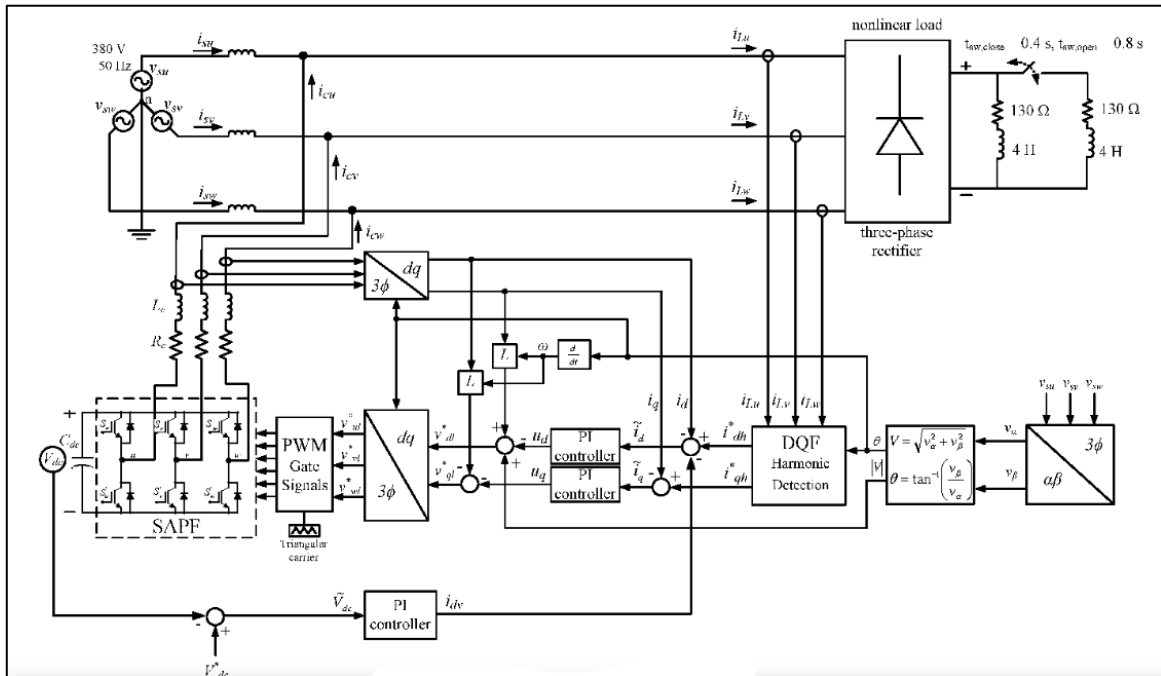


Figura 2.2 Diagrama de bloques para diseño del filtro activo basado en la Teoría D-Q

Fuente: (Santipraban & Areerak, 2011)

2.3 Interconexión del Filtro Activo a ESPOL

A continuación, se muestra el filtro de potencia en derivación propuesto, conectado al sistema eléctrico de potencia trifásico en ESPOL, diseñado en la plataforma web de acceso libre Lucidchart.

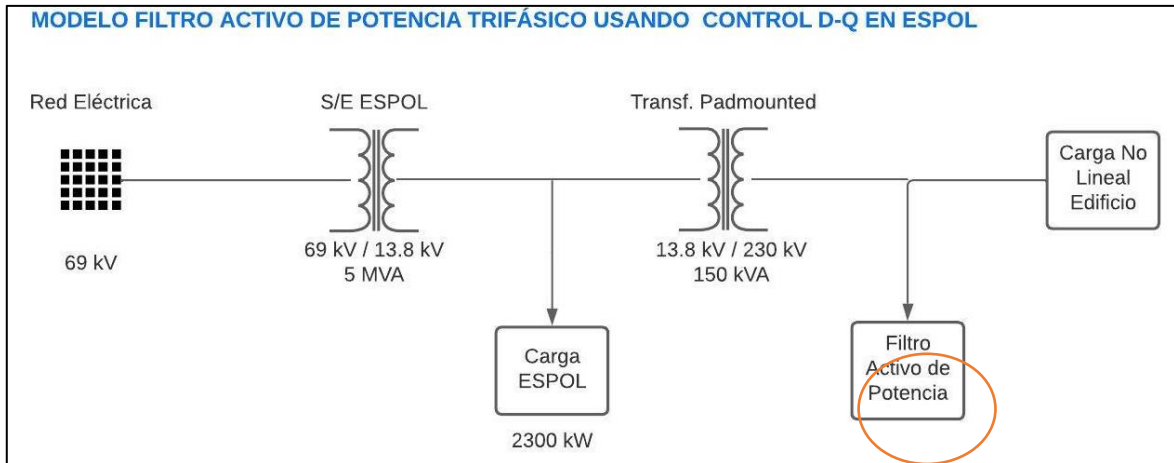


Figura 2.3 Sistema eléctrico de Potencia en ESPOL

Fuente: Elaborado por el autor

La *red eléctrica* corresponde al sistema de distribución, el cual se conecta a la subestación ESPOL por medio de una línea de 5 km. Lo antes mencionado, se fue recopilado en la página web de acceso libre Geoportal CNEL EP.

S/E ESPOL, corresponde a una subestación reductora que está ubicada al frente de la Oficina de Admisiones ESPOL y posee una capacidad de 5 MVA (véase en el APÉNDICE E).

Carga ESPOL, fue considerada a una demanda de 2300 kW, esto de acuerdo con un promedio realizado mes a mes de la facturación electrónica de la empresa CNEL EP Guayaquil para el mes de Julio 2022, la cual se encuentra adjuntada en el APÉNDICE G.

Transformador Padmounted, reduce la tensión a 230 V para luego alimentar a múltiples edificios, posee una capacidad de 150 kVA.

Carga No Lineal, corresponde a un equivalente de los equipos que inyectan armónicos a la red para los edificios del campus. Cabe recalcar que este tipo de cargas se encuentran en la Tabla 2.1.

2.4 Modelo de Filtro Activo conectado a ESPOL en Software

2.4.1 Primer Caso de estudio

Para este primer escenario, se presenta el sistema eléctrico de potencia trifásico sin el filtro activo de potencia en derivación.

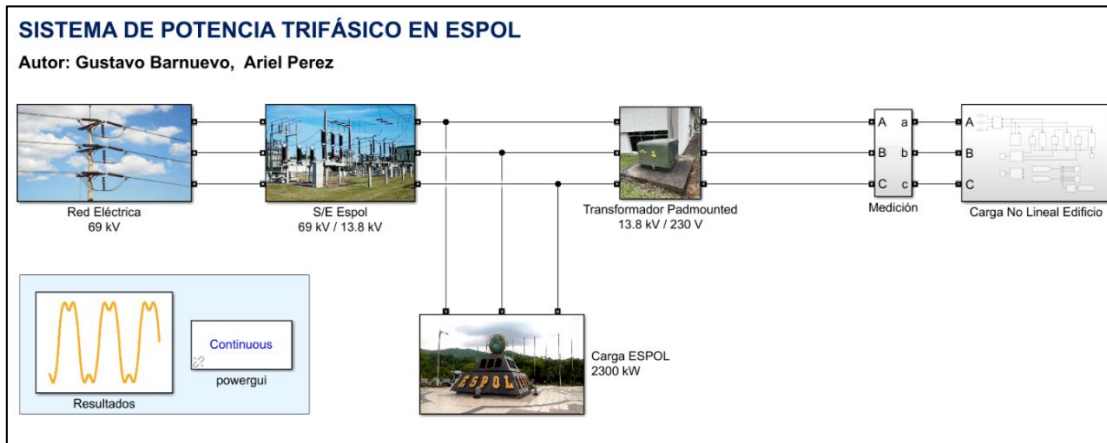


Figura 2.4 SEP del primer caso en Matlab-Simulink

Fuente: Elaborado por el autor

2.5.2 Segundo Caso de estudio

Para este segundo escenario, se presenta el sistema eléctrico de potencia trifásico conectado al filtro activo de potencia en derivación.

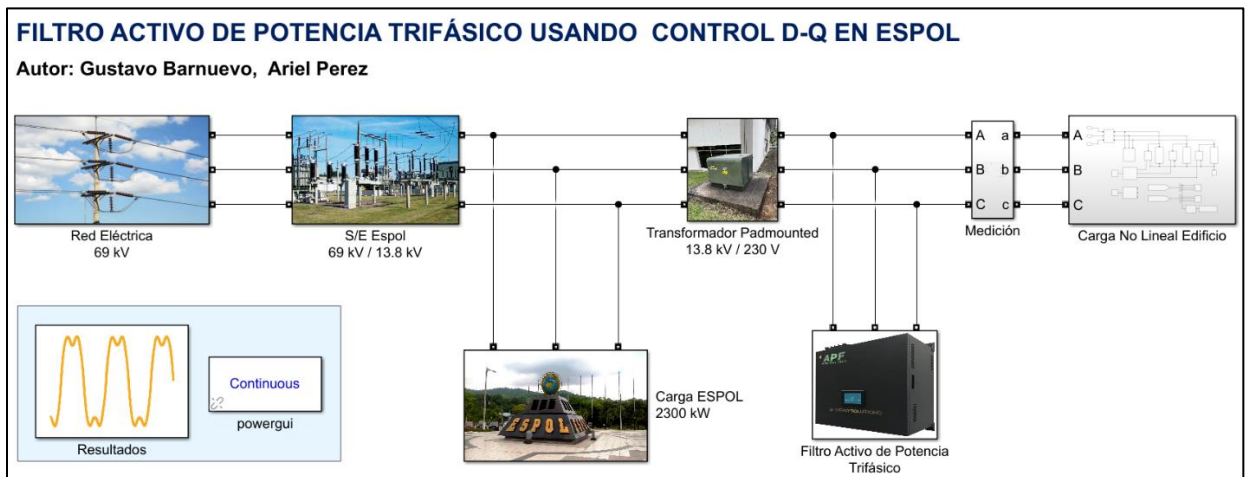


Figura 2.5 SEP del segundo caso en Matlab-Simulink

Fuente: Elaborado por el autor

A continuación, se visualiza el interior del subsistema del Filtro Activo de Potencia Trifásico, conectado en paralelo al SEP.

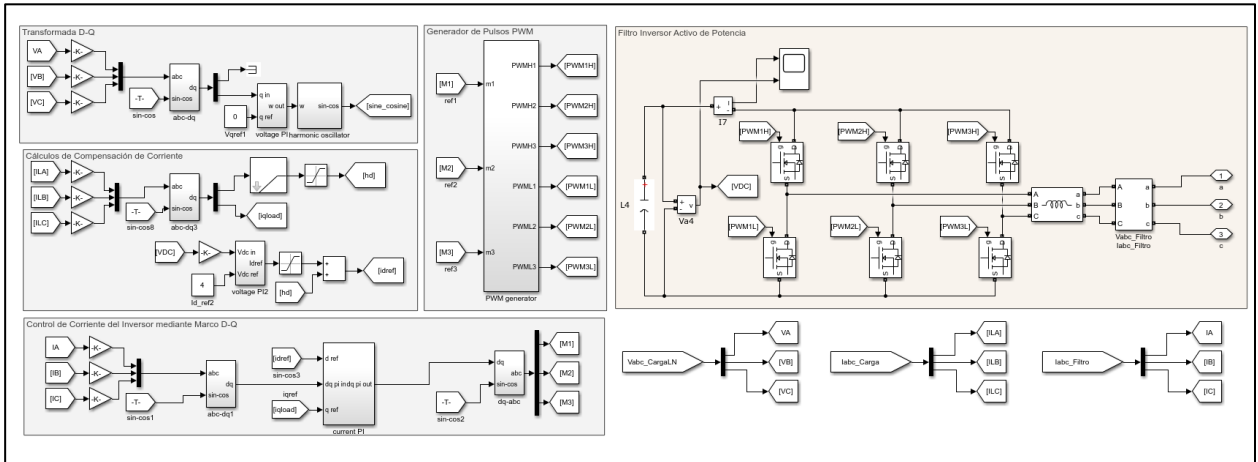


Figura 2.6 Filtro Activo de potencia propuesto (Farswan, 2022)

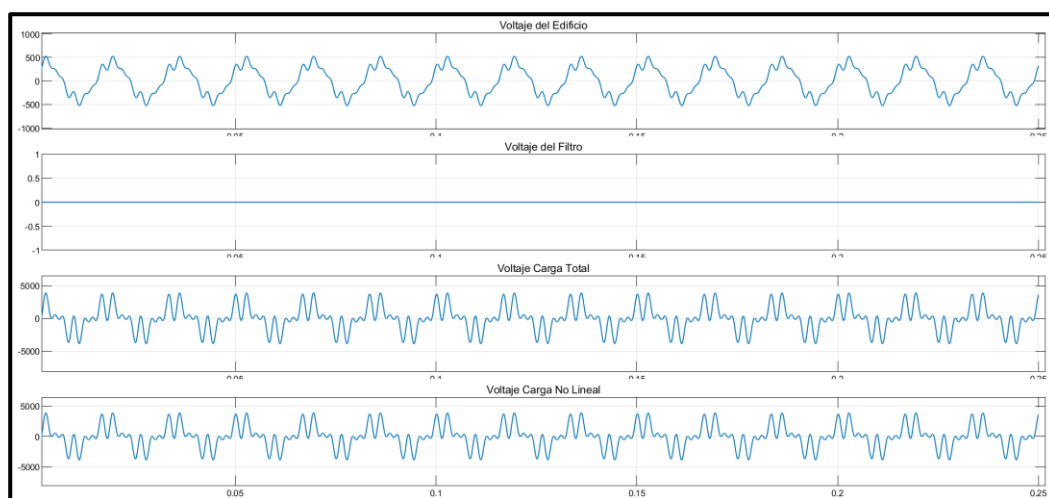
Fuente: Elaborado por el autor

CAPÍTULO 3

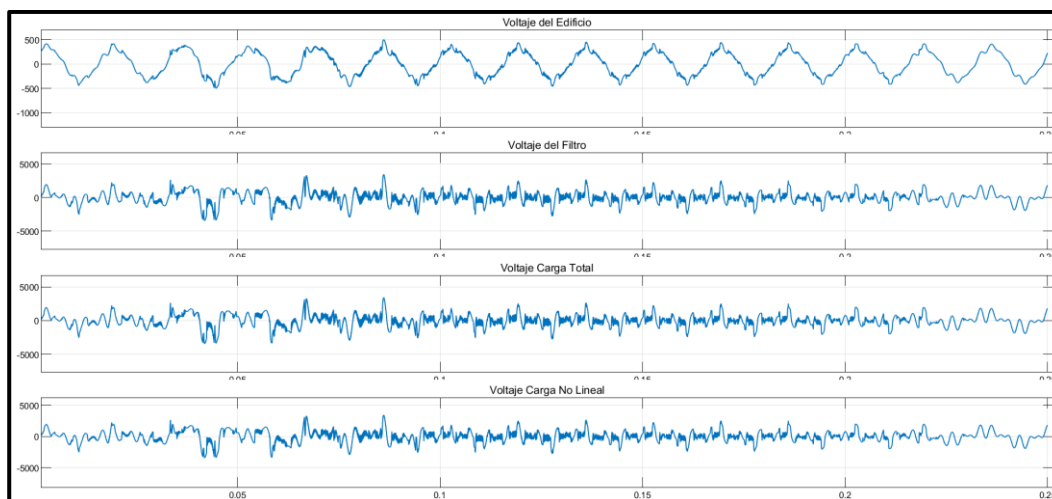
3. RESULTADOS Y ANÁLISIS

Para la simulación, se utilizó un computador con un procesador Intel™ Core™ i7-1065G7 CPU @ 1.30GHz 1.50 GHz, con una memoria RAM de 16,0 GB, donde el tiempo de simulación por cada edificio fue en un rango de 1 minuto 21 segundos a 2 min 9 s.

