



**UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA
SEDE QUITO
CARRERA DE ELECTRICIDAD**

Trabajo de titulación previo a la obtención del
Título de Ingeniero Eléctrico

AUTOR: Brandon Daniel Condemaita Baltodano

TUTOR: Milton Gonzalo Ruiz Maldonado MSc.

Quito - Ecuador

2025

**CERTIFICADO DE RESPONSABILIDAD Y AUTORÍA DEL TRABAJO
DE TITULACIÓN**

Yo, Brandon Daniel Condemaita Baltodano con documento de identificación No. 1723715494 manifiesto que:

Soy el autor y responsable del presente trabajo; y, autorizo a que sin fines de lucro la Universidad Politécnica Salesiana pueda usar, difundir, reproducir o publicar de manera total o parcial el presente trabajo de titulación.

Quito, 11 de septiembre del año 2025

Atentamente.



Brandon Daniel Condemaita Baltodano

1723715494

**CERTIFICADO DE CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR DEL TRABAJO
DE TITULACIÓN A LA UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA**

Yo, Brandon Daniel Condemaita Baltodano con documento de identificación No. 1723715494, expreso mi voluntad y por medio del presente documento cedo a la Universidad Politécnica Salesiana la titularidad sobre los derechos patrimoniales en virtud de que soy autor del Proyecto Técnico “Disminución de armónicos de voltaje en el alimentador 1500080T03 de la subestación 8 usando campaña de medidas para el diseño de un filtro activo que permita mejorar la calidad de energía en la Empresa eléctrica Riobamba S.A.”, el cual ha sido desarrollado para optar por el título de: Ingeniero Eléctrico, en la Universidad Politécnica Salesiana, quedando la Universidad facultada para ejercer plenamente los derechos cedidos anteriormente.

En concordancia con lo manifestado, suscribo este documento en el momento que hago la entrega del trabajo final en formato digital a la Biblioteca de la Universidad Politécnica Salesiana.

Quito, 11 de septiembre del año 2025

Atentamente,



Brandon Daniel Condemaita Baltodano

1723715494

CERTIFICADO DE DIRECCIÓN DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Yo, Milton Gonzalo Ruiz Maldonado con documento de identificación No. 1714409065, docente de la Universidad Politécnica Salesiana, declaro que bajo mi tutoría fue desarrollado el trabajo de titulación: DISMINUCIÓN DE ARMÓNICOS DE VOLTAJE EN EL ALIMENTADOR 1500080T03 DE LA SUBESTACIÓN 8 USANDO CAMPAÑA DE MEDIDAS PARA EL DISEÑO DE UN FILTRO ACTIVO QUE PERMITA MEJORAR LA CALIDAD DE ENERGÍA EN LA EMPRESA ELÉCTRICA RIOBAMBA S.A., realizado por Brandon Daniel Condemaita Baltodano con documento de identificación No. 1723715494, obteniendo como resultado final el trabajo de titulación bajo la opción Proyecto Técnico que cumple con todos los requisitos determinados por la Universidad Politécnica Salesiana.

Quito, 11 de septiembre del año 2025

Atentamente,



Ing. Milton Gonzalo Ruiz Maldonado, MSc

1714409065

ÍNDICE GENERAL

RESUMEN	1
ABSTRACT	2
1. INTRODUCCIÓN	3
1.1. Planteamiento del problema	8
1.2. Alcance	8
1.3. Objetivo Principal.....	9
1.4. Objetivos específicos	9
2. MARCO TEORICO	10
2.1. Definición y Origen de los Armónicos.....	10
2.2. Efectos de los armónicos en la calidad de energía	11
2.3. Calidad de energía	12
2.3.1. Nivel de Voltaje.....	13
2.3.2. Perturbación Rápida de Voltaje (Flicker).....	13
2.3.3. Distorsión Armónica de Voltaje	14
2.3.4. Desequilibrio de Voltaje.....	15
2.3.5. Normativas y Estándares de Calidad de Energía.....	15
2.3.6. Instrumentos de medida.....	17
2.4. Métodos de mitigación de armónicos	18
2.4.1. Filtros activos de potencia	19
2.5. Luminarias para alumbrado público	20
2.6. LED	21
2.7. HPS.....	22
2.8. CYMDIST	23
3. METODOLOGÍA	24
3.1. Caso de estudio.....	25
3.2. SISTEMA DE DISTRIBUCION.....	29
3.3. CARACTERISTICAS DEL TRANSFORMADOR DE DISTRIBUCION.....	29
3.4. Armónicos de luminarias LED Y HPS.....	30
3.5. Distorsión Armónica de voltaje.....	31
3.6. Límites Permisibles.	31
3.6.1. Fuente de voltaje de armónico LED.....	31
3.6.2. Fuente de voltaje de armónico HPS.	31

.....	32
3.7. FUENTE DE FRECUENCIA.	32
3.8. Armónicos Luminaria HPS	33
3.9. Armónicos Luminaria LED	36
3.10. THD total, Luminaria HPS.....	39
3.11. THD total, Luminaria LED.	40
3.12. Metodología P-Q	40
3.14.1. Sistema de Compensación basado en la Teoría P-Q	41
3.13. Especificación técnica de un filtro Activo.....	43
3.13.1. Sintonización del FAP	44
4. RESULTADOS	46
4.1. Resultados Método P-Q luminarias HPS	46
4.2. Resultados Método P-Q luminarias LED	70
4.3. Comparativa de resultados obtenidos	91
5. CONCLUSIONES.....	93
6. RECOMENDACIONES	95
7. BIBLIOGRAFIA	96

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 Medición de Distorsión Armónica en Acometida Individual.	18
Figura 2 Medición de Distorsión Armónica en Acometida Compartida.....	18
Figura 3 Tipos de FAP	20
Figura 4 Metodología para el análisis de armónicos y el diseño del FAP.	24
Figura 5. Red de Distribución conectado al alimentador 1500080T03.....	25
Figura 6. Alimentador 1500080T03 representado en la plataforma CYME.....	25
Figura 7. Nodo MTA_S_299878.....	27
Figura 8. Nodo MTA_S_87877.....	27
Figura 9. Nodo MTA_S_61155.....	28
Figura 10. Nodo MTA_S_331576.....	28
Figura 11. Nodo MTA_S_298959.....	29
Figura 12. Conexión del Transformador Monofásico.	30
Figura 13. Conexión 5 Luminarias	33
Figura 14. Conexión 10 Luminarias	33
Figura 15. Conexión 15 Luminarias	33
Figura 16. Diagrama de flujo Metodología PQ.....	41
Figura 17. Diagrama de control para filtro comandado por la Metodología PQ.....	45
Figura 18. Señal original en el dominio del tiempo.	46
Figura 19. Señal filtrada en el dominio del tiempo.	47
Figura 20. Señal en el dominio de la frecuencia.	48
Figura 21. Señal filtrada en el dominio de la frecuencia.	48
Figura 22. THD Antes y Después.	49
Figura 23. Señal original en el dominio del tiempo.	50
Figura 26. Señal filtrada en el dominio del tiempo.	50
Figura 25. Señal original en el dominio de la frecuencia.	51
Figura 26. Señal filtrada en el dominio de la frecuencia.	52
Figura 27. THD Antes y Después.	52
Figura 28. Señal original en el dominio del tiempo.	53
Figura 29. Señal filtrada en el dominio del tiempo.	54
Figura 30. Señal original en el dominio de la frecuencia.	54
Figura 31. Señal filtrada en el dominio de la frecuencia.	55
Figura 32. THD Antes y Después	56
Figura 33. Señal original en el dominio del tiempo.	57
Figura 34. Señal filtrada en el dominio del tiempo.	57
Figura 35. Señal original en el dominio de la frecuencia.	58
Figura 36. Señal original en el dominio de la frecuencia.	59
Figura 37 THD Antes y Después.	59
Figura 38. Señal original en el dominio del tiempo.	60
Figura 39. Señal filtrada en el dominio del tiempo.	61
Figura 40. Señal original en el dominio de la frecuencia.	62