3.1 Edificio Rectorado (Bloque 6A)



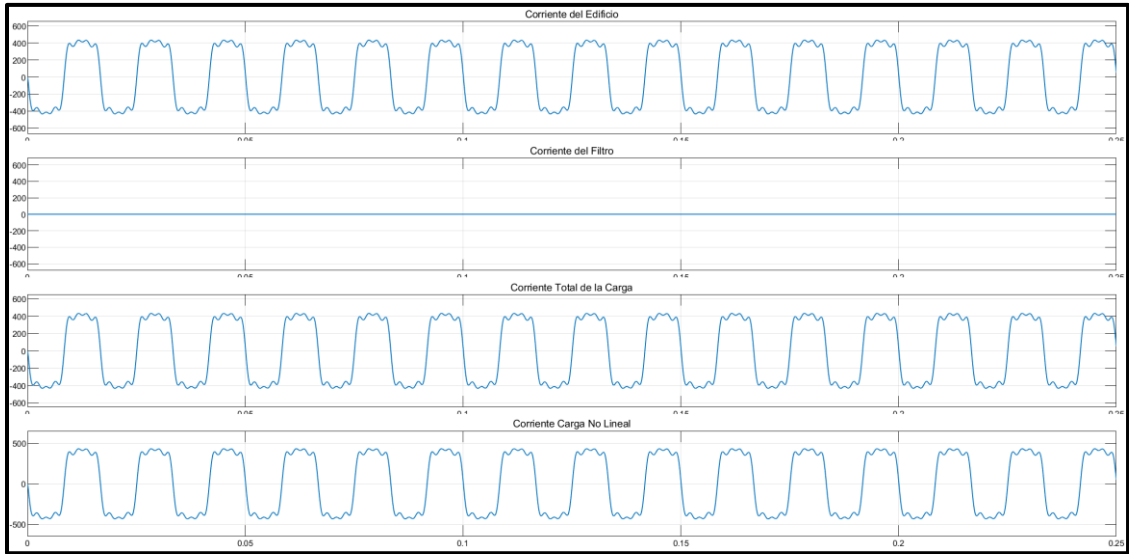
(a)



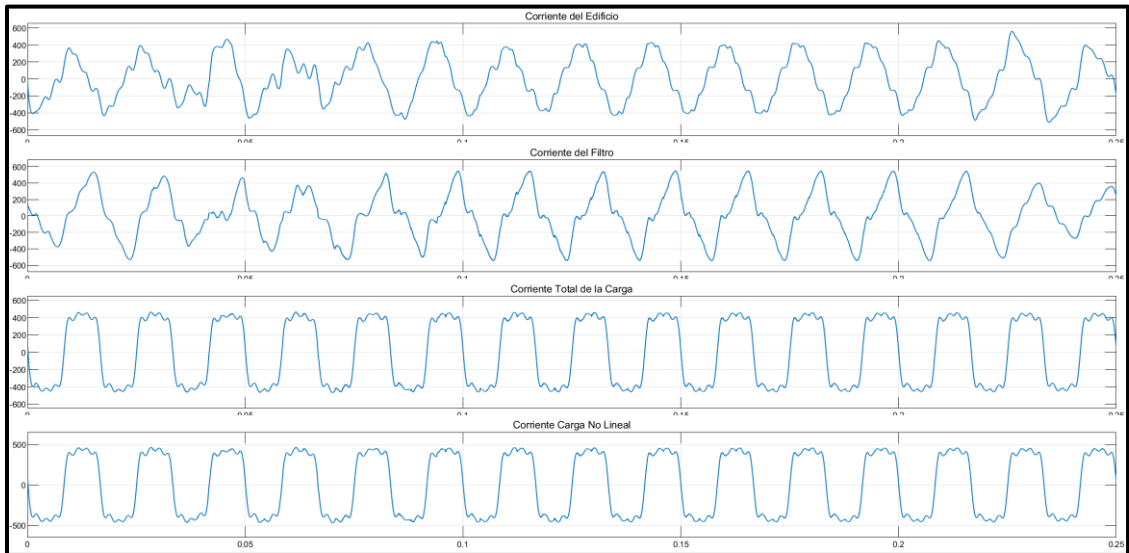
(b)

Figura 3.1 Señales de voltaje RECTORADO sin filtro activo (a)

Señales de voltaje RECTORADO con filtro activo (b)



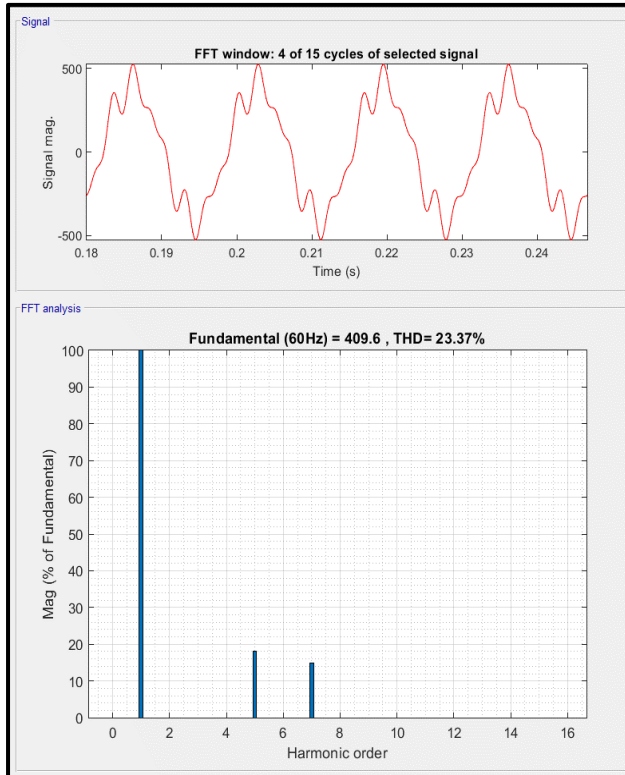
(a)



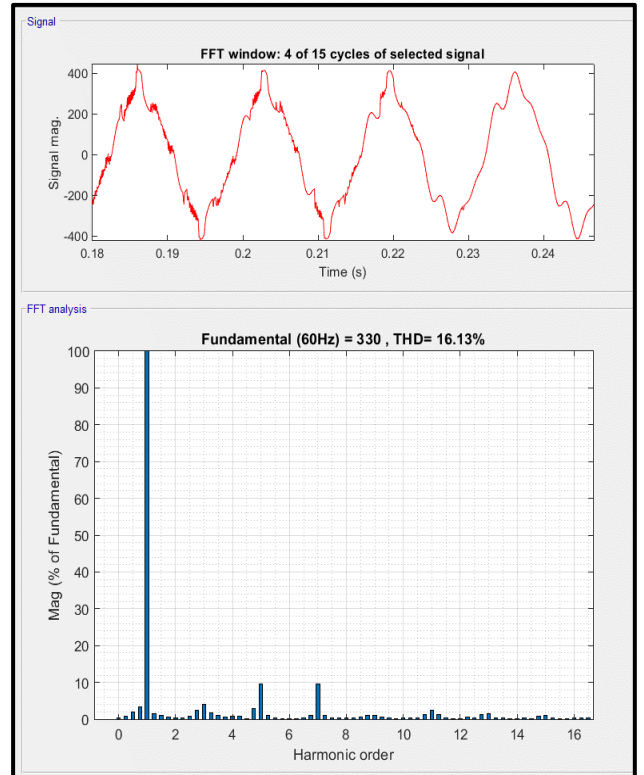
(b)

Figura 3.2 Señales de corriente RECTORADO sin filtro activo (a)

Señales de corriente RECTORADO con filtro activo (b)

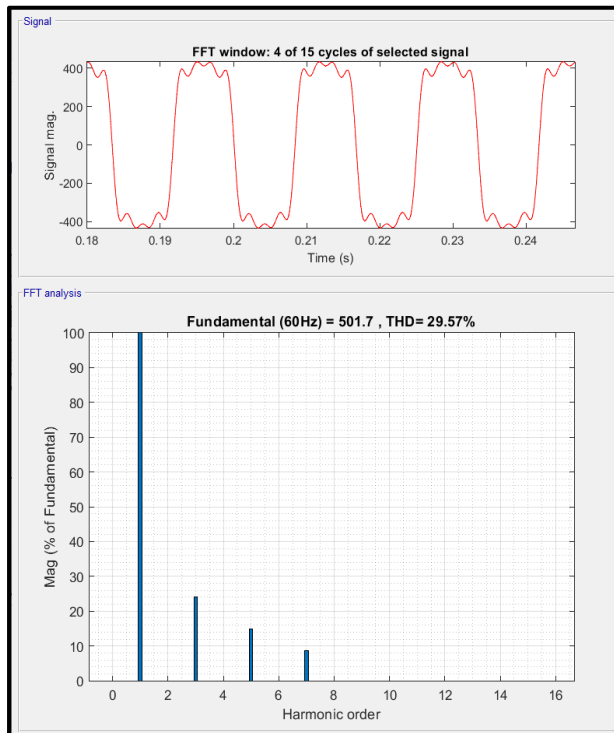


(a)

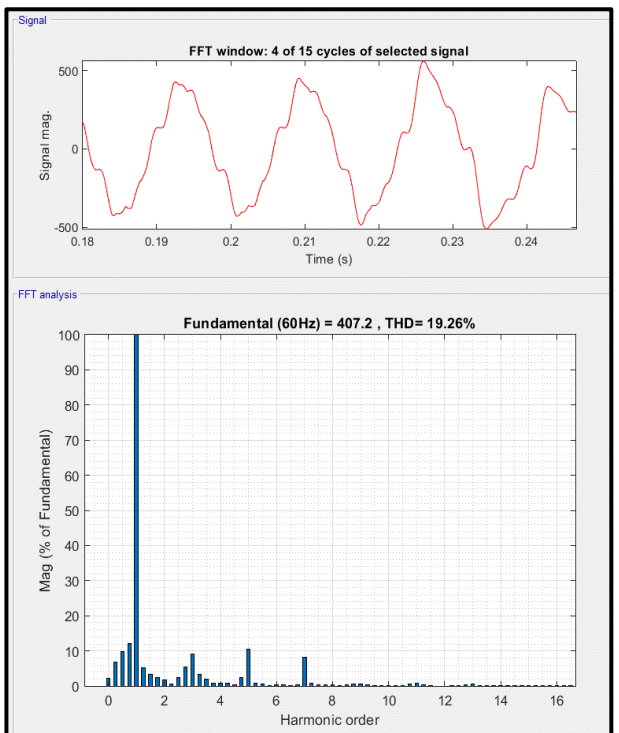


(b)

Figura 3.3 Espectro armónico de voltaje RECTORADO sin filtro activo (a)
 Espectro armónico de voltaje RECTORADO con filtro activo (b)



(a)



(b)

Figura 3.4 Espectro armónico de corriente RECTORADO sin filtro activo (a)
 Espectro armónico de corriente RECTORADO con filtro activo (b)

Tabla 3.1: Comparación de resultados RECTORADO

| Edificio | RECTORADO | |
|------------------------------|-----------|----------|
| | 1 | 2 |
| Voltaje del edificio [V] | 297,4278 | 252,1549 |
| Voltaje del Filtro [V] | 0 | 986,38 |
| Voltaje de la carga [V] | 1847,7024 | 986,38 |
| Corriente del edificio [A] | 369,964 | 297,1068 |
| Corriente del Filtro [A] | 0 | 197,9707 |
| Corriente de la carga [A] | 369,964 | 379,4972 |
| Potencia activa [kW] | 84,8588 | 40,8333 |
| Potencia reactiva [kVA] | 211,2021 | 79,3721 |
| Costo diario de consumo [\$] | 115,408 | 55,5332 |
| THDv | 23,37 | 16,13 |
| THDi | 29,57 | 19,26 |

Fuente: Elaborado por el autor

Los resultados presentados en la tabla 3.1, corresponden a la respuesta del sistema propuesto bajo las condiciones de los casos de estudio, para el primer caso se obtiene que el edificio del rectorado consume en potencia activa 84.8588 kW, lo cual representa una facturación diaria de \$ 115.40 USD con un porcentaje de distorsión armónica de voltaje de 23.37 % y de corriente de 29.57 %. Una vez aplicado el filtro al sistema para el segundo caso de estudio, la demanda de potencia activa se reduce a 40.8333 kW, mientras que la facturación disminuye a \$ 55.5332 USD diario, esto se traduce como una un ahorro en la facturación del 51.89 %. Por otro lado, en lo referente a los porcentajes de distorsión armónica tanto de voltaje como de corriente estos se reducen a un 16.13 % y 19.26 % respectivamente, sin embargo, el a pesar de que el armónico de voltaje se reduce un 30.98% no entra en los límites de la norma IEEE-519, esto es ocasionado por diversos factores como las consideraciones del modelo, dado que las simulaciones corresponden a un escenario en condiciones ideales de operación, donde la carga se encuentra operando a su máximo, además de que no se considera el consumo de diferentes elementos con carga reactiva, ya que en el Ecuador el consumo de potencia reactiva es subsidiado. /Es importante mencionar que la reducción de costos de facturación y porcentaje de distorsión armónica corresponden como una mejora en la calidad del consumo y aprovechamiento de la energía eléctrica.

3.2 Edificio Biblioteca (Bloque 7B)

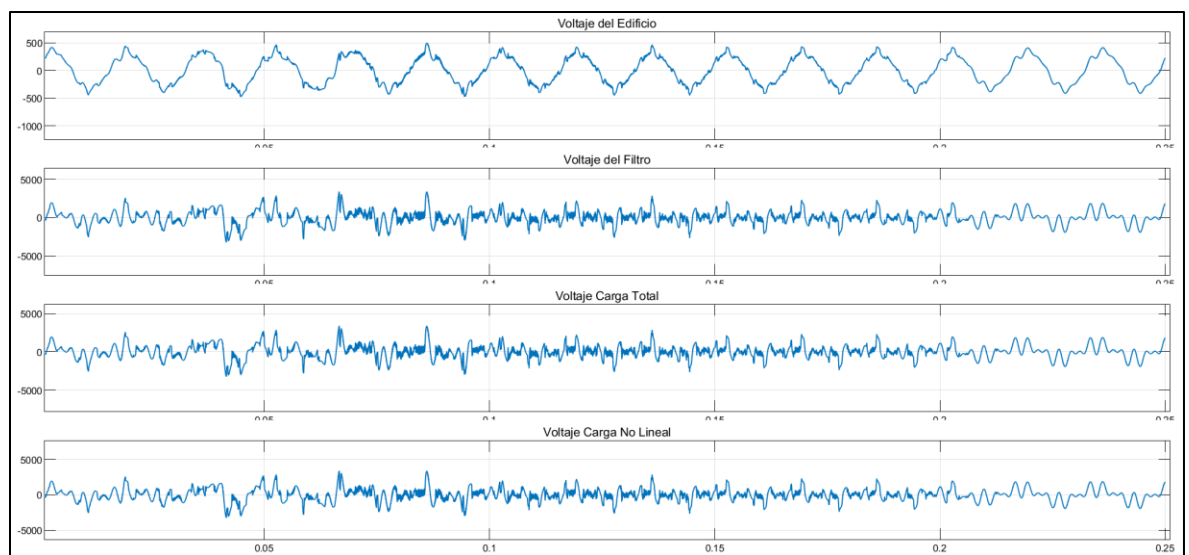
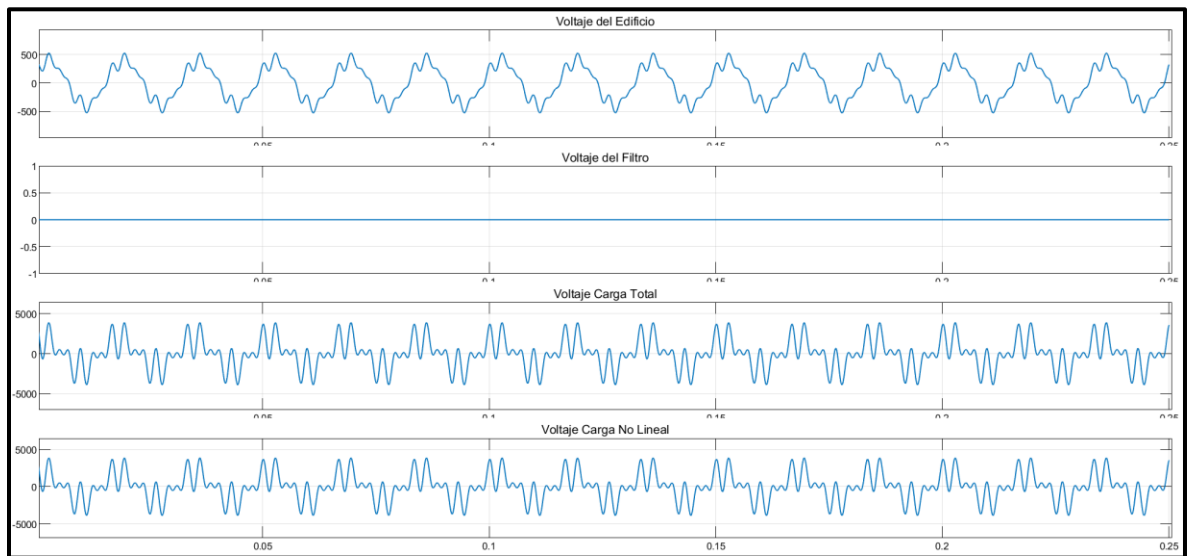
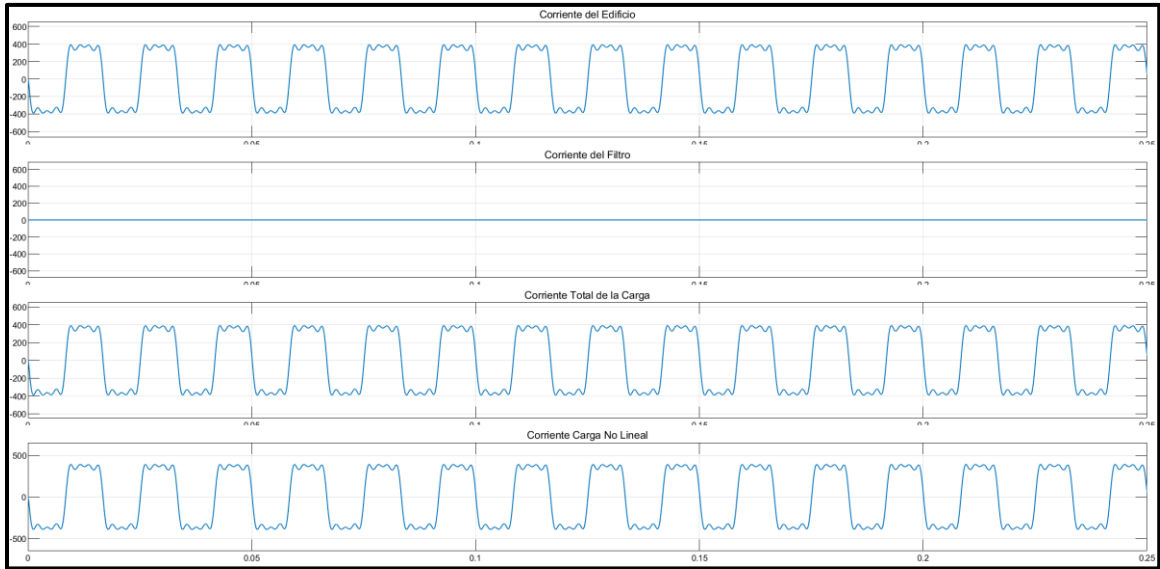
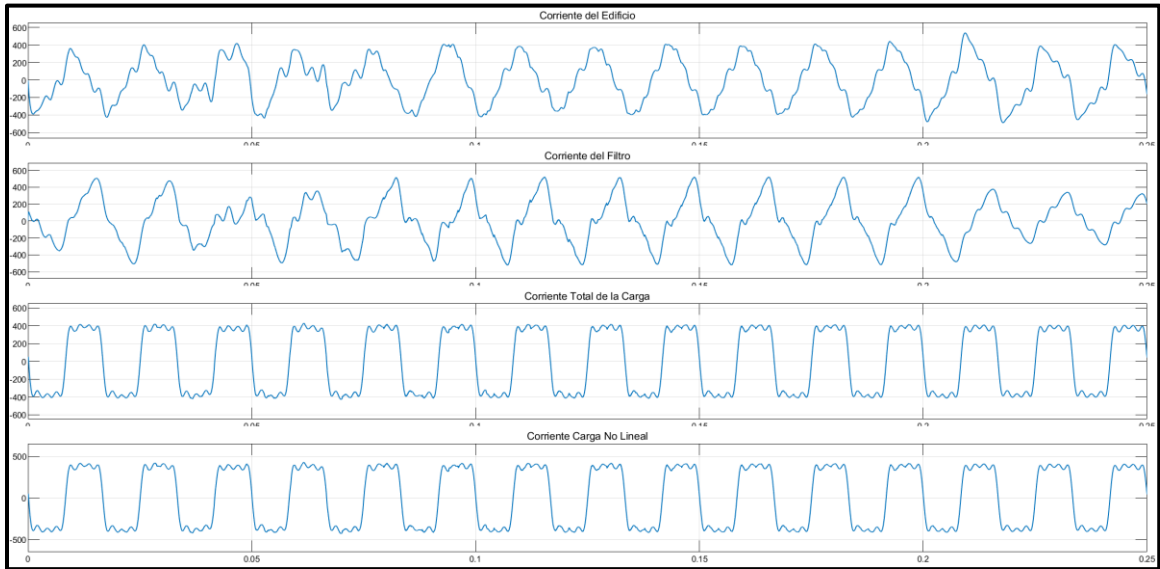