Figura 41. Señal filtrada en el dominio de la frecuencia.....	62
Figura 42. THD Antes y Después.	63
Figura 43. Señal original en el dominio del tiempo.	64
Figura 46. Señal filtrada en el dominio del tiempo.	64
Figura 45. Señal original en el dominio de la frecuencia.	65
Figura 46. Señal original en el dominio de la frecuencia.	66
Figura 49. THD Antes y Después.	66
Figura 48. Señal original en el dominio del tiempo.	67
Figura 49. Señal filtrada en el dominio del tiempo.	68
Figura 50. Señal original en el dominio de la frecuencia.	68
Figura 51. Señal filtrada en el dominio de la frecuencia.	69
Figura 52. THD Antes y Después.	70
Figura 53. Señal original en el dominio del tiempo.	71
Figura 54. Señal filtrada en el dominio del tiempo.	71
Figura 55. Señal original en el dominio de la frecuencia.	72
Figura 56. Señal filtrada en el dominio de la frecuencia.	73
Figura 57. THD Antes y Después.	73
Figura 58. Señal original en el dominio del tiempo.	74
Figura 59. Señal original en el dominio del tiempo.	75
Figura 60. Señal original en el dominio de la frecuencia.	76
Figura 61. Señal original en el dominio de la frecuencia.	76
Figura 64. THD Antes y Después.	77
Figura 63. Señal original en el dominio del tiempo.	78
Figura 66. Señal filtrada en el dominio del tiempo.	78
Figura 65. Señal original en el dominio de la frecuencia.	79
Figura 66. Señal filtrada en el dominio de la frecuencia.	80
Figura 67. THD Antes y Después.	80
Figura 68. Señal original en el dominio del tiempo.	81
Figura 69. Señal filtrada en el dominio del tiempo.	82
Figura 70. Señal original en el dominio de la frecuencia.	83
Figura 73. Señal filtrada en el dominio de la frecuencia.	83
Figura 72. THD Antes y Después.	84
Figura 73. Señal original en el dominio del tiempo.	85
Figura 76. Señal original en el dominio del tiempo.	85
Figura 75. Señal original en el dominio de la frecuencia.	86
Figura 76. Señal filtrada en el dominio de la frecuencia.	87
Figura 77. THD Antes y Después.	87
Figura 78. Señal original en el dominio del tiempo.	88
Figura 79. Señal original en el dominio del tiempo.	89
Figura 80. Señal original en el dominio de la frecuencia.	90
Figura 83. Señal filtrada en el dominio de la frecuencia.	90
Figura 82. THD Antes y Después.	91

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Resumen de normativas.....	16
Tabla 2. Características del Transformador de distribución.....	29
Tabla 3. Potencia Nominal y Flujo Luminoso de luminarias LED y HPS.....	30
Tabla 4. Frecuencia y Magnitud Luminaria LED.....	31
Tabla 5. Frecuencia y Magnitud Luminaria HPS.....	32
Tabla 6. Armónico 3 luminarias HPS.....	34
Tabla 7. Armónico 5 luminarias HPS.....	34
Tabla 8. Armónico 7 luminarias HPS.....	35
Tabla 9. Armónico 9 luminarias HPS.....	35
Tabla 10. Armónico 11 luminarias HPS.....	35
Tabla 11. Armónico 13 luminarias HPS.....	36
Tabla 12. Armónico 15 luminarias HPS.....	36
Tabla 13. Armónico 3 luminarias LED.....	37
Tabla 14. Armónico 5 luminarias LED.....	37
Tabla 15. Armónico 7 luminarias LED.....	37
Tabla 16. Armónico 9 luminarias LED.....	38
Tabla 17. Armónico 11 luminarias LED.....	38
Tabla 18. Armónico 13 luminarias LED.....	38
Tabla 19. Armónico 14 luminarias LED.....	39
Tabla 20. Armónico 15 luminarias LED.....	39
Tabla 21. Comparación THD resultante de luminarias 5,10 y 15.....	40
Tabla 22. Comparación THD resultante de luminarias 5,10 y 15.....	40
Tabla 23. Especificaciones técnicas-filtro activo.....	44
Tabla 24. Comparación Metodología P-Q, Luminarias HPS.....	92
Tabla 25. Comparación Metodología P-Q, Luminarias LED.....	92

RESUMEN

El estudio busca mejorar la calidad de la energía eléctrica en la Empresa Eléctrica Riobamba S.A. (EERSA) reduciendo los armónicos de voltaje, componentes indeseables en los Sistemas Eléctricos de Potencia (SEP) que afectan la confiabilidad, seguridad y eficiencia del sistema. La investigación se centra en diseñar un filtro de potencia activa (FAP) utilizando el software CYMDIST para modelar y simular la red de distribución eléctrica. Mediante simulaciones en MATLAB/Simulink, se evaluó el desempeño del FAP en la reducción de armónicos, analizando diferentes nodos de la red de distribución con escenarios de carga y tipos de luminarias (LED y HPS). Usando la metodología P-Q, se calcularon la potencia activa y reactiva, diseñando filtros específicos para compensar los armónicos identificados. Los resultados mostraron una reducción significativa en la Distorsión Armónica Total (THD) tras la implementación del FAP, destacándose que, en uno de los nodos analizados, el THD se redujo de 9.48% a 1.51%. Las simulaciones demostraron que el uso de luminarias LED, en comparación con las de Sodio de Alta Presión (HPS), mejora notablemente la eficiencia energética y reduce los niveles de armónicos en la red. La implementación de FAP basados en la metodología P-Q es efectiva para cumplir con las normativas IEEE STD 519-2014 en términos de reducción de armónicos. Las luminarias LED no solo cumplen con los estándares de calidad de energía, sino que también ofrecen beneficios adicionales en términos de eficiencia energética y calidad de alumbrado. Este enfoque permitirá a la EERSA mejorar la calidad del suministro eléctrico, reduciendo pérdidas de energía y mejorando la confiabilidad del sistema.

Palabras clave: Armónicos de voltaje, Filtro de potencia activa (FAP), Distorsión Armónica Total (THD), Metodología P-Q, Luminarias LED, Calidad de energía eléctrica.