Figura 3.5 Señales de voltaje BIBLIOTECA sin filtro activo (a)

Señales de voltaje BIBLIOTECA con filtro activo (b)



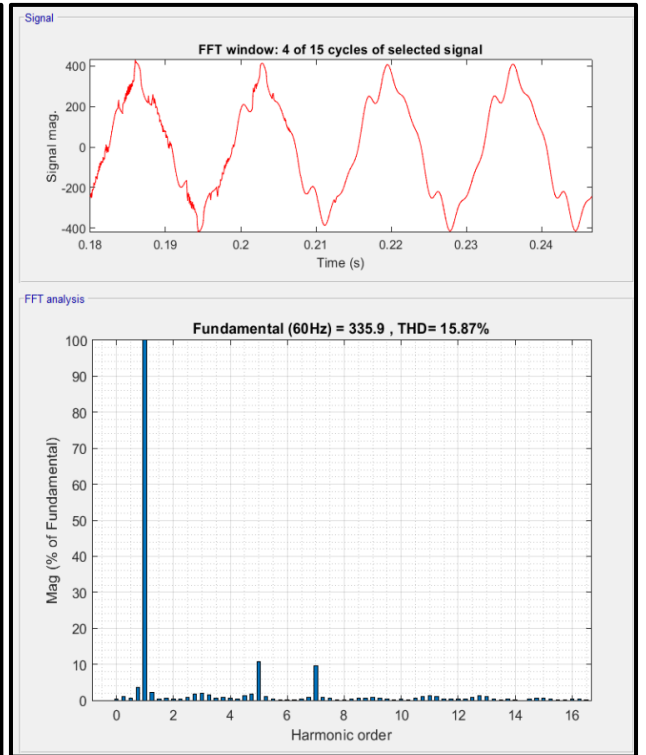
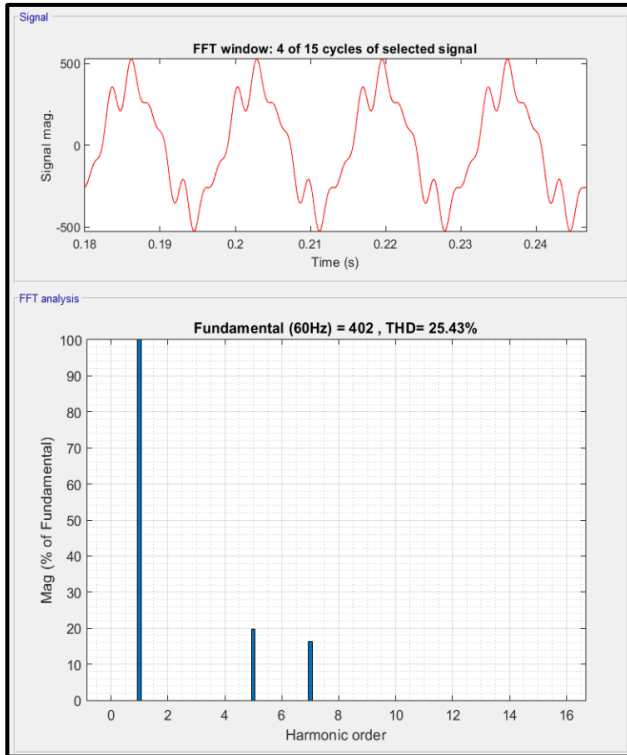
(a)



(b)

Figura 3.6 Señales de corriente BIBLIOTECA sin filtro activo (a)

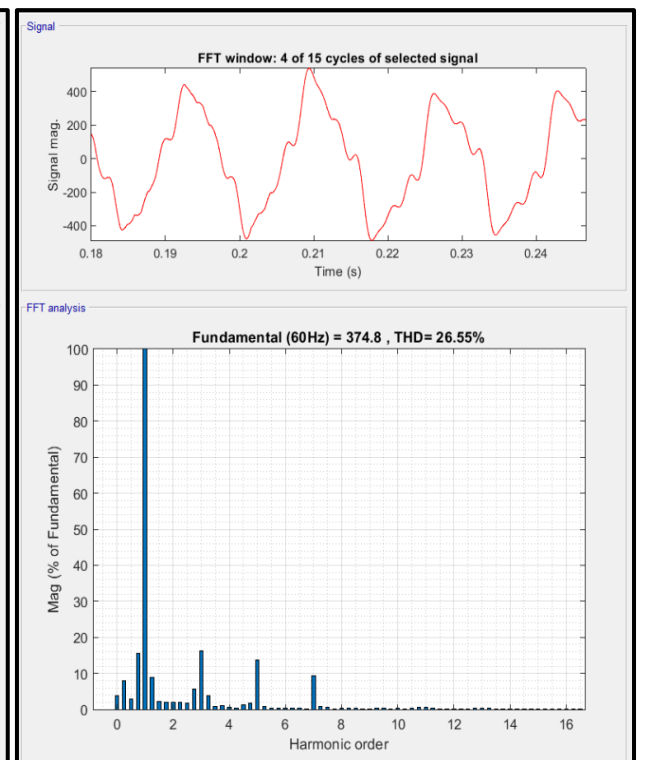
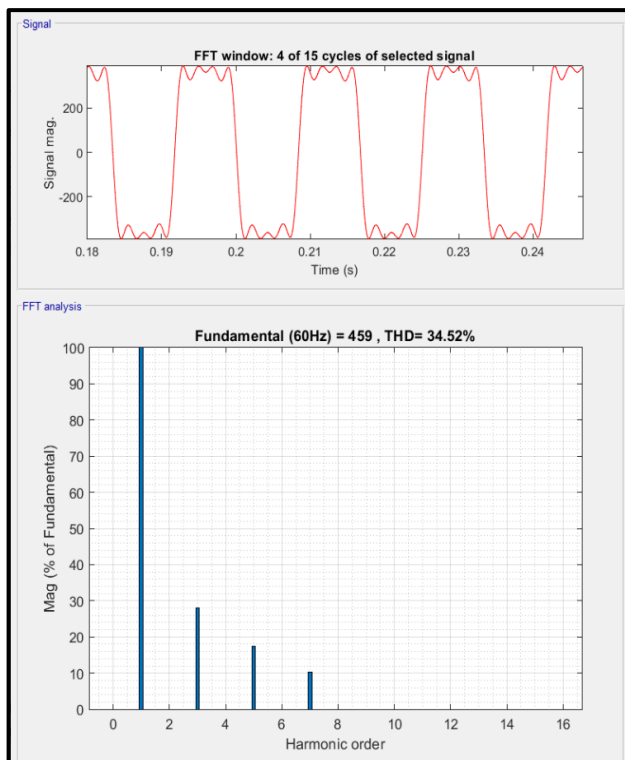
Señales de corriente BIBLIOTECA con filtro activo (b)



(a)

(b)

Figura 3.7 Espectro armónico de voltaje BIBLIOTECA sin filtro activo (a)
Espectro armónico de voltaje BIBLIOTECA con filtro activo (b)



(a)

(b)

Figura 3.8 Espectro armónico de corriente BIBLIOTECA sin filtro activo (a)
Espectro armónico de corriente BIBLIOTECA con filtro activo (b)

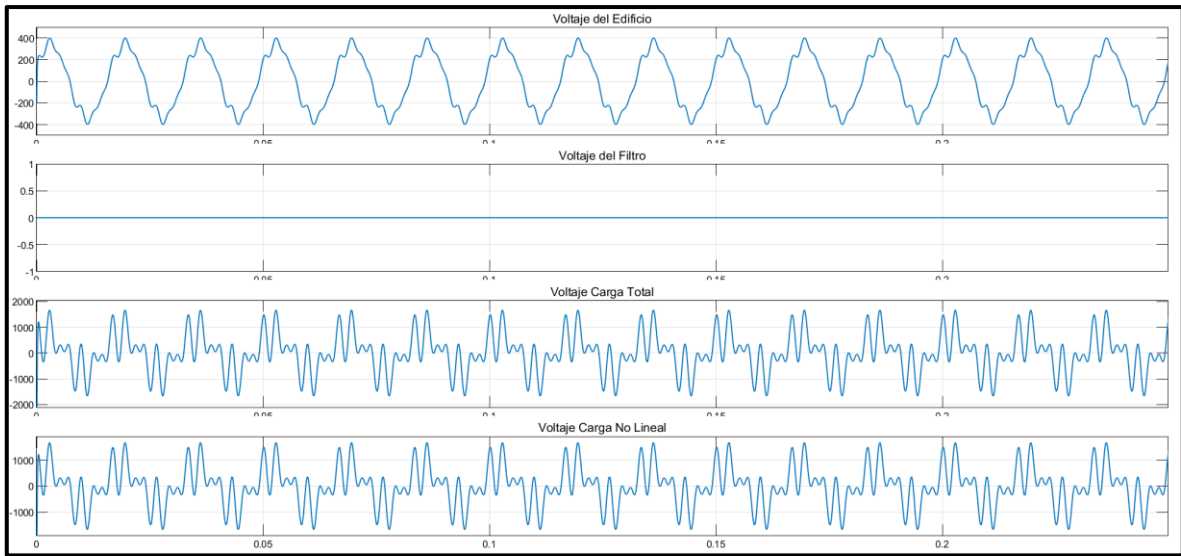
Tabla 3.2 Comparación de resultados BIBLIOTECA

| Edificio | BIBLIOTECA | |
|------------------------------|------------|----------|
| | 1 | 2 |
| Voltaje del edificio [V] | 293,2699 | 250,7839 |
| Voltaje del Filtro [V] | 0 | 901,4221 |
| Voltaje de la carga [V] | 1823,7493 | 901,4221 |
| Corriente del edificio [A] | 343,3365 | 269,891 |
| Corriente del Filtro [A] | 0 | 179,5899 |
| Corriente de la carga [A] | 343,3365 | 352,1209 |
| Potencia activa [kW] | 80,4236 | 34,5544 |
| Potencia reactiva [kVA] | 193,8515 | 71,6675 |
| Costo diario de consumo [\$] | 109,3761 | 46,994 |
| THDv | 25,43 | 15,87 |
| THDi | 34,52 | 26,55 |

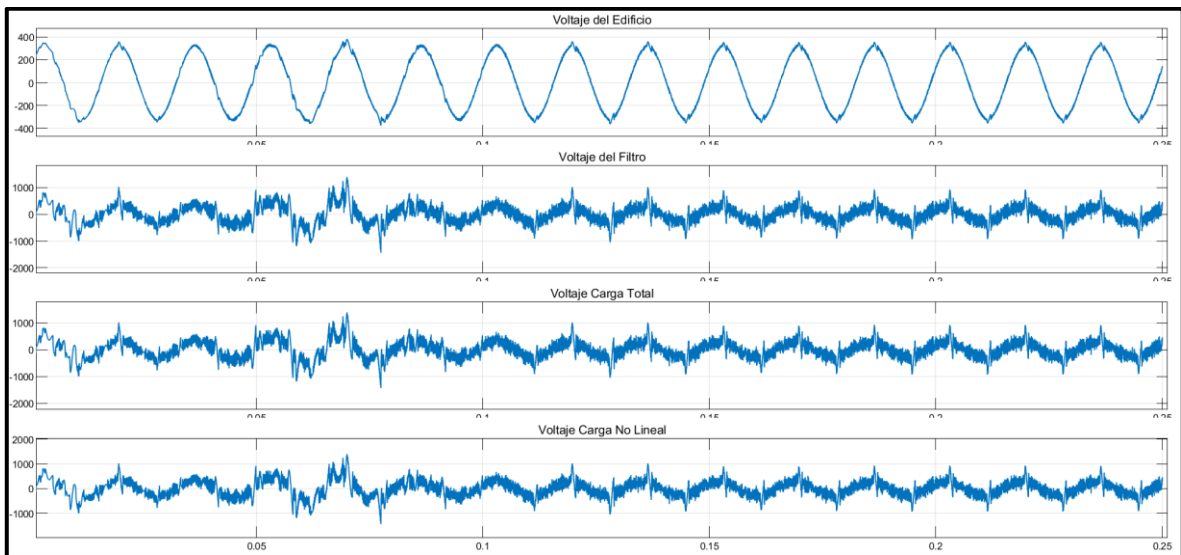
Fuente: Elaborado por el autor

Los resultados presentados en la tabla 3.2, corresponden a la respuesta del sistema propuesto bajo las condiciones de los casos de estudio, para el primer caso se obtiene que el edificio de biblioteca consume en potencia activa 80.4236 kW, lo cual representa una facturación diaria de \$ 109.3761 USD con un porcentaje de distorsión armónica de voltaje de 25.43 % y de corriente de 34.52 %. Una vez aplicado el filtro al sistema para el segundo caso de estudio, la demanda de potencia activa se reduce a 34.5544 kW, mientras que la facturación disminuye a \$ 46.994 USD diario, esto se traduce como una un ahorro en la facturación del 57.04 %. Por otro lado, en lo referente a los porcentajes de distorsión armónica tanto de voltaje como de corriente estos se reducen a un 15.87 % y 26.55 % respectivamente, sin embargo, el a pesar de que el armónico de voltaje se reduce un 37.60% no entra en los límites de la norma IEEE-519, esto es ocasionado por diversos factores como las consideraciones del modelo, dado que las simulaciones corresponden a un escenario en condiciones ideales de operación, donde la carga se encuentra operando a su máximo, además de que no se considera el consumo de diferentes elementos con carga reactiva, ya que en el Ecuador el consumo de potencia reactiva es subsidiado. /Es importante mencionar que la reducción de costos de facturación y porcentaje de distorsión armónica corresponden como una mejora en la calidad del consumo y aprovechamiento de la energía eléctrica.

3.3 Edificio FIEC (Bloque 11C/11D/11A)



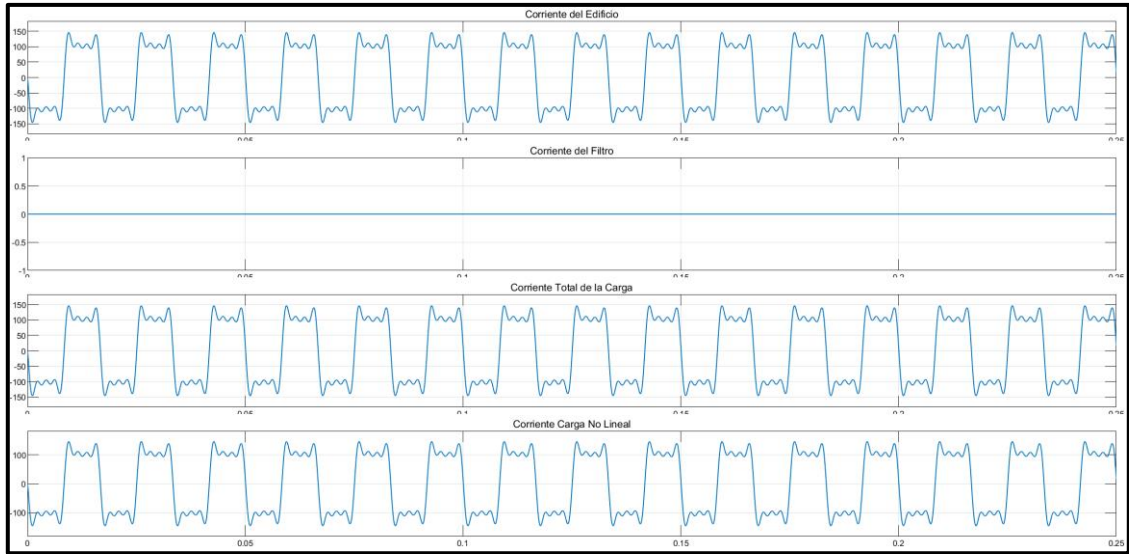
(a)



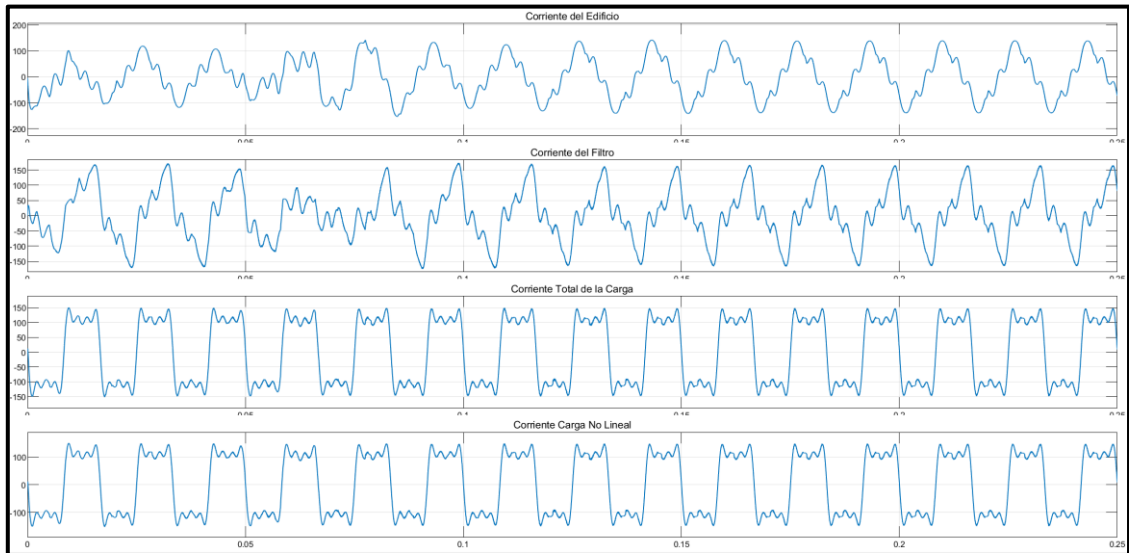
(b)

Figura 3.9 Señales de voltaje FIEC sin filtro activo (a)

Señales de voltaje FIEC con filtro activo (b)

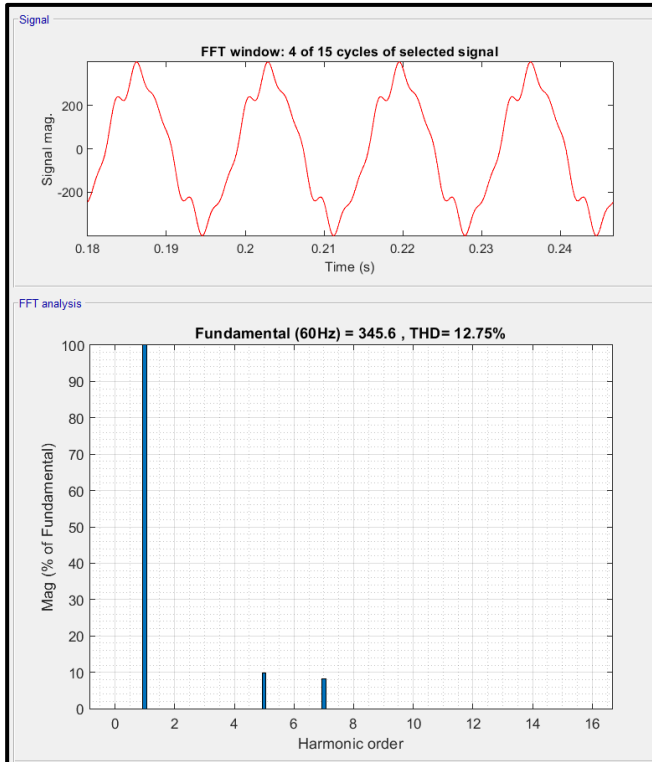


(a)

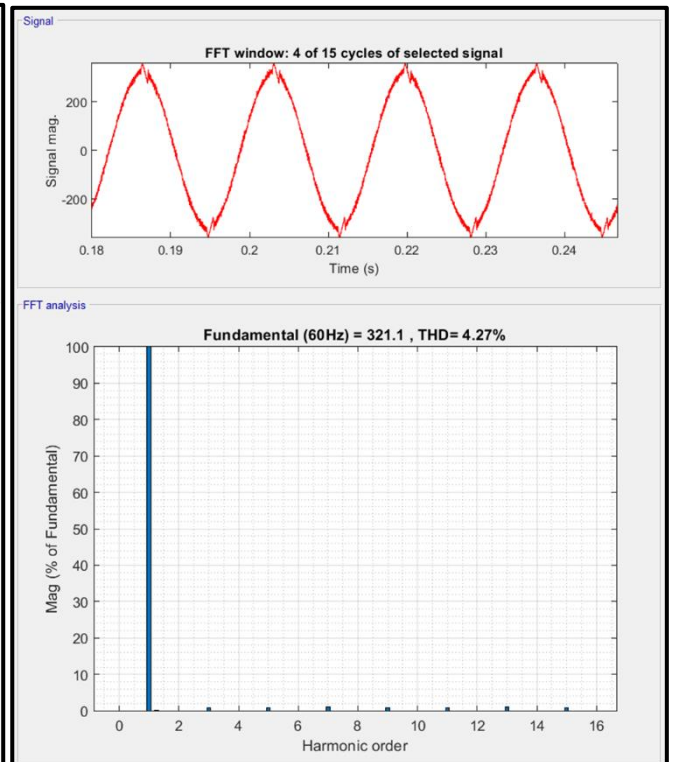


(b)

Figura 3.10 Señales de corriente FIEC sin filtro activo (a)
Señales de corriente FIEC con filtro activo (b)



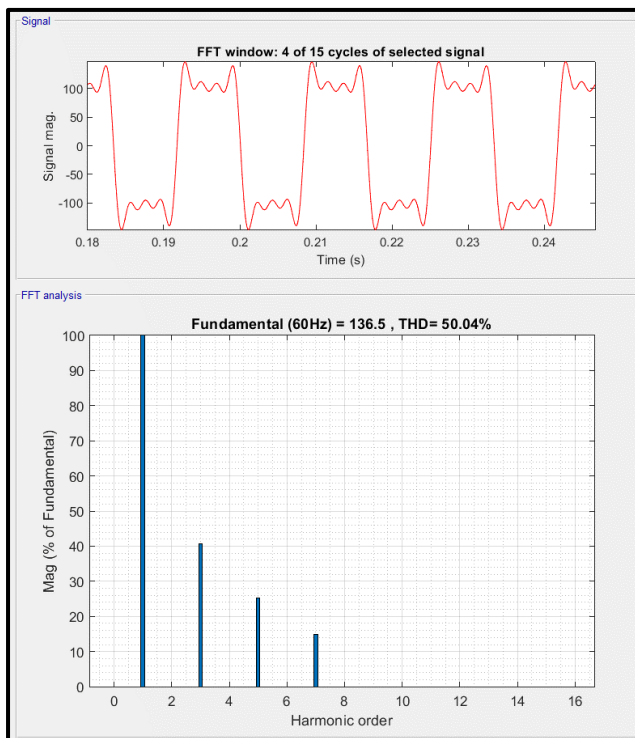
(a)



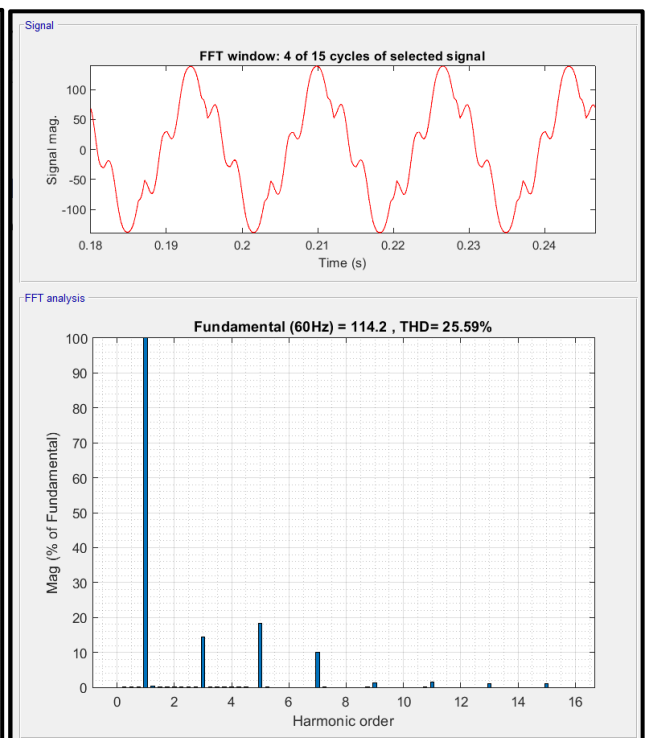
(b)

Figura 3.11 Espectro armónico de voltaje FIEC sin filtro activo (a)

Espectro armónico de voltaje FIEC con filtro activo (b)



(a)



(b)

Figura 3.12 Espectro armónico de corriente FIEC sin filtro activo (a)

Espectro armónico de corriente FIEC con filtro activo (b)

Tabla 3.3 Comparación de resultados FIEC

| Edificio | FIEC | |
|------------------------------|----------|----------|
| | 1 | 2 |
| Caso | | |
| Voltaje del edificio [V] | 246,3519 | 227,212 |
| Voltaje del Filtro [V] | 0 | 273,6828 |
| Voltaje de la carga [V] | 763,2215 | 273,6828 |
| Corriente del edificio [A] | 107,9198 | 83,351 |
| Corriente del Filtro [A] | 0 | 84,0412 |
| Corriente de la carga [A] | 107,9198 | 111,8458 |
| Potencia activa [kW] | 20,3425 | 14,9085 |
| Potencia reactiva [kVA] | 35,0344 | 2,9768 |
| Costo diario de consumo [\$] | 27,6658 | 20,2725 |
| THDv | 12,75 | 4,27 |
| THDi | 50,04 | 25,59 |

Fuente: Elaborado por el autor

Los resultados presentados en la tabla 3.3, corresponden a la respuesta del sistema propuesto bajo las condiciones de los casos de estudio donde se consideraron edificios administrativos, aulas y laboratorios en la Facultad de Ingeniería en Electricidad y Computación (FIEC), para el primer caso se obtiene que la facultad consume en potencia activa 20.3425 kW, lo cual representa una facturación diaria de \$ 27.6658 USD con un porcentaje de distorsión armónica de voltaje de 12.75 % y de corriente de 50.04 %. Una vez aplicado el filtro al sistema para el segundo caso de estudio, la demanda de potencia activa se reduce a 14.9085 kW, mientras que la facturación disminuye a \$ 20.2725 USD diarios, esto se traduce como un ahorro en la facturación del 26.73 %. Por otro lado, en lo referente a los porcentajes de distorsión armónica tanto de voltaje como de corriente estos se reducen a un 4.27 % y 25.59 % respectivamente, donde la reducción de la distorsión armónica es de voltaje y corriente es del 65.51% y 48.87%, estos valores se ajustan a las indicaciones que establece la ley bajo la norma IEEE-519 donde el porcentaje de armónicos de voltaje para grandes consumidores no debe superar el 8%.

3.1.3 Edificio FIMCP (Bloque 12A/12G/12H/12D)

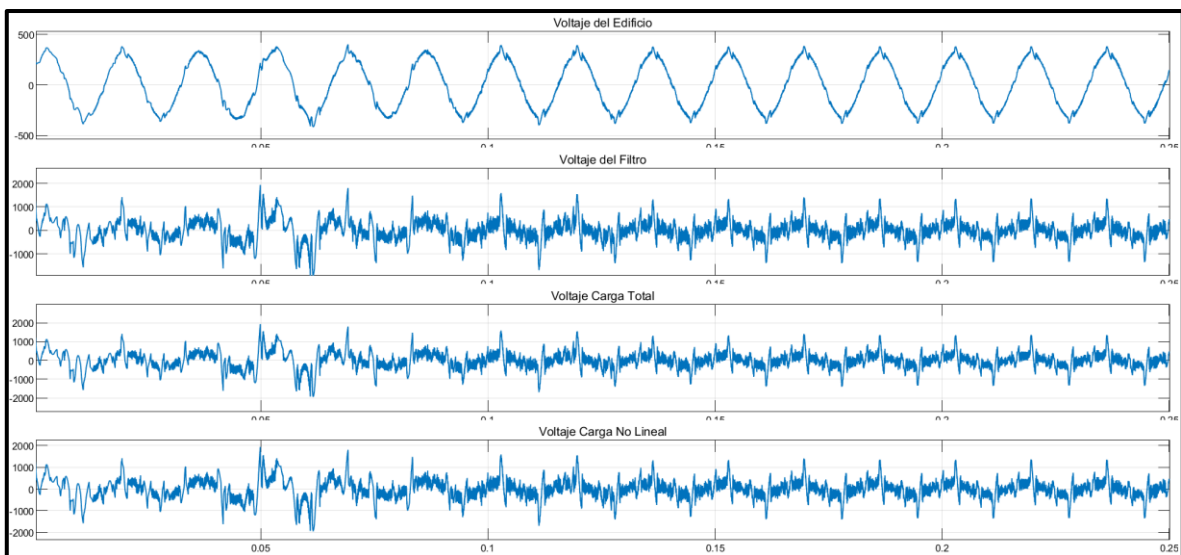
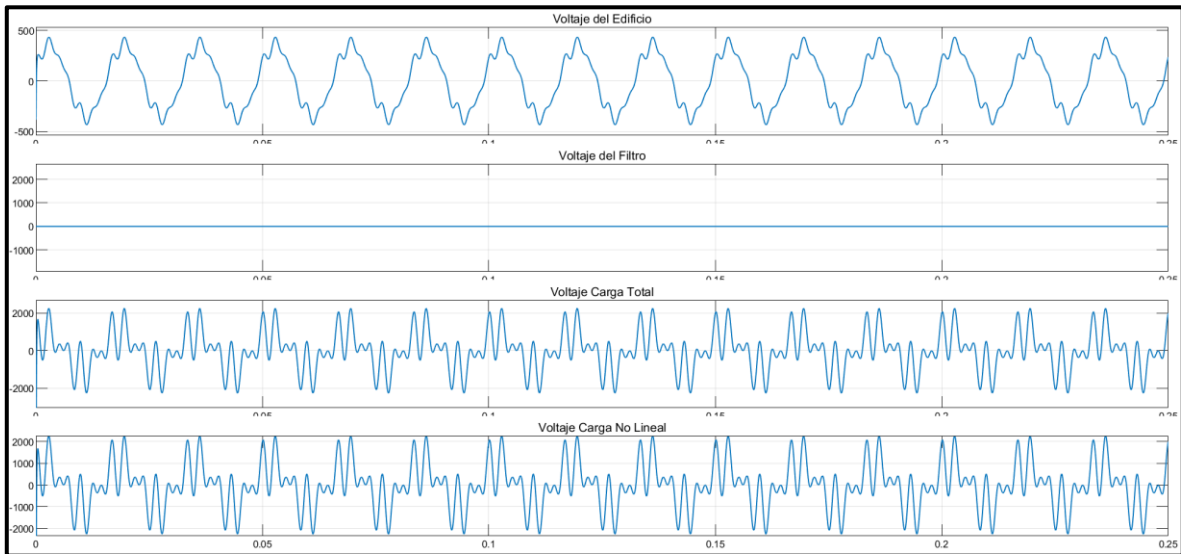
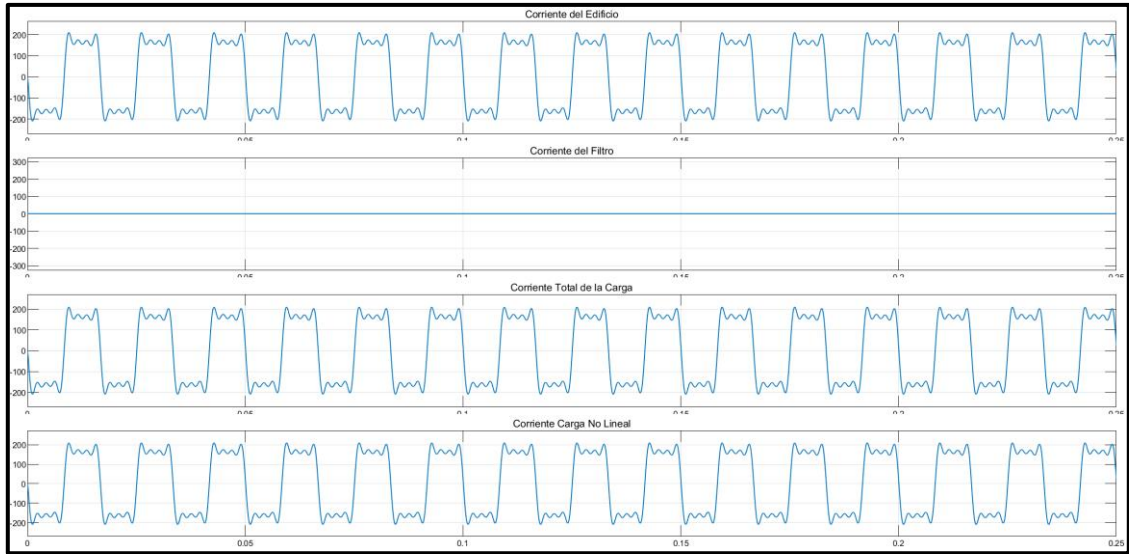
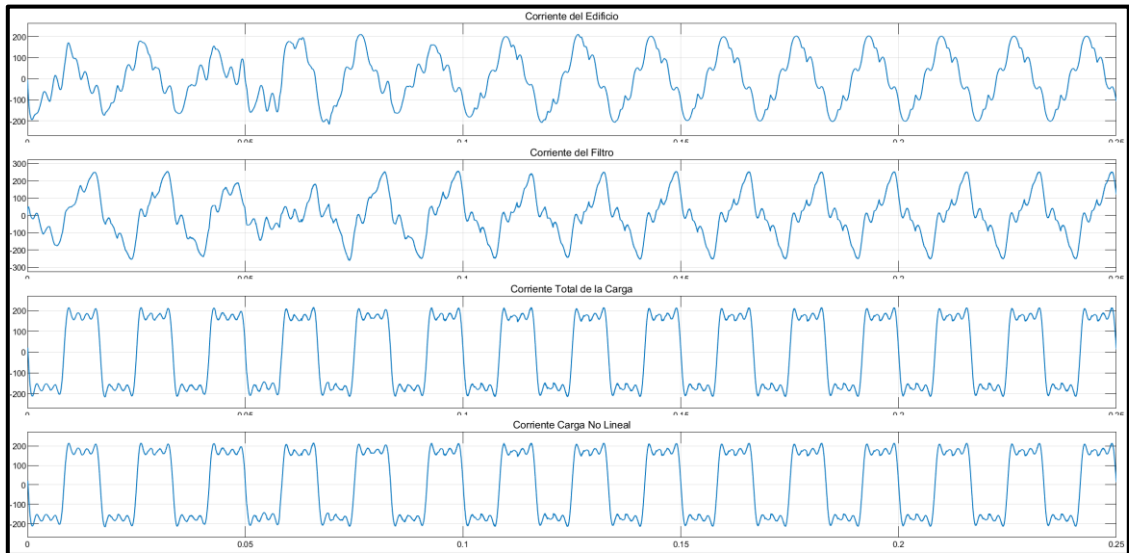