ABSTRACT

The study aims to improve the quality of electrical power at Empresa Eléctrica Riobamba S.A. (EERSA) by reducing voltage harmonics, which are undesirable components in Power Electrical Systems (PES) that affect the system's reliability, safety, and efficiency. The research focuses on designing an active power filter (APF) using CYMDIST software to model and simulate the electrical distribution network. Through simulations in MATLAB/Simulink, the performance of the APF in reducing harmonics was evaluated by analyzing different nodes of the distribution network under various load scenarios and types of luminaires (LED and HPS). Using the P-Q methodology, active and reactive power were calculated, and specific filters were designed to compensate for the identified harmonics. The results showed a significant reduction in Total Harmonic Distortion (THD) following the implementation of the APF, highlighting a reduction in one of the analyzed nodes from 9.48% to 1.51%. Simulations demonstrated that the use of LED luminaires, compared to High-Pressure Sodium (HPS) luminaires, significantly improves energy efficiency and reduces harmonic levels in the network. The implementation of APFs based on the P-Q methodology is effective in meeting IEEE STD 519-2014 standards for harmonic reduction. LED luminaires not only comply with energy quality standards but also offer additional benefits in terms of energy efficiency and lighting quality. This approach will allow EERSA to enhance the quality of electrical supply, reduce energy losses, and improve system reliability.

Keywords: Voltage harmonics, Active power filter (APF), Total Harmonic Distortion (THD), P-Q methodology, LED luminaires, Electrical power quality.

1. INTRODUCCIÓN

En la actualidad, la era moderna sobre la electrificación, los SEP (Sistemas Eléctricos de Potencia) son plenamente esenciales para reforzar el funcionamiento de la sociedad en la que vivimos. Sin embargo, el punto negativo que se presenta es la presencia de armónicos que surgen en los SEP dando como resultados varios problemas principales que afectan a su confiabilidad, seguridad y eficiencia [1][2]. Cada fase de cualquier proceso que se encuentra relacionado con la energía eléctrica debe ser perpetuamente eficiente [3].

Iniciando como base por la generación en centrales eléctricas, la energía es transportada en margen a líneas de transmisión sobre un recorrido de finalización en puntos de consumo. La finalización de esta etapa sobre la distribución es sumamente importante debido a la relación directa con la demanda de energía [4].

El sector eléctrico enfrenta en la actualidad el reto de reducir costos y ofrecer energía eficiente y de calidad. Las empresas de distribución tienen como ámbito principal encontrar soluciones a los altos costos que aparecen por las extensiones de redes de transmisión y pérdidas técnicas y no técnicas de los sistemas eléctricos de potencia. La demanda de recursos económicos, técnicos y humanos son esenciales para el crecimiento de confiabilidad en los sistemas eléctricos, con la implementación de cargas especiales e incorporación de tecnologías actuales como micro-redes, vehículos eléctricos y generación de distribución [5] [6].

El estudio y gestiones eficientes sobre las nuevas tecnologías es trascendental para la optimización de recursos, crecimiento de la confiabilidad para un mejor servicio evitando penalizaciones para empresas de distribución y dando mayor eficacia de un servicio convincente para los usuarios [3].

Estudios del INEC (Instituto Ecuatoriano de Estadísticas y Censos) revelo que el 31.7% de la población en el Ecuador no posee y carece de energía eléctrica, este resultado se basa en que existen áreas remotas alejadas de sectores donde no se encuentran centrales de generación convencionales [7]. Realizar estudios que solventen soluciones para extender redes eléctricas a estas zonas alejas de puntos de generación convencional y adaptarlas a las infraestructuras adecuadas de generación es costoso y desafiante. En ese

escenario la generación de distribución es indispensable para dar solución a las zonas afectadas que no poseen energía, promoviendo el desarrollo económico, mejoramiento sobre la calidad de vida y crecimiento socioeconómico en estas áreas desatendidas.

En la literatura científica, se encuentran diversos artículos que abordan la problemática de los armónicos en sistemas eléctricos, ofreciendo soluciones parciales a este desafío. Estos estudios han explorado múltiples enfoques, desde el uso de filtros pasivos hasta la implementación de técnicas avanzadas de control de potencia activa. A continuación, se detallan los trabajos más relevantes en este campo, destacando sus contribuciones, limitaciones, y estableciendo el contexto para el desarrollo del presente estudio.

El estudio descrito por [8] busca reducir la cantidad de armónicos en sistemas eléctricos mediante el uso de un filtro de potencia activa. Para ello, los investigadores emplearon Matlab/Simulink con el propósito de simular un filtro que inyecta una forma de onda inversa del componente armónico en una señal distorsionada, con la finalidad de disminuir su contenido armónico. Los resultados demostraron una reducción significativa de la distorsión armónica total en la corriente fuente, reduciéndose del 19.5% al 0%. Este logro cumple con el estándar IEEE STD. 519-1992 para armónicos.

Por su parte, en la investigación descrita [9] se centró en la reducción de los armónicos en líneas de potencia mediante el uso de un filtro de respuesta finita (FIR). Para ello, se modeló un sistema destinado a generar señales de compensación y pulsos de conmutación para el filtro activo utilizando Matlab/Simulink. Los resultados obtenidos con y sin la implementación del filtro fueron comparados. Los hallazgos demostraron una reducción significativa de la distorsión armónica, pasando del 17.77% al 0.87%. Asimismo, se observó una mejora del 95% en la corriente, el voltaje y el factor de potencia del sistema.

Asimismo, en el estudio detallado en [10] se implementó filtros activos en el control del convertidor conectado a la red de turbinas eólicas tipo IV, con el objetivo de reducir la amplificación de armónicos de voltaje en plantas de energía eólica offshore. Mediante el uso del teorema del elemento extra para ajustar los filtros activos y determinar el margen de estabilidad, se logró suprimir los armónicos de voltaje tanto del convertidor como de la red. Los resultados mostraron que los niveles de armónicos se mantuvieron por debajo

de los valores planificados en una planta de 270 MW, demostrando la eficacia de la metodología aplicada.

Del mismo modo, en la investigación descrita en [11] se busca reducir los armónicos de corriente en sistemas de centros de datos utilizando Filtros de Potencia Activa de Derivación (SAPF). Para ello, se emplearon componentes activos, tales como IGBT o MOSFET, en combinación con componentes pasivos R, L y C, y se realizaron dos simulaciones. En la primera simulación, el filtro se utilizó exclusivamente para reducir los armónicos de corriente, mientras que en la segunda también se actuó sobre el componente reactivo de la corriente. La técnica empleada incluyó un inversor de fuente de voltaje (VSI) y un filtro LCL para atenuar la señal a la frecuencia de conmutación. Los resultados de las simulaciones demostraron que la aplicación del SAPF mejoró significativamente la calidad de la energía, al reducir tanto la distorsión armónica total como el rizado de corriente.

Por otro lado, en el estudio descrito en [12] pretende mitigar los armónicos de voltaje y corriente en una carga industrial no lineal. Para lo cual, se utiliza un Filtro Armónico Activo (AHF), debido a la alta distorsión de la forma de onda y el rápido cambio en su espectro, lo cual hace inviable el uso de soluciones de filtros pasivos o híbridos. Se selecciona y conecta un AHF de 300 A en paralelo a la carga, en la parte de baja tensión de la instalación. La técnica empleada implica un análisis detallado de los principales parámetros de calidad de energía en los terminales de la carga industrial antes y después de la instalación del AHF. Los resultados muestran que el filtro logra reducir de manera constante los armónicos de corriente y voltaje, manteniéndolos dentro de los límites prescritos por las normas y regulaciones actuales, mejorando así la calidad de energía en la instalación industrial.

También, en el estudio desarrollado en [13] investiga cómo el voltaje en el lado de corriente continua (DC) de los filtros de potencia activa afecta la compensación armónica en sistemas eléctricos. Para lo cual, se utilizan simulaciones en Matlab/Simulink con el fin de analizar este efecto. La técnica consiste en ajustar el voltaje del lado de corriente continua del filtro activo y observar cómo esto influye en la reducción de la distorsión armónica de la corriente. Los resultados muestran que un voltaje adecuado en el lado de corriente continua es esencial para mejorar el rendimiento del filtro en la compensación

de armónicos, demostrando que una correcta gestión de este voltaje puede optimizar significativamente la calidad de la energía en sistemas con cargas no lineales.

Por otro lado, en la investigación propuesta en [14] se pretende mejorar la calidad de la energía en líneas de distribución mediante el uso de Filtros de Potencia Activa en Serie (SAPF). Con este fin, se emplean SAPF para reducir armónicos y compensar distorsiones de voltaje, tales como caídas y flicker. La técnica utilizada consiste en la inyección de voltaje en la línea para mitigar las distorsiones. Por lo cual, los SAPF se implementan principalmente en sistemas eléctricos de baja y media tensión, donde inyectan voltaje con el propósito de minimizar la distorsión armónica total (THD). Los resultados obtenidos demuestran que el uso de SAPF reduce significativamente los armónicos y mejora la calidad de la energía, cumpliendo así con los estándares de calidad de energía establecidos.

Asimismo, en el estudio expuesto en [15] se busca reducir la distorsión armónica total (THD) en redes de distribución de baja tensión, mediante la utilización de un Filtro de Potencia Activa Unificado (UAPF), el cual, se alimenta por generación fotovoltaica. Con este propósito, se implementa un sistema que combina un UAPF con un convertidor boost, utilizando Matlab/Simulink para modelar y simular el sistema. La técnica aplicada consiste en colocar una carga no lineal en el séptimo bus-bar del sistema IEEE de 13 barras y emplear el UAPF para reducir los armónicos de corriente y voltaje. Por lo tanto, los resultados obtenidos muestran que la distorsión armónica total de corriente (THDi) y de voltaje (THDv) se reduce a 6% y 3%, respectivamente, cumpliendo con las normativas ARCERNR-017/2020 y los estándares IEEE 1159.

Por su parte, en la investigación propuesta en [16] se establece mejorar la calidad de energía en sistemas eléctricos mediante la reducción de armónicos, utilizando un Filtro de Potencia Activa de Derivación (SAPF). Por lo tanto, se empleó un modelo de Simulink para simular el sistema y comparar los resultados con y sin el uso del filtro. La técnica aplicada incluyó el uso de un controlador PI para regular el voltaje del capacitor de enlace de DC y un filtro de derivación para reducir la distorsión armónica total (THD). Consecuentemente, los resultados mostraron que la implementación del SAPF mejoró significativamente la calidad de energía al reducir los armónicos a niveles permisibles

según los estándares IEEE, demostrando así la eficacia del filtro en la mejora de la calidad de energía en instalaciones eléctricas.

Por último, en la investigación detallada en [17] se plantea reducir los armónicos en un sistema de tres barras IEEE mediante la utilización de filtros de potencia híbridos. Para lograr este objetivo, se empleó un filtro de potencia híbrido que combina un filtro pasivo en serie con un filtro activo, permitiendo compensar la potencia reactiva y mitigar la corriente armónica. La técnica involucró el uso de simulaciones para probar el sistema bajo diferentes condiciones operativas, comparando el rendimiento de un filtro pasivo de derivación con el de un filtro híbrido de derivación. Los resultados demostraron que el filtro híbrido redujo significativamente la distorsión armónica total de corriente, disminuyendo de 29.85% a 0.78%, lo cual mejoró el rendimiento del sistema bajo diversas condiciones operativas.

Una vez analizados los estudios similares, se evidencia que se utilizan diversas técnicas para mitigar los armónicos en sistemas eléctricos, tales como filtros activos, filtros pasivos y combinaciones híbridas. Estos enfoques han demostrado efectividad en la reducción de la distorsión armónica; sin embargo, cada uno presenta limitaciones particulares en cuanto a eficiencia y aplicabilidad bajo diferentes condiciones operativas. Por ejemplo, los filtros pasivos son efectivos pero inflexibles ante variaciones de carga, mientras que, los filtros activos ofrecen mayor adaptabilidad a un costo más elevado. Además, las soluciones híbridas, aunque combinan ventajas de ambos tipos de filtros, pueden ser complejas de implementar y mantener, lo que añade un nivel de dificultad adicional a su uso.

En contraste, la presente investigación propone el diseño de un filtro activo que permita mejorar la calidad de energía en la EERSA. Este proyecto empleará el software CYMDIST para implementar modelos específicos que permitan una identificación precisa de las causas de los problemas de calidad de energía. Asimismo, se realizará un análisis detallado mediante el software CYMDIST, la cual posee los paquetes base para el análisis del sistema de distribución del software CYME. A través de análisis de datos, estudios y simulaciones, se buscará reducir los armónicos, cumpliendo con la Regulación No. ARCERNNR-002-20. Este enfoque no solo apunta a mejorar la calidad del

suministro eléctrico, sino que también pretende ofrecer soluciones correctivas específicas basadas en un análisis detallado y contextualizado del sistema de distribución.

1.1. Planteamiento del problema

La EERSA ha detectado problemas en todo su sistema de distribución que afectan directamente a todos sus abonados y generan pérdidas de recursos tanto económicos como ambientales. Las áreas con problemas detectados son: calidad de energía, protecciones, aislamiento, electromovilidad, micro-redes y generación distribuida, cargabilidad de transformadores, diseño de subestaciones, confiabilidad y soterramiento de redes eléctricas [18].

Las frecuencias armónicas en la red eléctrica de distribución son una causa de problemas de calidad de la energía que resulta en un aumento del calentamiento en los equipos y conductores, fallas en los variadores de velocidad y pulsaciones de torque en los motores [19]. Finalmente, la energía consumida por los armónicos y que es desperdiciada es también facturada generando pérdida de recursos no renovables como es la energía eléctrica.

1.2. Alcance

Al desarrollar el proyecto denominado Análisis de armónicos de voltaje usando campaña de medidas para el diseño de un filtro activo que permita mejorar la calidad de energía en la EERSA. Se contribuye con el mejoramiento del suministro eléctrico que beneficia a toda la población y comunidades.