Figura 3.13 Señales de voltaje FIMCP sin filtro activo (a)

Señales de voltaje FIMCP con filtro activo (b)

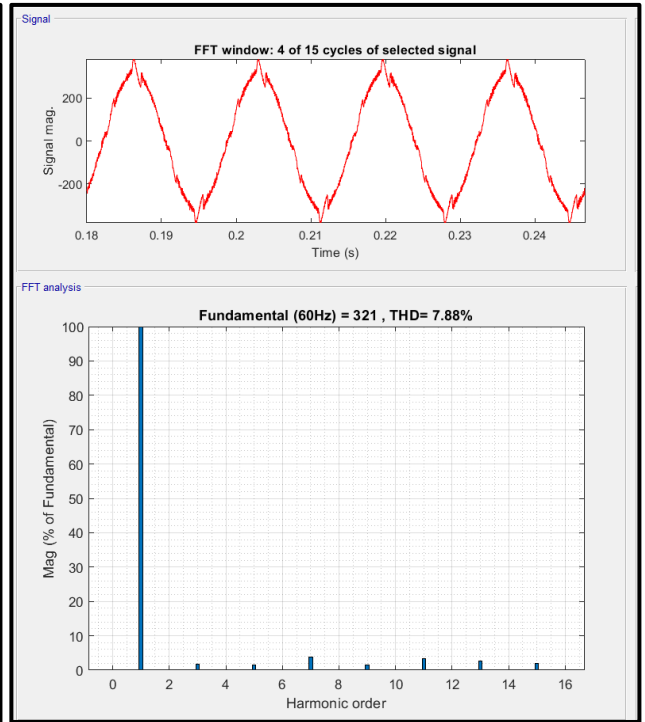
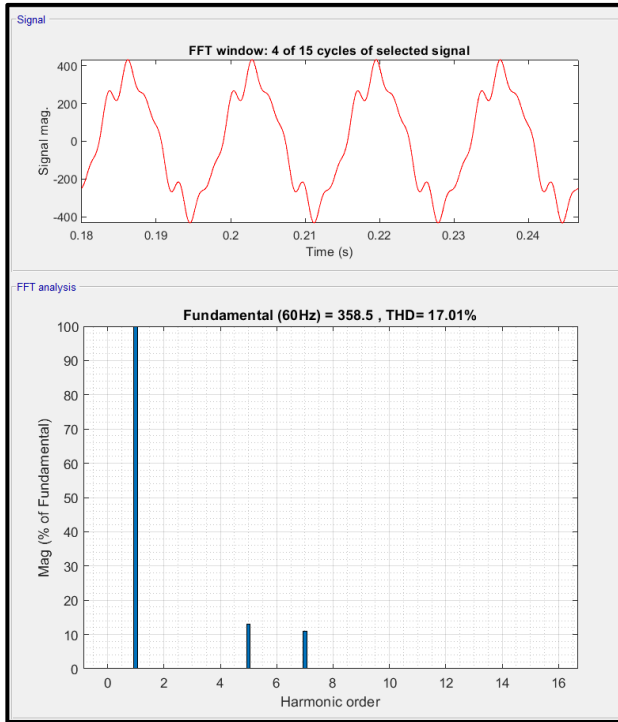


(a)



(b)

Figura 3.14 Señales de corriente FIMCP sin filtro activo (a)
 Señales de corriente FIMCP con filtro activo (b)

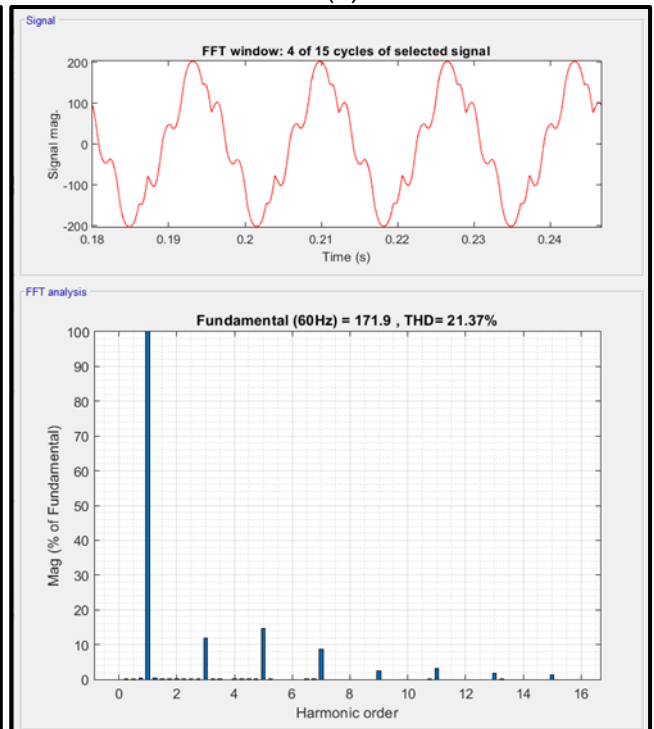
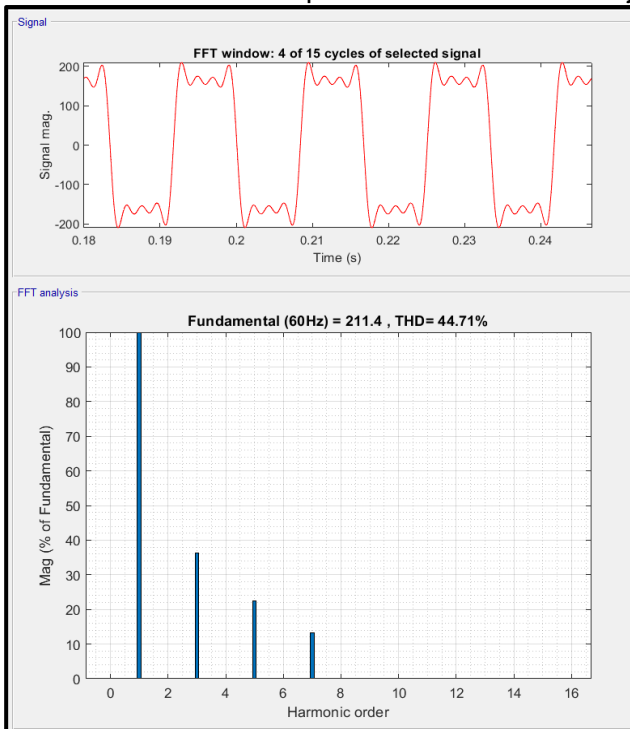


(a)

(b)

Figura 3.15 Espectro armónico de voltaje FIMCP sin filtro activo (a)

Espectro armónico de voltaje FIMCP con filtro activo (b)



(a)

(b)

Figura 3.16 Espectro armónico de corriente FIMCP sin filtro activo (a)

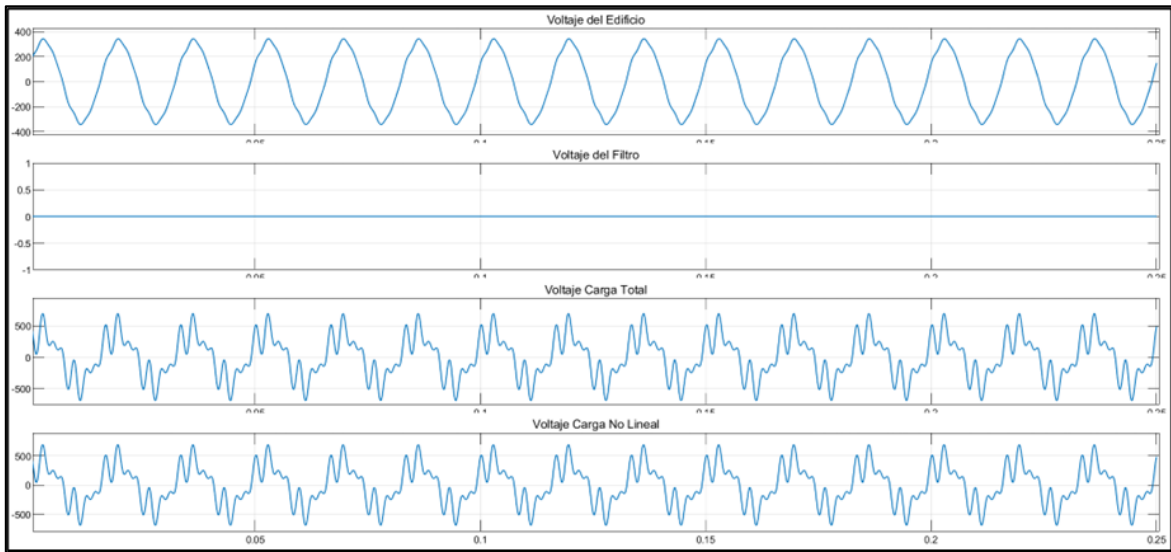
Espectro armónico de corriente FIMCP con filtro activo (b)

| Edificio | FIMCP | |
|------------------------------|-----------|----------|
| | 1 | 2 |
| Caso | | |
| Voltaje del edificio [V] | 257,1121 | 227,7138 |
| Voltaje del Filtro [V] | 0 | 384,3098 |
| Voltaje de la carga [V] | 1038,3212 | 384,3098 |
| Corriente del edificio [A] | 163,7471 | 124,2707 |
| Corriente del Filtro [A] | 0 | 130,8691 |
| Corriente de la carga [A] | 163,7471 | 169,9149 |
| Potencia activa [kW] | 32,3301 | 19,3098 |
| Potencia reactiva [kVA] | 85,6118 | 2,7827 |
| Costo diario de consumo [\$] | 43,9689 | 26,2614 |
| THDv | 17,01 | 7,88 |
| THDi | 44,71 | 21,37 |

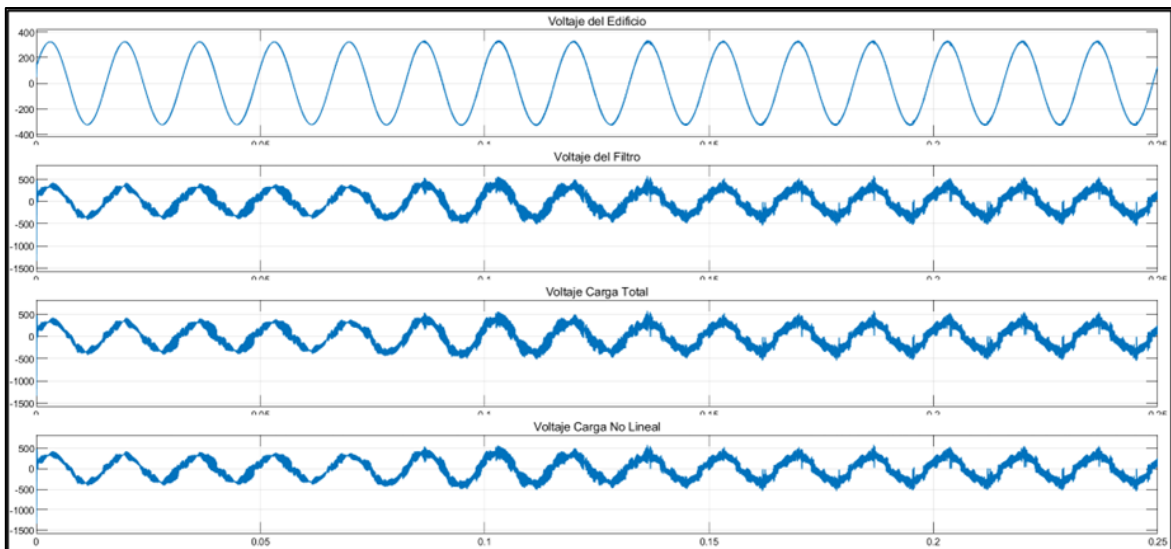
Fuente: Elaborado por el autor

Los resultados presentados en la tabla 3.4, corresponden a la respuesta del sistema propuesto bajo las condiciones de los casos de estudio donde se consideraron edificios administrativos, aulas y laboratorios en la Facultad de Ingeniería Mecánica y Ciencias de la producción (FIMCP), para el primer caso se obtiene que la facultad consume en potencia activa 32.3301 kW, lo cual representa una facturación diaria de \$ 43.9689 USD con un porcentaje de distorsión armónica de voltaje de 17.01 % y de corriente de 44.71 %. Una vez aplicado el filtro al sistema para el segundo caso de estudio, la demanda de potencia activa se reduce a 19.3098 kW, mientras que la facturación disminuye a \$ 26.2614 USD diarios, esto se traduce como una un ahorro en la facturación del 40.28 %. Por otro lado, en lo referente a los porcentajes de distorsión armónica tanto de voltaje como de corriente estos se reducen a un 7.88 % y 21.37 % respectivamente, donde la reducción de la distorsión armónica es de voltaje y corriente es del 61.96% y 63.13%, estos valores se ajustan a las indicaciones que establece la ley bajo la norma IEEE-519 donde el porcentaje de armónicos de voltaje para grandes consumidores no debe superar el 8%.

3.5 Laboratorio STR (Bloque 11C)



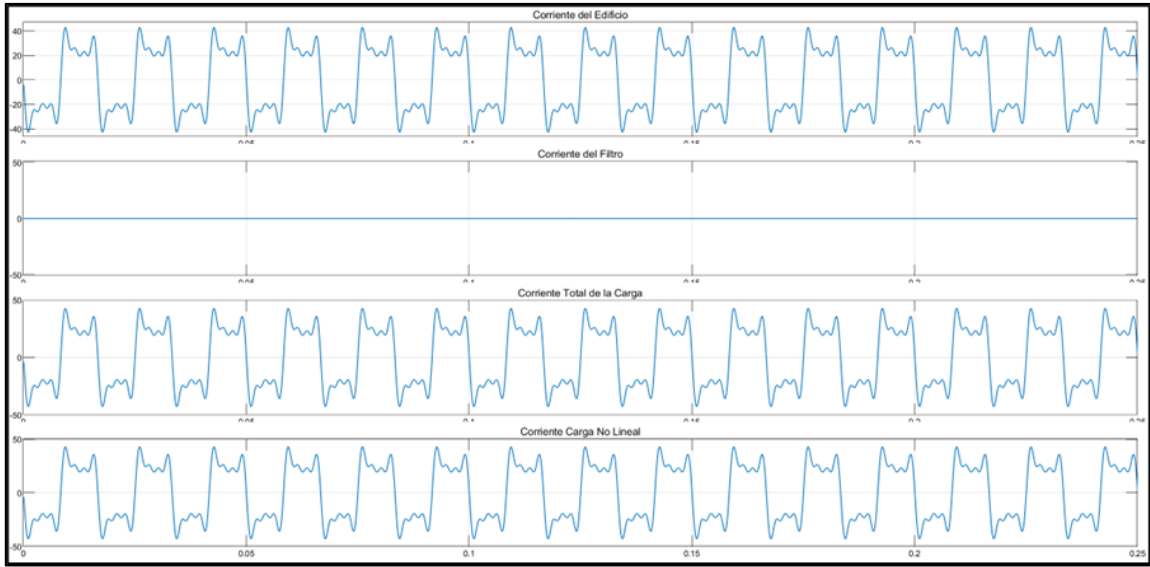
(a)



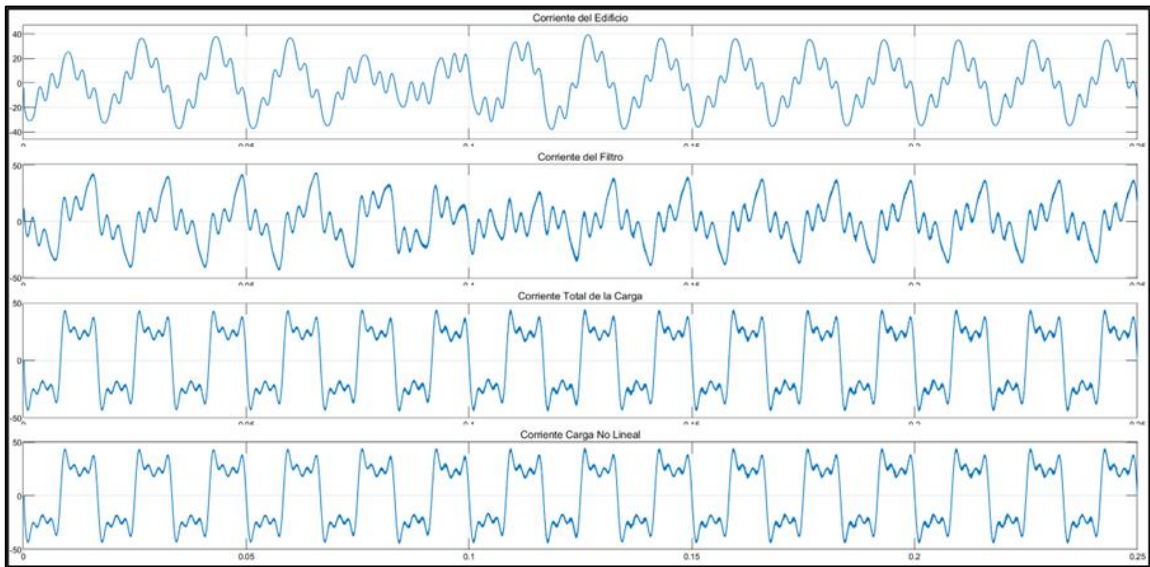
(b)

Figura 3.17 Señales de voltaje STR sin filtro activo (a)

Señales de voltaje STR con filtro activo (b)

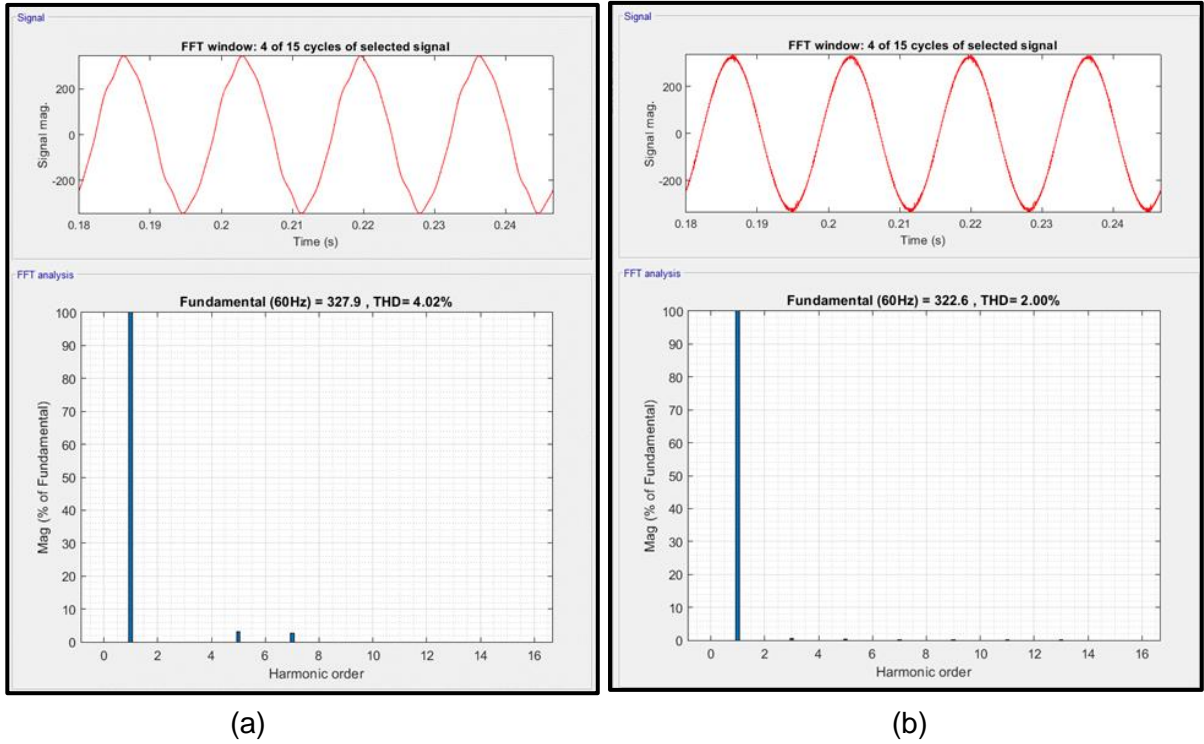


(a)

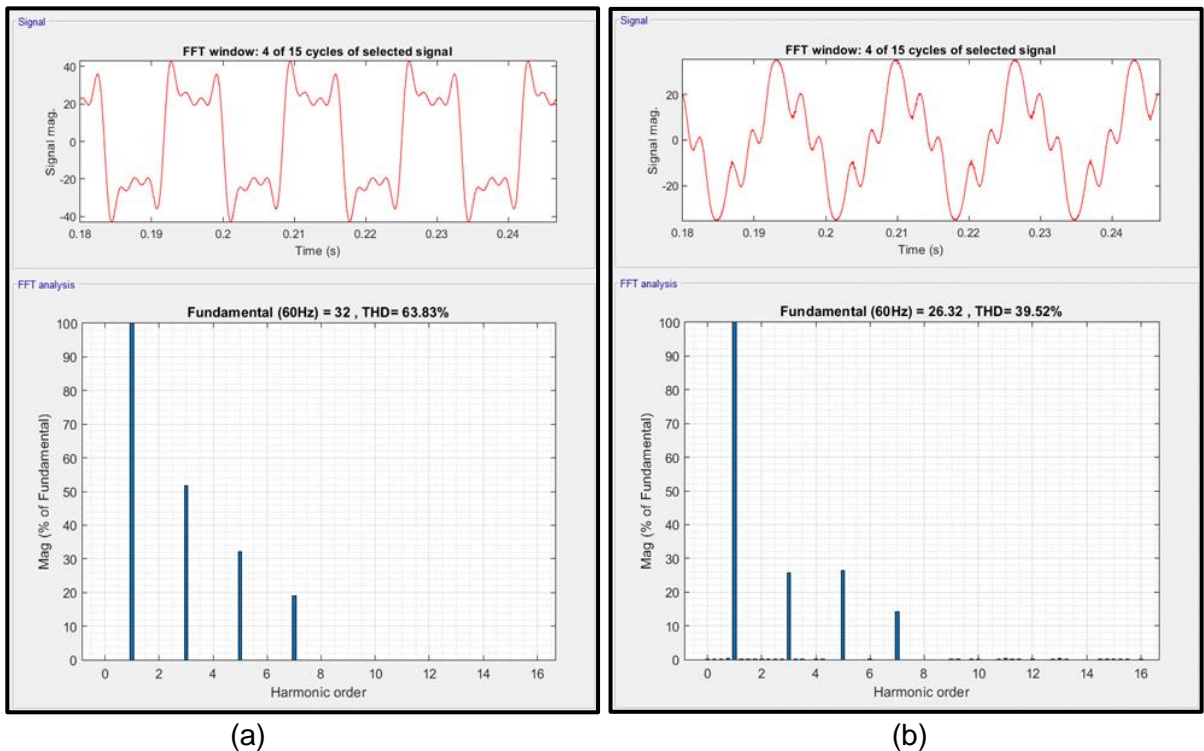


(b)

Figura 3.18 Señales de corriente STR sin filtro activo (a)
Señales de corriente STR con filtro activo (b)



(a) (b)
 Figura 3.19 Espectro armónico de voltaje STR sin filtro activo (a)
 Espectro armónico de voltaje STR con filtro activo (b)



(a) (b)
 Figura 3.20 Espectro armónico de corriente STR sin filtro activo (a)
 Espectro armónico de corriente STR con filtro activo (b)

Tabla 3.5 Comparación de resultados STR

| Edificio | LAB STR | |
|------------------------------|----------|----------|
| | 1 | 2 |
| Voltaje del edificio [V] | 232,0567 | 228,1583 |
| Voltaje del Filtro [V] | 0 | 238,507 |
| Voltaje de la carga [V] | 334,911 | 238,507 |
| Corriente del edificio [A] | 26,8444 | 19,9835 |
| Corriente del Filtro [A] | 0 | 17,7928 |
| Corriente de la carga [A] | 26,8444 | 27,6771 |
| Potencia activa [kW] | 4,9402 | 4,3583 |
| Potencia reactiva [kVA] | 12,8118 | 1,9872 |
| Costo diario de consumo [\$] | 6,7186 | 5,9273 |
| THDv | 4,02 | 2 |
| THDi | 63,83 | 39,52 |

Fuente: Elaborado por el autor

Los resultados presentados en la tabla 3.5, corresponden a la respuesta del sistema propuesto bajo las condiciones de los casos de estudio donde se consideró del laboratorio de simulación en tiempo real, para el primer caso se obtiene que el edificio consume en potencia activa 4.9402 kW, lo cual representa una facturación diaria de \$ 6.7186 USD con un porcentaje de distorsión armónica de voltaje de 4.02 % y de corriente de 63.83 %. Una vez aplicado el filtro al sistema para el segundo caso de estudio, la demanda de potencia activa se reduce a 4.3583 kW, mientras que la facturación disminuye a \$ 5.9273 USD diarios, esto se traduce como una un ahorro en la facturación del 11.92 %. Por otro lado, en lo referente a los porcentajes de distorsión armónica tanto de voltaje como de corriente estos se reducen a un 2.00 % y 63.83 % respectivamente, donde la reducción de la distorsión armónica es de voltaje y corriente es del 51.25% y 37.08%, estos valores se ajustan a las indicaciones que establece la ley bajo la norma IEEE-519 donde el porcentaje de armónicos de voltaje para grandes consumidores no debe superar el 8%, sin embargo si se observan las gráficas de la distorsión armónica de voltaje, las curvas de voltaje se asemejan a las fundamental por lo que la distorsión es baja, lo que significa que sin la necesidad de implementar el filtro, la calidad del consumo del edificio se ajusta a las normas requeridas, esto se debe a la poca presencia de cargas que inyectan armónicos a la red y al bajo consumo que la carga representa.

3.6 Revisión de Costos

Los resultados validan de forma técnica y económica la viabilidad de la solución propuesta a los efectos que la distorsión armónica provoca en la facturación del consumo energético en ESPOL y por lo tanto la calidad del consumo de la universidad. Por otro lado, es importante comprobar como parte de la propuesta de valor, los costos de inversión que requiere la implementación del diseño propuesto en contraste con otros métodos que presenten solución a la problemática presentada. Para la implementación del modelo de filtro activo se requiere de tarjetas Raspberry Pi, estas son microordenadores que pueden adaptar diseños de control y automatización desarrollados en diferentes softwares. En el caso de estudio presentado se presentan los costos de inversión en 4 posibles modelos de tarjetas raspberry; modelos pi 3 A, pi 3 B, pi 4 A y pi 4 B, estas poseen la capacidad de adaptarse a las necesidades del filtro activo y su implementación en los medidores de bajo costo y se compararan con los costos de inversión en un medidor de calidad de energía de la marca FLUKE, estos medidores representan una solución más avanzada en cuanto al análisis de los costos de la pérdida causados por un consumo eléctrico deficiente, por lo que su costo en el mercado es más elevado tal como se presenta a continuación

Tabla 3.6 Revisión de costos de inversión

| Equipo | Costo por unidad (USD) | # Unidades | Costo Total (USD) |
|---|------------------------|------------|-------------------|
| Tarjeta Raspberry Pi 3 A | \$ 127,50 | 4 | \$ 510.00 |
| Tarjeta Raspberry Pi 3 B | \$ 145,90 | 4 | \$ 583.60 |
| Tarjeta Raspberry Pi 4 A | \$ 155,90 | 4 | \$ 623.6 |
| Tarjeta Raspberry Pi 4 B | \$ 185,49 | 4 | \$ 741.96 |
| Medidor de calidad de energía modelo FLUKE 435-II | \$ 9642,99 | 1 | \$ 9642.99 |

Fuente: (FLUKE, 2022)

La Tabla 3.6, presenta los costos de inversión en cuatro diferentes modelos de raspberry pi, donde el máximo costo de inversión es de \$741.96, es importante considerar que solo se consideran los edificios más afectados por la baja calidad de energía en ESPOL, debido a que los resultados demuestran que para edificios de una demanda baja tanto el ahorro como la disminución de la distorsión armónica

es mínima, por lo que no es necesario invertir en 83 tarjetas para todos los medidores de bajo costo instalados. La diferencia entre los costos de inversión entre los modelos de raspberry de menor costo y el medidor de calidad de energía FLUKE 435-II es de \$ 9132,99 USD.

CAPÍTULO 4

4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

4.1 Conclusiones

- El estudio de la calidad de energía desvela que ESPOL presenta múltiples inconvenientes en los registros de los medidores de bajo costo, esto no solo de carácter eléctrico, sino también telemático y computacional. Por lo tanto, el modelo de filtro activo propuesto conectado al sistema de potencia de la universidad presentó resultados exitosos en la mitigación de armónicos presentes en los edificios considerados en el estudio. Esto se refleja en los resultados de consumo energético y costo de facturación, que se redujeron entre el 25 y 60 % en términos de potencia activa y dólares USD, para edificios con carga superior a 30 kW, y menor al 12 %, para cargas inferiores a 30 kW. Como resultado de lo antes mencionado, el filtro implica mejoras en el aprovechamiento y optimización del consumo energético.
- La revisión de costos refleja los beneficios económicos de invertir en la implementación de un modelo de filtro activo, dado que existe una diferencia de inversión de 9132.99 \$ USD entre el método propuesto y un medidor de calidad de energía, esto demuestra como parte de la propuesta de valor que el modelo desarrollado se ajusta de manera adecuada a los parámetros que determinan la viabilidad, ya que esto implica una solución económica y técnicamente efectiva.
- El impacto de la inyección de armónicos registrado, que es producido por las cargas no lineales es elevado por lo cual, la demanda y costos de facturación también lo son. No obstante, los efectos de la distorsión armónica se ven reducidos significativamente implementado el filtro activo, con una reducción del THD_V aproximadamente del 50 % y para el THD_i del 40 % para el caso de estudio, lo cual encaja con el estándar IEEE-519.
- En lo que respecta zonas con una baja demanda de potencia y distorsión armónica, la implementación del filtro activo presenta mejoras no significativas,

debido a que estos edificios, se encuentran operando bajo normativas de calidad de energía. Esto se refleja en el medidor MQTT-LAB-STR, correspondiente al laboratorio de simulación de tiempo real, donde el THD_V se reduce de 4.02 % a 2 %, y el ahorro en la facturación es de 0.79 \$ USD por día.