Al mismo tiempo el presente proyecto permitirá reducir los armónicos que generan pérdidas de energía, para el estudio de estos casos implementaremos los modelos generados en la plataforma informática CYMDIST la cual posee los paquetes base para el análisis del sistema de distribución del software CYME.

Con la plataforma CYMDIST se busca mejorar la calidad de energía eléctrica, identificando las causas que originan los problemas en base a la Regulación No.

ARCERNNR-002-20 a través de análisis de datos, estudios y simulaciones para la presentación de una propuesta de mejoramiento y correctivos.

1.3. Objetivo Principal

- Disminuir la distorsión armónica total THD enfocado en los armónicos de voltaje correspondiente a la calidad del producto en la subestación 8 de la EERSA basado en campaña de medidas para mejorar la calidad de energía del servicio eléctrico de distribución y comercialización.

1.4. Objetivos específicos

- Analizar los diagramas unifilares y verificación de los elementos como alimentadores, transformadores, equipos de protección y seccionamiento que componen redes eléctricas de distribución del alimentador 1500080T03 de la subestación 8.
- Realizar campaña de medidas de los armónicos en diferentes puntos de la red de distribución.
- Verificar los parámetros se cumplen y cuales no en función de la Regulación No. ARCERNNR-002-20.
- Simular diferentes escenarios para corrección de armónicos y seleccionar la mejor alternativa a implementar.

2. MARCO TEORICO

2.1. Definición y Origen de los Armónicos

En los sistemas eléctricos, los armónicos se definen como componentes sinusoidales de una señal periódica cuya frecuencia es un múltiplo entero de la frecuencia base. La distorsión de la onda sinusoidal ideal, provocada por cargas no lineales, genera estos armónicos. Un armónico de orden n posee una frecuencia que es n veces la frecuencia fundamental. Por ejemplo, con una frecuencia base de 50 Hz, el segundo armónico tendrá 100 Hz, el tercero 150 Hz, y así sucesivamente. La combinación de estos armónicos con la señal fundamental da lugar a una forma de onda distorsionada que puede perjudicar la calidad de la energía en un sistema eléctrico [20].

El aumento de dispositivos y cargas no lineales en los sistemas eléctricos modernos es la principal causa de los armónicos. Equipos electrónicos de potencia, como convertidores de frecuencia, fuentes de alimentación ininterrumpida (UPS), computadoras y otros dispositivos digitales, representan ejemplos típicos de cargas no lineales. Estos equipos no consumen corriente de forma sinusoidal pura, sino en pulsos, generando diversas frecuencias armónicas. Asimismo, el funcionamiento de maquinaria industrial, como hornos de arco eléctrico y variadores de velocidad, también contribuye significativamente a la generación de armónicos en la red eléctrica [21].

Además, los armónicos no solo se originan en los equipos que consumen energía, sino que también pueden ser introducidos por la infraestructura del sistema eléctrico. Componentes como transformadores y cables de transmisión, especialmente en condiciones de saturación o carga desequilibrada, pueden producir distorsiones armónicas. Adicionalmente, la conmutación de dispositivos electrónicos de potencia y el uso de componentes pasivos como condensadores y bobinas pueden resonar con ciertas frecuencias armónicas, amplificando su presencia en el sistema [22].

El impacto de los armónicos en los sistemas eléctricos es significativo y multifacético. Estos pueden causar sobrecalentamiento en conductores y equipos, aumentar las pérdidas de energía, interferir con el funcionamiento de dispositivos sensibles y reducir la

eficiencia general del sistema eléctrico. Además, los armónicos pueden dañar capacitores y transformadores debido a resonancias y sobrecargas térmicas [23]. Por lo tanto, es esencial identificar las fuentes de armónicos y aplicar métodos efectivos para su mitigación, asegurando así la estabilidad y eficiencia operativa de los sistemas eléctricos modernos [24].

2.2. Efectos de los armónicos en la calidad de energía

Uno de los principales problemas causados por los armónicos es el sobrecalentamiento de los conductores y equipos eléctricos. Los armónicos hacen que la corriente en los sistemas eléctricos tenga múltiples componentes de alta frecuencia, lo que incrementa las pérdidas por efecto Joule, provocando un calentamiento excesivo. Este sobrecalentamiento puede reducir la vida útil de los equipos y aumentar el riesgo de fallos. Los transformadores, en particular, son susceptibles al sobrecalentamiento inducido por armónicos, lo que puede acelerar la degradación del aislamiento y disminuir la eficiencia operativa [20].

Además del sobrecalentamiento, los armónicos pueden causar la sobrecarga de los neutros en sistemas de distribución eléctrica. En sistemas trifásicos equilibrados, la corriente en el neutro debería ser mínima. No obstante, la presencia de armónicos, especialmente los de tercer orden (triplen), puede hacer que las corrientes en el neutro se sumen en lugar de cancelarse, resultando en una corriente significativa. Esta sobrecarga puede dañar los conductores del neutro y aumentar las pérdidas del sistema. Asimismo, la sobrecarga del neutro puede ocasionar problemas de seguridad, como el riesgo de incendios eléctricos y la interrupción del suministro eléctrico [25].

Los armónicos también afectan negativamente a los capacitores de corrección del factor de potencia. Estos capacitores están diseñados para operar a frecuencias específicas, generalmente la frecuencia fundamental de 50 o 60 Hz. Sin embargo, cuando están expuestos a corrientes armónicas, pueden resonar a ciertas frecuencias, amplificando los efectos de los armónicos. Esto puede causar sobrecarga térmica y daños prematuros a los capacitores, así como reducir su efectividad en la corrección del factor de potencia. Este

fenómeno se conoce como resonancia armónica y puede ser particularmente dañino en sistemas industriales con altas concentraciones de cargas no lineales [21].

Otro efecto importante de los armónicos es la interferencia con la operación de dispositivos electrónicos sensibles. Los armónicos pueden distorsionar la forma de onda del suministro eléctrico, interfiriendo con el funcionamiento de equipos de control, comunicaciones y automatización. Por ejemplo, los sistemas de control basados en microprocesadores pueden funcionar de manera errática o fallar debido a las interferencias electromagnéticas causadas por los armónicos. Adicionalmente, los armónicos pueden causar errores en la medición de energía y afectar la precisión de los equipos de medición, resultando en facturaciones incorrectas [9].

2.3. Calidad de energía

La calidad de la energía se refiere a la capacidad de un sistema eléctrico para suministrar energía de forma constante y sin interrupciones, manteniendo parámetros específicos dentro de rangos aceptables. Los parámetros esenciales de la calidad de energía incluyen la distorsión armónica total (THD), el factor de potencia, las variaciones de tensión, las fluctuaciones de frecuencia, los parpadeos (flicker) y los desequilibrios de tensión. La distorsión armónica total indica el grado en que una onda de tensión o corriente se desvía de su forma sinusoidal ideal debido a la presencia de armónicos. Además, el factor de potencia mide la eficiencia con la que la energía eléctrica se convierte en trabajo útil, y un factor de potencia bajo sugiere una operación ineficiente del sistema. Por otro lado, las variaciones de tensión, como caídas (sags) y picos (swells), pueden dañar equipos eléctricos sensibles y causar pérdida de datos [26].