4.2 Recomendaciones

- Se sugiere establecer un monitoreo en tiempo real de la calidad energética en ESPO, de esta manera es posible analizar frecuentemente los parámetros de consumo e indicadores de calidad de energía, que permitan construir una base de datos virtual cada día, semana o mes. Entonces, se determinaría con rapidez la zona afectada, para luego conectar el filtro activo, mitigando los desbalances a tiempo.
- La implementación del filtro activo a otras grandes empresas del sector industrial y comercial, como, por ejemplo; hospitales, centros comerciales o fábricas, debido a la adaptabilidad del modelo a diferentes escenarios de carga.
- Si se busca incrementar la calidad del suministro eléctrico, es recomendable seguir detalladamente los estándares como la IEEE-519 o en especial la normativa ISO50001, que será obligatoria para grandes consumidores del sector comercial e industrial a partir del 2025, bajo el nombre de NTE-INEN-ISO:50001.

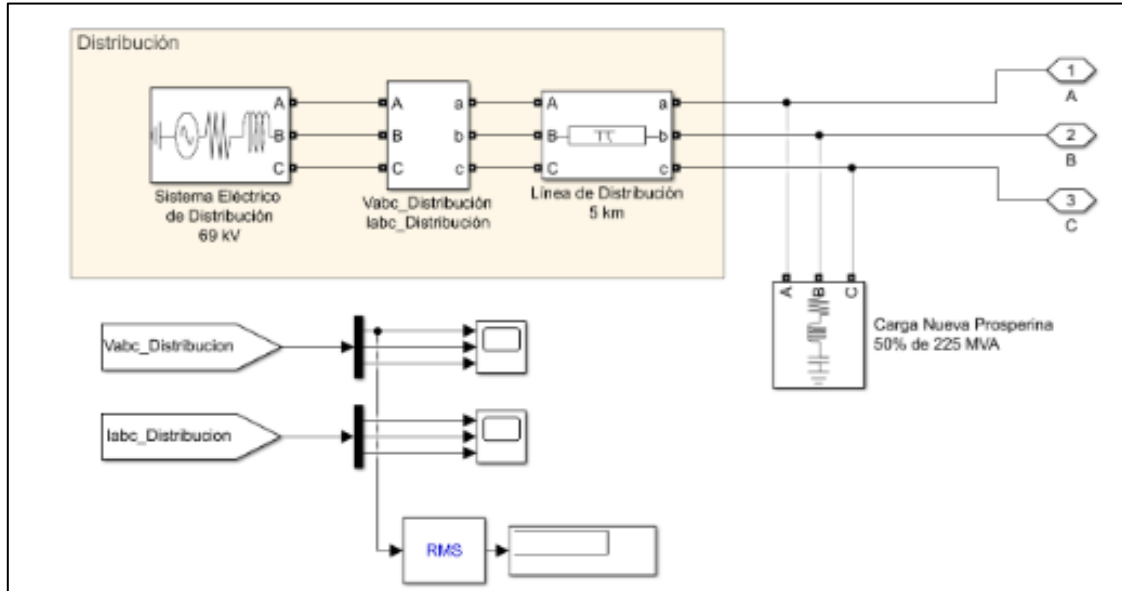
BIBLIOGRAFÍA

- Abdur Rehman, P. (26 de Oct de 2021). *Allumiax*. Obtenido de Importance of Power Quality in Power Systems: <https://www.allumiax.com/blog/importance-of-power-quality-in-power-systems>
- Andrés. (2022). *Qué son cargas no lineales, qué problemas generan y que dice la norma?* Obtenido de Electricaplicada: <https://www.electricaplicada.com/cargas-no-lineales/>
- ARCERNNR. (Septiembre de 2021). *Estadística Anual y Multianual del Sector Eléctrico Ecuatoriano*. Obtenido de <https://www.controlrecursosyenergia.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2021/09/Estadistica-2020-baja.pdf>
- Asamblea Nacional República del Ecuador. (19 de Marzo de 2019). *Ley Orgánica de Eficiencia Energética*. Obtenido de <https://www.recursosyenergia.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2019/03/Ley-Eficiencia-Energe%CC%81tica.pdf>
- CNEL EP. (2022). *Geoportal CNEL EP*. Obtenido de <https://geoportal.cnel.gob.ec/cnel/>
- Cruz, A., & Valderde, J. (29 de Marzo de 2022). *INFORME DE ESTADO ACTUAL DE MEDIDORES ZENSOR 3120*.
- Farswan, R. (23 de August de 2022). *Three phase active power filter*. Obtenido de MATLAB Central File Exchange: <https://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/72735-three-phase-active-power-filter>
- FLUKE. (2022). *Analizadores de calidad eléctrica y energía 434-II y 435-II de Fluke*. Obtenido de <https://www.fluke.com/es-us/producto/comprobacion-electrica/calidad-electrica/434-435>
- IEC 61000-2-4. (2004). *Compatibilidad electromagnética (CEM)*. Obtenido de Niveles de compatibilidad para las perturbaciones conducidas de baja frecuencia en las instalaciones industriales : https://www.donsion.org/calidad/documentacion/normativa/20-UNE-EN_61000-2-4=2004.pdf
- IEC 61000-3-2. (2005). *Compatibilidad Electromagnética (CEM)*. Obtenido de Límites para las emisiones de corriente armónica (equipos con corriente de entrada ≤ 16 A por fase): https://www.aserluz.org/wp-content/uploads/2016/03/UNE-EN_61000-3-22006.pdf
- IEEE-519. (2014). *IEEE Recommended Practice and Requirements for Harmonic Control in Electric Power Systems*. IEEE Power and Energy Society.
- ISO 50001. (2018). *SISTEMAS DE GESTIÓN DE LA ENERGÍA — REQUISITOS CON ORIENTACIÓN PARA SU USO (ISO 50001:2018, IDT)*. Obtenido de [file:///C:/Users/timri/Downloads/Norma%20ISO%2050001%202018%20\(es\).pdf](file:///C:/Users/timri/Downloads/Norma%20ISO%2050001%202018%20(es).pdf)
- Jurado, A., & Brugnion, M. (22-24 de Sep de 2008). *Revista CIER N° 56 - 2010*. Obtenido de Estudio de compensación de armónicos utilizando ATP/EMTP y ETAP: [http://sg.cier.org.uy/Publicaciones/Revista.nsf/0a293b20eacdf8a903257133003ea67d/42d99847b1c7b9da832578230049b5d3/\\$FILE/EstudioDeCompensacion.pdf](http://sg.cier.org.uy/Publicaciones/Revista.nsf/0a293b20eacdf8a903257133003ea67d/42d99847b1c7b9da832578230049b5d3/$FILE/EstudioDeCompensacion.pdf)
- Markiewicz, H., & Klajn, A. (2004). Power Quality Application Guide. Voltage Disturbances Standard EN 50160. Voltage Characteristics in Public Distribution Systems. *Power Quality Application Guide, Vol. 5.4.2, Copper Development Association*.
- Martinek, R., Rzigly, J., Jaros, R., Bilik, P., & Ladrova, M. (2019). Least mean squares and recursive least squares algorithms for total harmonic distortion reduction using shunt active power filter control. *Energies*, 12(8), 1545.
- Murillo Yarce, D. (2010). *Compensación de armónicos con un filtro activo de potencia*.
- Naim, M., & Tawfiq, M. (Jan de 2020). *International Conference on Computer, Electrical & Communication Engineering*. Obtenido de Design and Simulation of Active Power Filter Based on Feed Forward Neural Network for Harmonic Detection and Elimination.
- Ouchen, S., Betka, A., & Abdeddaim, S. (Oct de 2016). *Researchgate*. Obtenido de Fuzzy Logic Control of Shunt Active Filter using Synchronous Reference Frame Control Strategy:

- https://www.researchgate.net/publication/310160280_Fuzzy_Logic_Control_of_Shunt_Active_Filter_using_Synchronous_Reference_Frame_Control_Strategy
- Rama, B. K. (2000). *Academia*. Obtenido de Understanding Power Quality Problems Voltage Sags and Interruptions: <https://d1wqtxts1xzle7.cloudfront.net/33363757/89625688-Understanding-Power-Quality-Problems-with-cover-page-v2.pdf?Expires=1654918617&Signature=U59xeDq5-7ZXb-2xKFH6uNyHAh4mNYizRKgeNRAoGG0BU0EHp0gflX7Z0UbkBKQkEQEHnITnCuBU-z1WYIQf6ZB84BiYYM1Rn~3YjiU82CgN5>
- Sagar, S. P., & Metri, R. A. (24-26 de Febre de 2017). *IEEE Xplore*. Obtenido de Power Quality Improvement Using Shunt Active: <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/8073501>
- Salam, Z., Tan, P. C., & Jusoh, A. (2006). Harmonics mitigation using active power filter: A technological review. *Elektrika Journal of Electrical Engineering*, 8(2), 17-26.
- Salim, C., Benchouia, M., Goléa, A., & Zouzou, S. (13 de October de 2010). *Application des Réseaux de Neurones dans la Commande d'un Filtre Actif Parallele en Utilisant Matlab_Simulink*. Obtenido de ReserchGate: https://www.researchgate.net/publication/287771355_Application_des_Reseaux_de_Neurones_dans_la_Commande_d'un_Filtre_Actif_Parallele_en_Utilisant_Matlab_Simulink
- Santiprapan, P., & Areerak, K. (2011). *Model and Control Strategy on DQ Frame for Shunt Active Power Filters*. Obtenido de SEMANTICSCHOLAR: <https://www.semanticscholar.org/paper/Model-and-Control-Strategy-on-DQ-Frame-for-Shunt-Santiprapan-Areerak/c26fc14d4fb1a3e09711b01b5b66005983fb6aef>
- Seenco Group Team. (26 de Jan de 2017). *Distorsión Armónica Total*. Obtenido de <https://www.seencogroup.com/distorsion-armonica-total-que-paso-con-mi-onda-perfecta/>
- Suárez, J., Amaris, H., & Robles, G. (March de 2010). *Current control schemes for three-phase four-wire shunt active power filters: A comparative study*. Obtenido de ResearchGate: https://www.researchgate.net/publication/262431009_Current_control_schemes_for_three-phase_four-wire_shunt_active_power_filters_A_comparative_study
- Suhendar, Firmansyah, T., Maulana, A., & Zuldiag. (Dec de 2017). *Researchgate*. Obtenido de Shunt Active Power Filter Based on P-Q Theory with Multilevel Inverters for Harmonic Current Compensation : https://www.researchgate.net/publication/322733652_Shunt_Active_Power_Filter_based_on_P-Q_Theory_with_Multilevel_Inverters_for_Harmonic_Current_Compensation