Las fluctuaciones de frecuencia, aunque menos frecuentes en sistemas bien regulados, pueden afectar el rendimiento de los equipos eléctricos, especialmente aquellos diseñados para operar a frecuencias específicas. Asimismo, los parpadeos de tensión, que resultan de fluctuaciones rápidas y repetitivas en la tensión de suministro, pueden ser visualmente perceptibles y afectar la comodidad, así como, la productividad de los usuarios. El desequilibrio de tensión ocurre cuando las tensiones de las fases no son iguales en magnitud o no están desfasadas adecuadamente, lo cual puede llevar al

sobrecalentamiento de motores y otros equipos trifásicos. Mantener estos parámetros dentro de límites aceptables es crucial para garantizar la eficiencia operativa, la seguridad y la durabilidad de los equipos eléctricos, así como para minimizar interrupciones en la producción y los servicios [27].

2.3.1. Nivel de Voltaje

La calidad del nivel de voltaje se evalúa mediante la variación del voltaje de suministro respecto al voltaje nominal en un punto del sistema de distribución. Esta variación se calcula mediante la ecuación 1.

$$\Delta V_k = \frac{V_k - V_n}{V_n} * 100\% \quad (1)$$

En este sentido, V_k es el voltaje de suministro en el punto k , determinado como el promedio de las medidas registradas en intervalos de 10 minutos, y V_n es el voltaje nominal en el punto V_n . Los rangos de voltaje permitidos son: $\pm 5.0\%$ para alto voltaje, $\pm 6.0\%$ para medio voltaje, y $\pm 8.0\%$ para bajo voltaje. Para cumplir con este índice, el 95% o más de los registros deben estar dentro de los límites establecidos durante un periodo de evaluación mínimo de siete días continuos. Estos límites aseguran que la calidad del voltaje entregado a los usuarios sea consistente y dentro de los estándares aceptables, evitando problemas de sobrecarga y subcarga en los sistemas eléctricos [28].

2.3.2. Perturbación Rápida de Voltaje (Flicker)

La severidad de flicker de corta duración (P_{st}) se mide para evaluar las variaciones periódicas de amplitud de voltaje. Esta severidad se calcula utilizando la ecuación 2.

$$P_{st} = 0.0314P_{0.1} + 0.0525P_1 + 0.0657P_3 + 0.28P_{10} + 0.08P_{50} \quad (2)$$

En este contexto, P_x son los niveles de efecto flicker que se sobrepasan durante el x% del tiempo del intervalo de medición. El valor límite para P_{st} es 1, lo que corresponde al umbral de irritabilidad perceptible por el ojo humano. El 95% o más de los valores registrados deben ser menores al límite establecido durante al menos siete días continuos. Este índice es esencial para mantener la estabilidad y confort visual, especialmente en instalaciones residenciales e industriales donde las variaciones de voltaje pueden ser perceptibles y molestas [29].

2.3.3. Distorsión Armónica de Voltaje

La distorsión armónica individual y total de voltaje se evalúan mediante las siguientes ecuaciones.

$$V_{h,k} = \sqrt{\frac{1}{200} \sum_{i=1}^{200} (V_{h,i})^2} \quad (3)$$

$$DV_{h,k} = \frac{V_{h,k}}{V_{l,k}} * 100\% \quad (4)$$

$$THD_k = \sqrt{\sum_{h=2}^{50} \left(\frac{V_{h,k}}{V_{l,k}} \right)^2} * 100\% \quad (5)$$

En este sentido, $V_{h,k}$ es la armónica de voltaje h en el intervalo k de 10 minutos y $V_{l,k}$ es el valor eficaz de la componente fundamental de voltaje. Los límites para el factor de distorsión armónica individual y total son: 8.0% para bajo voltaje, 5.0% para medio voltaje, 2.5% para alto voltaje grupo 1, y 1.5% para alto voltaje grupo 2. Estos límites garantizan que la forma de onda de voltaje se mantenga lo más cercana posible a una sinusoidal pura, reduciendo el riesgo de daño a los equipos y mejorando la eficiencia energética [30].

2.3.4. Desequilibrio de Voltaje

Este parámetro se determina utilizando el siguiente índice.

$$\text{Desequilibrio de Voltaje} = \frac{V_2}{V_1} * 100\% \quad (2)$$

En este contexto, V_2 es la componente de secuencia negativa de voltaje y V_1 es la componente de secuencia positiva de voltaje, ambos promediados sobre intervalos de 10 minutos. El límite máximo permitido para el desequilibrio de voltaje es de 2% para todos los niveles de voltaje. El 95% o más de los valores registrados deben cumplir con este límite durante un periodo de evaluación de al menos siete días continuos. Mantener el desequilibrio de voltaje bajo control es esencial para evitar problemas operativos en los equipos eléctricos, especialmente motores y transformadores, que pueden sufrir daños o funcionar de manera ineficiente debido a desequilibrios prolongados [31].

2.3.5. Normativas y Estándares de Calidad de Energía

Existen varios estándares internacionales que establecen límites permisibles para garantizar una calidad de energía adecuada. Uno de los más reconocidos es la norma IEEE 519-1992, que ofrece guías detalladas sobre los niveles aceptables de distorsión armónica en sistemas eléctricos. Esta norma especifica los límites de distorsión armónica total para tensiones y corrientes. También, esta es ampliamente utilizada para diseñar y evaluar la calidad de energía en instalaciones industriales, así como, comerciales. Además de IEEE 519, la Comisión Electrotécnica Internacional (IEC) ha desarrollado una serie de normas, como la IEC 61000, que abordan varios aspectos de la compatibilidad electromagnética (EMC), incluyendo la inmunidad a perturbaciones armónicas y la emisión de armónicos por equipos eléctricos [32].

Además de los estándares internacionales, las normativas locales también son fundamentales para la regulación de la calidad de energía. En Ecuador, por ejemplo, la Agencia de Regulación y Control de Energía y Recursos Naturales No Renovables (ARCERNNR) ha establecido la Regulación Nro. ARCERNNR 002/20, que define los

requisitos de calidad del servicio de distribución y comercialización de energía eléctrica (ver Tabla 1). Esta regulación establece los indicadores, índices y límites de calidad, así como los procedimientos de medición, registro y evaluación que deben cumplir las empresas eléctricas de distribución y los consumidores. La normativa cubre aspectos como el nivel de voltaje, perturbaciones rápidas de voltaje (flicker), distorsión armónica de voltaje y desequilibrio de voltaje, asegurando que la calidad de energía se mantenga dentro de los estándares necesarios para la operación segura y eficiente del sistema eléctrico [33].

La implementación, así como, el cumplimiento de estas normativas y estándares son esenciales para garantizar que los sistemas eléctricos funcionen de manera eficiente y segura. De esta manera se minimiza los riesgos de daños a los equipos y se asegura un suministro de energía estable y confiable. Las empresas eléctricas y los diseñadores de sistemas deben tener en cuenta estos estándares durante la planificación, diseño y operación de los sistemas eléctricos para evitar problemas de calidad de energía. Además, es esencial realizar auditorías periódicas y monitoreo continuo para asegurarse de que los sistemas cumplan con las normativas vigentes. El uso de equipos de monitoreo de calidad de energía puede ayudar a identificar y mitigar problemas antes de que causen daños significativos, mejorando así la fiabilidad y eficiencia de los sistemas eléctricos [34].

Tabla 1. Resumen de normativas.

Normativa	Parámetro	Límite
IEEE 519-1992	Distorsión armónica total (THD)	$\leq 5\%$ (para sistemas ≤ 69 kV)
IEC 61000-4-30	Variaciones de tensión (sags)	Profundidad y duración según clases de eventos
IEC 61000-4-30	Parpadeo (flicker)	Índice de flicker ≤ 1.0
ARCERNNR 002/20	Nivel de voltaje	$\pm 10\%$ del voltaje nominal
ARCERNNR 002/20	Distorsión armónica de voltaje	$\leq 8\%$ (para armónicos individuales $\leq 3\%$)
ARCERNNR 002/20	Desequilibrio de voltaje	$\leq 2\%$

Fuente: Autor

2.3.6. Instrumentos de medida.

En sistemas eléctricos con armónicos, los instrumentos de medida pueden perder precisión y sufrir daños, afectando su funcionalidad y fiabilidad. Los instrumentos digitales de entrada rectificadora, los dinamómetros, los medidores de valor efectivo y los dispositivos especializados en medir armónicos son algunos de los más afectados. Los instrumentos digitales de entrada rectificadora tienen entradas que rectifican la onda medida, permitiendo verificar su precisión cuando la onda sinusoidal es perfecta. Sin embargo, en presencia de armónicos, la precisión de estos instrumentos se compromete significativamente, afectando la calidad de las mediciones [35].

Los dinamómetros, diseñados para medir el valor más efectivo de una onda sinusoidal, enfrentan dificultades cuando se encuentran con armónicos generados por inductancias. La precisión de estos dispositivos puede verse afectada debido a sus componentes mecánicos, que tienden a descalibrarse con el uso repetido. Los instrumentos de valor efectivo, que son digitales y funcionan mediante sensores que registran niveles de temperatura a través de resistencias, también sufren impactos por la distorsión armónica. Aunque están diseñados para medir corrientes o voltajes, incluyendo armónicos, su exactitud disminuye cuando hay distorsión en las señales [36].

La medición específica de armónicos se realiza con dispositivos diseñados para detectar estas frecuencias en la corriente o el voltaje. Estos instrumentos presentan los datos en pantallas digitales, mostrando valores fundamentales y efectivos de los armónicos detectados. Además, para evaluar los niveles de armónicos, es esencial implementar acometidas que suministren energía al usuario, permitiendo la alimentación de puntos específicos denominados usuarios finales (ver Figura 1). Estos instrumentos permiten monitorear y controlar la calidad de la energía, asegurando que los niveles de armónicos se mantengan dentro de límites aceptables para prevenir daños en los equipos y mejorar la eficiencia del sistema (ver Figura 2) [37].

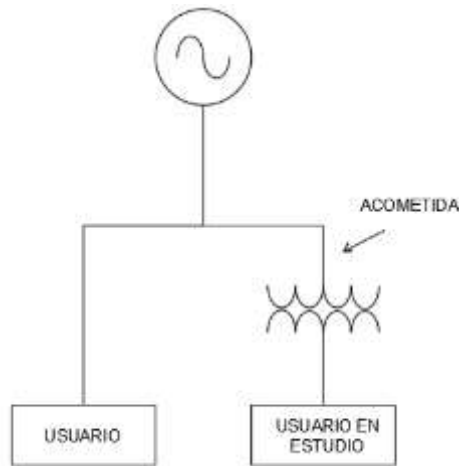


Figura 1 Medición de Distorsión Armónica en Acometida Individual.

Fuente: [37]

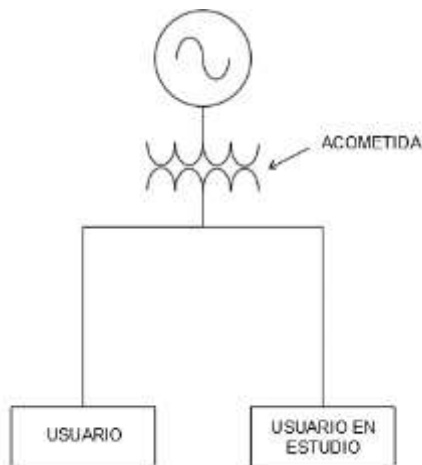


Figura 2 Medición de Distorsión Armónica en Acometida Compartida

Fuente: [37]

2.4. Métodos de mitigación de armónicos

La mitigación de armónicos en sistemas eléctricos es crucial para optimizar la calidad de energía y la eficiencia operativa. Entre los métodos más utilizados se encuentran los filtros pasivos, activos e híbridos. Los filtros pasivos, que emplean componentes como resistencias, inductancias y capacitores, son efectivos y económicos; sin embargo, su principal desventaja es la falta de adaptabilidad a los cambios en las condiciones del sistema. En contraste, los filtros activos utilizan electrónica de potencia para generar señales que contrarrestan los armónicos presentes, ofreciendo una solución altamente adaptable pero más costosa. Por otro lado, los filtros híbridos combinan las ventajas de

ambos tipos, utilizando componentes pasivos para las frecuencias bajas y activos para las altas, proporcionando una mitigación más completa y eficiente. La elección del método adecuado depende de las características específicas del sistema y los requisitos de mitigación, garantizando una operación segura y eficiente del sistema eléctrico [38].

2.4.1. Filtros activos de potencia

Para analizar los armónicos eléctricamente, se utiliza el estudio de las series de Fourier. Un enfoque eficaz para mitigar estos armónicos son los filtros activos de potencia (FAP), los cuales se pueden conectar tanto en paralelo como en serie con respecto a la carga. Estos filtros funcionan como una fuente controlada de corriente cuando están conectados en paralelo, o como una fuente de voltaje cuando están conectados en serie. Los FAP están compuestos por un modulador de ancho de pulso (PWM), una fuente inversora de tensión o corriente, y un controlador basado en técnicas de compensación [19], [20].

El funcionamiento de un FAP implica primero la obtención de las señales a medir mediante transformadores de medición, que ajustan las magnitudes de voltaje y corriente en baja y media tensión. Estas señales luego pasan por un proceso de transformación, que puede incluir la transformada de Clarke o el teorema de la conductancia equivalente, para obtener nuevas referencias necesarias para calcular las magnitudes de compensación en términos de tensión o corriente. Este proceso asegura que las señales de entrada sean precisas y adecuadas para el análisis y la compensación posterior [41].