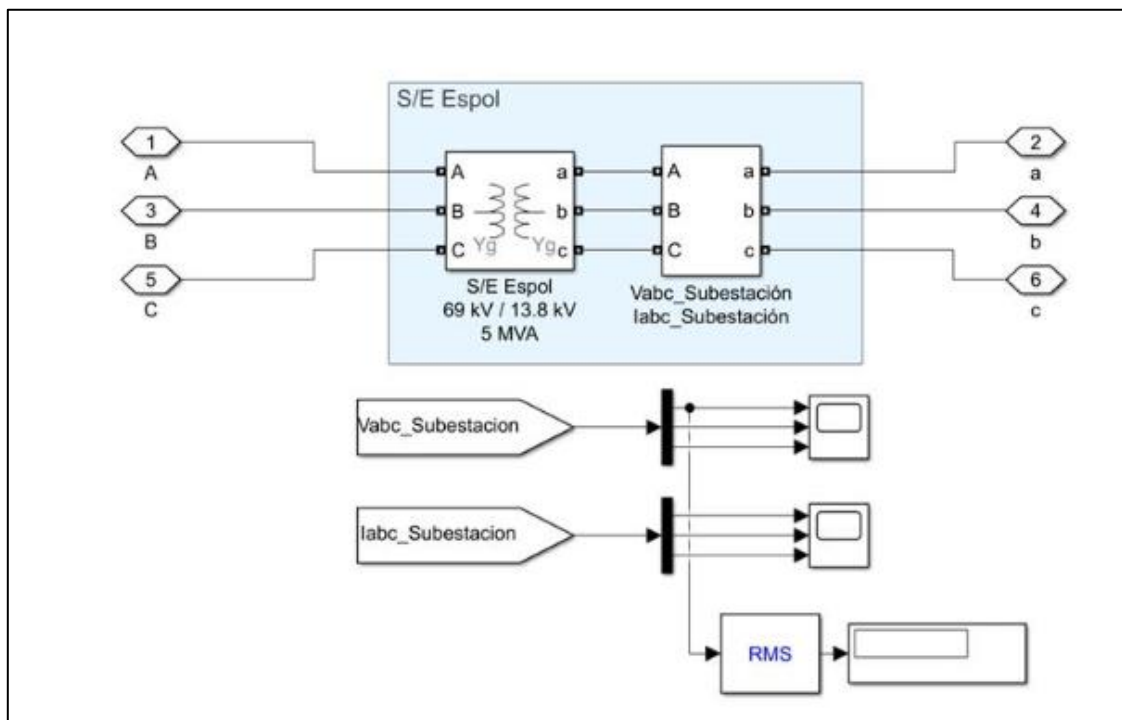
APÉNDICES

APÉNDICE A



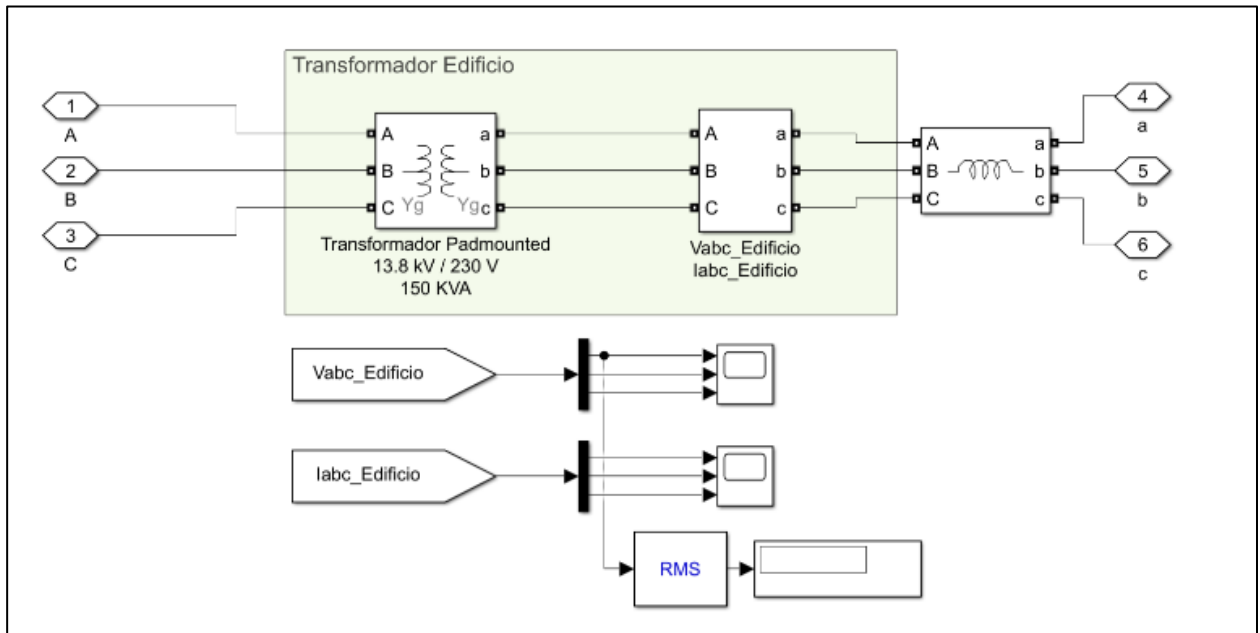
Subsistema Red Eléctrica ESPOL

APÉNDICE B



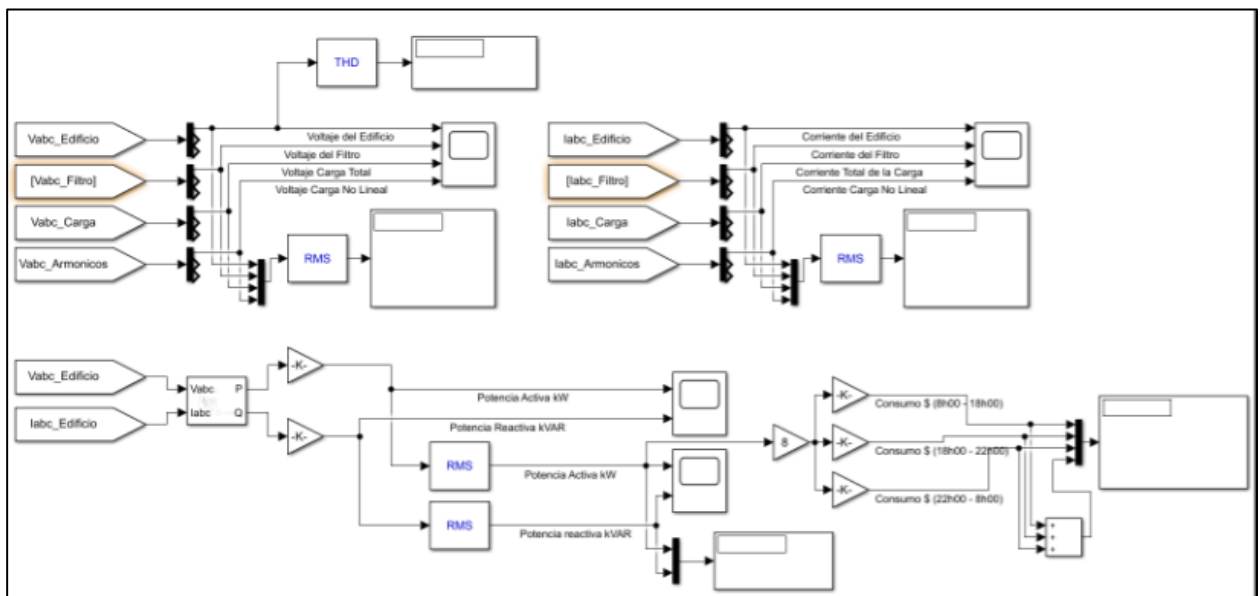
Subestación ESPOL

APÉNDICE C



Transformador Tipo Padmounted 150kVA

APÉNDICE D



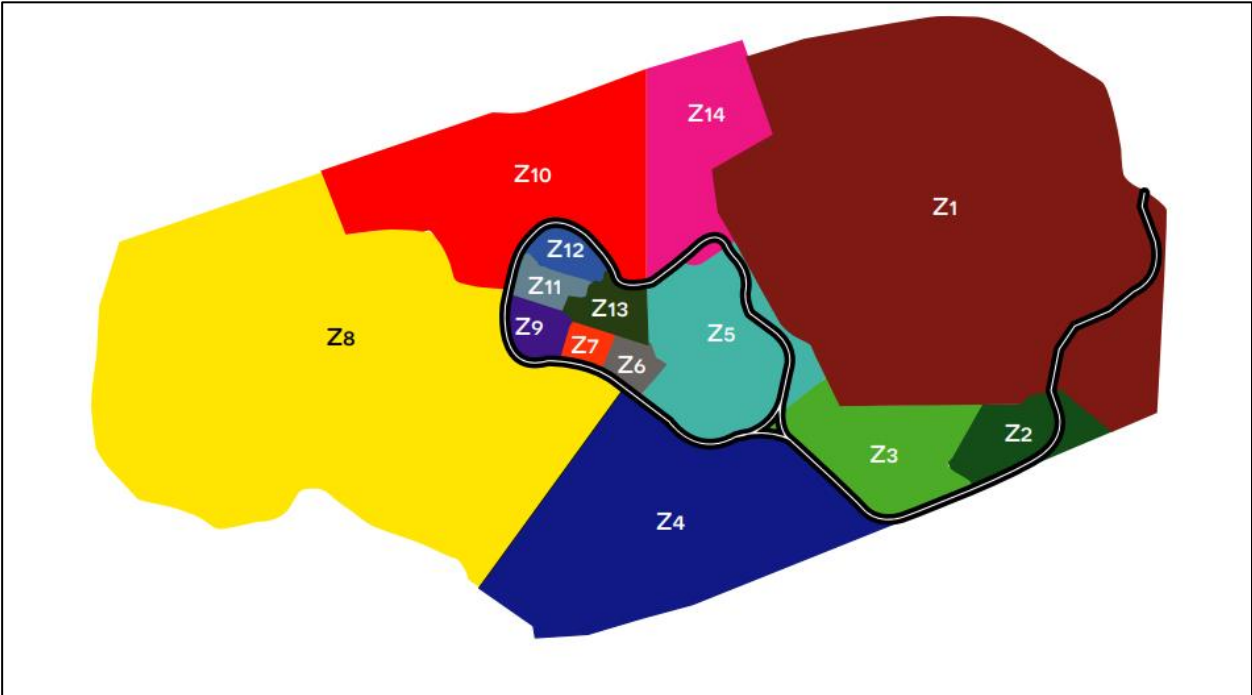
Bloque de Resultados

APÉNDICE E



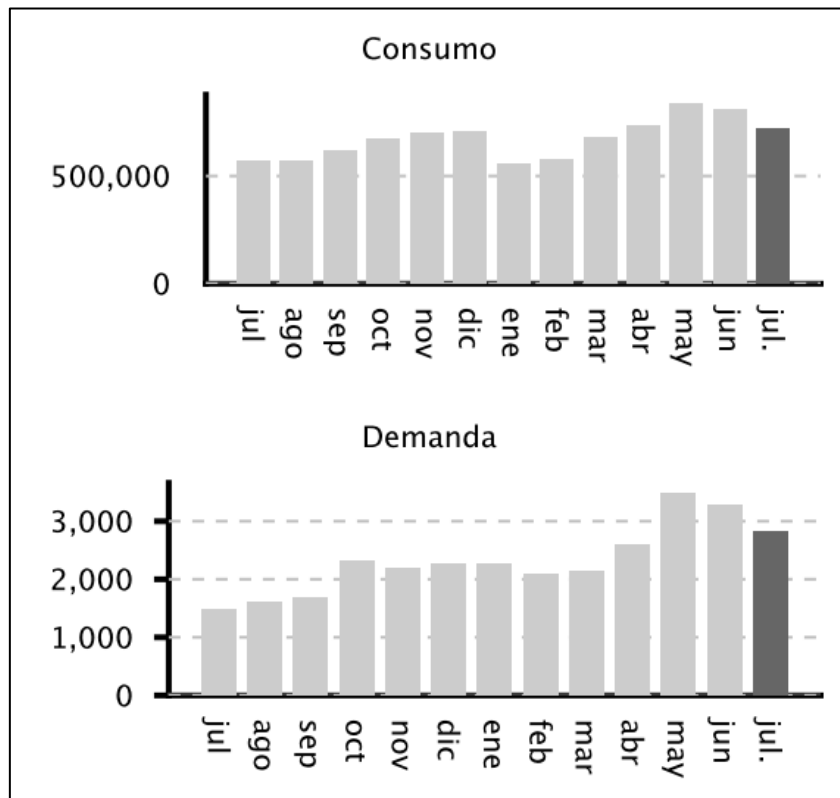
Datos de la subestación ESPOL obtenidos del Geoportal (CNEL EP, 2022)

APÉNDICE F





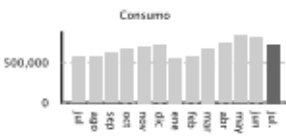
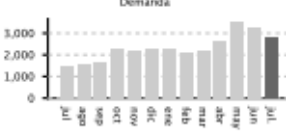

Zonificación del campus Gustavo Galindo de ESPOL

APÉNDICE G



Promedio de la demanda mensual de ESPOL

APÉNDICE H

|  <p>Empresa Eléctrica Pública Estratégica Corporación Nacional de Electricidad CNEL EP Matriz: Km. 6 1/2 Vía a la Costa Edif. Grace Celbos Piso 3 Sucursal: Cda. La Garzota Mz-47, sector 3. RUC: 0968599020001 Contribuyente especial, resolución No. 065 OBLIGADO A LLEVAR CONTABILIDAD</p> |  K200016642544 | Nro. Factura 148-999-040433558 Nro. doc. interno 001940689623 Fecha de emisión 28-07-2022 Fecha de vencimiento 12-08-2022 Número de autorización 2807202201096859902000121489990404335580115332419 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|--|---|---|------------------|--------------------|--|------------------------|--|------------------|------------------------------|---------------|-----------------------------------|-----------------|-----------------------------------|------------|--------|--------|------|-----------|------|-----------|-----|----------|-----------------------------------|------------|--------|--------|------|----------|------|----------|-----|---------|-----------------------------------|------------|--------|--------|------|-----------|------|-----------|-----|---------|------------------------|------------|--------|--------|------|-----------|------|-----------|-----|------|-----------------------------------|------------|------|------|------|------|------|------|----|------|-----------------------------------|------------|------|------|------|------|------|------|----|------|-----------------------------------|------------|------|------|------|------|------|------|----|------|--------------------|------------|---------|------|------|---------|------|---------|----|---------|
| Información del Consumidor | | VALOR TOTAL \$45804.05 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| CUENTA CONTRATO 200016642544 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Razón Social ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL ESPOL RUC 0960002780001 Celular 0999312072 Correo Electrónico financiero@espol.edu.ec Dirección del servicio VIA PERIMETRAL 30.5 CAMPUS ESPOL PROSPER / AL FINAL DE VIADUCTO / KM / XIMENA - GUAYAQUIL | Código Único 0400576358 Tipo de tarifa Arcoanal MTCGCD10 - MT Beneficio Público con Dem Horaria Geocódigo 0417E004000180 Unidad de Lectura 0417E004 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 1. Información Servicio Eléctrico y Alumbrado Público | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Número de medidor 1138136 Tipo consumo leído Fecha desde 22-06-2022 | Días facturados 30 Fecha hasta 21-07-2022 | Factor de multiplicación 4200.00 Factor de corrección 0.6000 Factor de potencia (FP) 0.9492 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| <table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th>Descripción</th> <th>Fecha Hasta</th> <th>Lectura Actual</th> <th>Lectura Anterior</th> <th>Diferencia Consumo</th> <th>Consumo Subtotal</th> <th>Consumo Int. Transfer.</th> <th>Consumo Total</th> <th>Unidad Medida</th> <th>Monto (\$)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Energía act. hor. A (08h00-18h00)</td> <td>21-07-2022</td> <td>733.00</td> <td>628.00</td> <td>0.00</td> <td>441000.00</td> <td>0.00</td> <td>441000.00</td> <td>KWH</td> <td>26460.00</td> </tr> <tr> <td>Energía act. hor. B (18h00-22h00)</td> <td>21-07-2022</td> <td>141.00</td> <td>121.00</td> <td>0.00</td> <td>84000.00</td> <td>0.00</td> <td>84000.00</td> <td>KWH</td> <td>5040.00</td> </tr> <tr> <td>Energía act. hor. C (22h00-08h00)</td> <td>21-07-2022</td> <td>334.00</td> <td>287.00</td> <td>0.00</td> <td>197400.00</td> <td>0.00</td> <td>197400.00</td> <td>KWH</td> <td>9870.00</td> </tr> <tr> <td>Energía reactiva total</td> <td>21-07-2022</td> <td>422.00</td> <td>365.00</td> <td>0.00</td> <td>239400.00</td> <td>0.00</td> <td>239400.00</td> <td>KVR</td> <td>0.00</td> </tr> <tr> <td>Demanda máx. hor. A (08h00-18h00)</td> <td>21-07-2022</td> <td>0.77</td> <td>0.00</td> <td>0.00</td> <td>0.77</td> <td>0.00</td> <td>0.77</td> <td>KW</td> <td>0.00</td> </tr> <tr> <td>Demanda máx. hor. B (18h00-22h00)</td> <td>21-07-2022</td> <td>0.26</td> <td>0.00</td> <td>0.00</td> <td>0.26</td> <td>0.00</td> <td>0.26</td> <td>KW</td> <td>0.00</td> </tr> <tr> <td>Demanda máx. hor. C (22h00-08h00)</td> <td>21-07-2022</td> <td>0.40</td> <td>0.00</td> <td>0.00</td> <td>0.40</td> <td>0.00</td> <td>0.40</td> <td>KW</td> <td>0.00</td> </tr> <tr> <td>Demanda facturable</td> <td>21-07-2022</td> <td>2814.00</td> <td>0.00</td> <td>0.00</td> <td>2814.00</td> <td>0.00</td> <td>2814.00</td> <td>KW</td> <td>4426.98</td> </tr> </tbody> </table> | | | Descripción | Fecha Hasta | Lectura Actual | Lectura Anterior | Diferencia Consumo | Consumo Subtotal | Consumo Int. Transfer. | Consumo Total | Unidad Medida | Monto (\$) | Energía act. hor. A (08h00-18h00) | 21-07-2022 | 733.00 | 628.00 | 0.00 | 441000.00 | 0.00 | 441000.00 | KWH | 26460.00 | Energía act. hor. B (18h00-22h00) | 21-07-2022 | 141.00 | 121.00 | 0.00 | 84000.00 | 0.00 | 84000.00 | KWH | 5040.00 | Energía act. hor. C (22h00-08h00) | 21-07-2022 | 334.00 | 287.00 | 0.00 | 197400.00 | 0.00 | 197400.00 | KWH | 9870.00 | Energía reactiva total | 21-07-2022 | 422.00 | 365.00 | 0.00 | 239400.00 | 0.00 | 239400.00 | KVR | 0.00 | Demanda máx. hor. A (08h00-18h00) | 21-07-2022 | 0.77 | 0.00 | 0.00 | 0.77 | 0.00 | 0.77 | KW | 0.00 | Demanda máx. hor. B (18h00-22h00) | 21-07-2022 | 0.26 | 0.00 | 0.00 | 0.26 | 0.00 | 0.26 | KW | 0.00 | Demanda máx. hor. C (22h00-08h00) | 21-07-2022 | 0.40 | 0.00 | 0.00 | 0.40 | 0.00 | 0.40 | KW | 0.00 | Demanda facturable | 21-07-2022 | 2814.00 | 0.00 | 0.00 | 2814.00 | 0.00 | 2814.00 | KW | 4426.98 |
| Descripción | Fecha Hasta | Lectura Actual | Lectura Anterior | Diferencia Consumo | Consumo Subtotal | Consumo Int. Transfer. | Consumo Total | Unidad Medida | Monto (\$) | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Energía act. hor. A (08h00-18h00) | 21-07-2022 | 733.00 | 628.00 | 0.00 | 441000.00 | 0.00 | 441000.00 | KWH | 26460.00 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Energía act. hor. B (18h00-22h00) | 21-07-2022 | 141.00 | 121.00 | 0.00 | 84000.00 | 0.00 | 84000.00 | KWH | 5040.00 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Energía act. hor. C (22h00-08h00) | 21-07-2022 | 334.00 | 287.00 | 0.00 | 197400.00 | 0.00 | 197400.00 | KWH | 9870.00 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Energía reactiva total | 21-07-2022 | 422.00 | 365.00 | 0.00 | 239400.00 | 0.00 | 239400.00 | KVR | 0.00 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Demanda máx. hor. A (08h00-18h00) | 21-07-2022 | 0.77 | 0.00 | 0.00 | 0.77 | 0.00 | 0.77 | KW | 0.00 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Demanda máx. hor. B (18h00-22h00) | 21-07-2022 | 0.26 | 0.00 | 0.00 | 0.26 | 0.00 | 0.26 | KW | 0.00 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Demanda máx. hor. C (22h00-08h00) | 21-07-2022 | 0.40 | 0.00 | 0.00 | 0.40 | 0.00 | 0.40 | KW | 0.00 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Demanda facturable | 21-07-2022 | 2814.00 | 0.00 | 0.00 | 2814.00 | 0.00 | 2814.00 | KW | 4426.98 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 2. Valores pendientes VALORES PENDIENTES (2) 0.00 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 3. Planes de Financiamiento Autorizados por el Consumidor PLANES DE FINANCIAMIENTO (3) 0.00 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Formas de Pago <table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th>FORMA DE PAGO</th> <th>VALOR</th> <th>PLAZO</th> <th>TIEMPO</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>SIN UTILIZACIÓN DEL SISTEMA FINANCIERO</td> <td>45804.05</td> <td>15</td> <td>días</td> </tr> </tbody> </table> | | | FORMA DE PAGO | VALOR | PLAZO | TIEMPO | SIN UTILIZACIÓN DEL SISTEMA FINANCIERO | 45804.05 | 15 | días | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| FORMA DE PAGO | VALOR | PLAZO | TIEMPO | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| SIN UTILIZACIÓN DEL SISTEMA FINANCIERO | 45804.05 | 15 | días | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|  Consumo | | Servicio Eléctrico y Alumbrado Público Valor Consumo 41370.00 Comercialización 7.07 Valor Demanda 4426.98 Subtotal Servicio Eléctrico (SE) 45804.05 Servicio Alumbrado Público 0.00 Subtotal Alumbrado Público 0.00 Base I.V.A. 0% 45804.05 I.V.A. 0% 0.00 TOTAL SE Y AP (1) 45804.05 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|  Demanda | | <table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th colspan="2">TOTAL (A)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Servicio Eléctrico y Alumbrado Público (1)</td> <td>45804.05</td> </tr> <tr> <td>Valores Pendientes (2)</td> <td>0.00</td> </tr> <tr> <td>Planes de Financiamiento (3)</td> <td>0.00</td> </tr> <tr> <td>TOTAL SECTOR ELÉCTRICO (A)</td> <td>45804.05</td> </tr> </tbody> </table> | TOTAL (A) | | Servicio Eléctrico y Alumbrado Público (1) | 45804.05 | Valores Pendientes (2) | 0.00 | Planes de Financiamiento (3) | 0.00 | TOTAL SECTOR ELÉCTRICO (A) | 45804.05 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| TOTAL (A) | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Servicio Eléctrico y Alumbrado Público (1) | 45804.05 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Valores Pendientes (2) | 0.00 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Planes de Financiamiento (3) | 0.00 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| TOTAL SECTOR ELÉCTRICO (A) | 45804.05 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|  | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |

Facturación del consumo eléctrico de ESPOL del mes de Julio del 2022