Posteriormente, el modulador PWM recibe las señales de compensación y las de referencia, comparándolas para emitir pulsos. Las señales emitidas por el modulador son recibidas por la fuente inversora conectada a la red, encargada de proporcionar la corriente o voltaje necesario para estabilizar las fluctuaciones armónicas y, por ende, la forma de onda. Este proceso permite que el sistema eléctrico mantenga una forma de onda más cercana a la ideal, reduciendo así la distorsión armónica y mejorando la calidad de energía suministrada [42] [43].

Hay varios tipos de FAP, siendo los más importantes en términos de compensación en el lado de CA: el filtro activo shunt, el filtro activo serie y el filtro activo híbrido (ver Figura 3). El filtro activo shunt se conecta en paralelo con la carga a compensar, generando

corrientes de compensación que se inyectan directamente en el sistema. Por otro lado, el filtro activo serie utiliza un transformador en serie con la carga y genera voltajes de compensación suministrados a través del transformador de acople. Finalmente, el filtro activo híbrido combina funciones de filtros activos y pasivos, lo que le permite ser más eficiente que los otros tipos mencionados, ofreciendo una solución más completa y adaptable para la mitigación de armónicos en diversas condiciones operativas [25], [29].

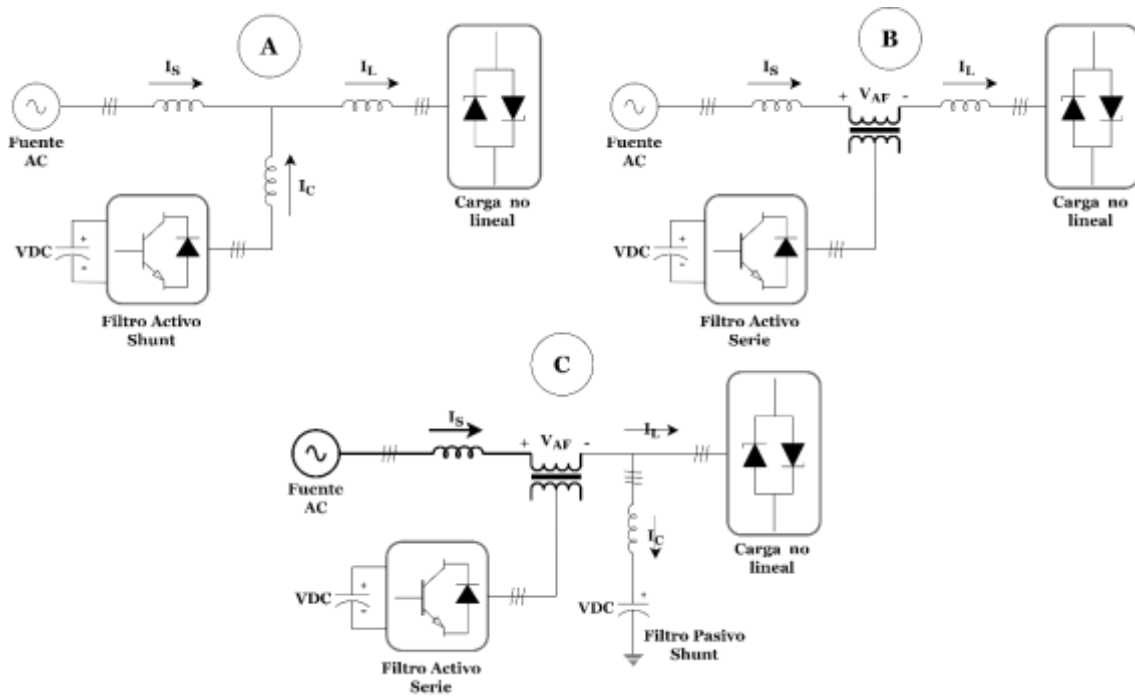


Figura 3 Tipos de FAP

Fuente: [37]

2.5. Luminarias para alumbrado público

Durante las últimas décadas, la industria de la iluminación ha visto un cambio notable con la adopción de lámparas LED en lugar de lámparas incandescentes y fluorescentes. Las lámparas incandescentes y fluorescentes sufrían grandes pérdidas de energía debido a los procesos de descarga. En contraste, las lámparas LED, que utilizan material semiconductor, transforman la electricidad en luz de manera más eficiente, mejorando significativamente la eficiencia energética y reduciendo el consumo de electricidad [49].

Otro aspecto positivo de las lámparas LED es su larga vida útil en comparación con las incandescentes y fluorescentes, lo que disminuye la necesidad de reemplazos frecuentes y reduce la generación de residuos electrónicos [50]. Aunque la inversión inicial en tecnología LED es mayor, esta se ha convertido en la opción preferida en los sectores comercial e industrial debido a sus beneficios económicos a largo plazo, como el ahorro en costos de energía y mantenimiento [51].

La adopción generalizada de tecnología LED también ha contribuido significativamente a la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero, al disminuir la demanda de energía proveniente de combustibles fósiles [52]. Además, la iluminación LED proporciona una mejor calidad de luz, con opciones para ajustar la intensidad y el color según las necesidades específicas, mejorando la comodidad y productividad en entornos laborales y residenciales [53].

2.6. LED

Para que las luminarias LED funcionen correctamente, es necesario convertir la corriente alterna de entrada en un voltaje de corriente continua menor mediante un convertidor. Este proceso no solo regula el voltaje, sino que también controla la corriente aplicada a los LED [54]. Los convertidores utilizados en las luminarias LED están integrados con un controlador que monitorea la corriente, la distorsión armónica y el factor de potencia de la corriente de entrada.

El controlador es vital para asegurar el funcionamiento eficiente y estable de los LED, ajustando continuamente las condiciones eléctricas para optimizar el rendimiento de las luminarias. Su capacidad para reducir la distorsión armónica mejora la calidad de la energía y minimiza los efectos negativos en otros equipos conectados al mismo sistema eléctrico [55]. Además, estos controladores permiten un control preciso del brillo y la intensidad de la luz emitida por los LED, ofreciendo así una mayor flexibilidad y personalización en la iluminación.

El uso de convertidores y controladores en las luminarias LED no solo aumenta la eficiencia energética, sino que también prolonga la vida útil de los componentes al protegerlos contra fluctuaciones y sobrecargas eléctricas. Estas tecnologías avanzadas son

fundamentales para maximizar los beneficios de las luminarias LED, en términos de ahorro energético y sostenibilidad ambiental. En resumen, la conversión y control adecuados de la corriente eléctrica son cruciales para el rendimiento óptimo y la durabilidad de las luminarias LED [49].

2.7. HPS

Las luminarias HPS no requieren corriente continua, pero dependen de otros componentes como condensadores, encendedores y un balastro electromagnético para su funcionamiento. El principal propósito del balastro electromagnético es regular el flujo de corriente en una lámpara HPS, evitando así un aumento abrupto de corriente que podría dañar la lámpara. Sin embargo, los balastros electromagnéticos actuales pueden generar armónicos debido a la distorsión producida por el arco de descarga en la lámpara HPS [56].

En contraste, la creciente adopción de luminarias LED en la iluminación pública ha contribuido al aumento de cargas no lineales y emisiones armónicas en la red eléctrica. A diferencia de las HPS, las lámparas LED requieren corriente continua y controladores electrónicos avanzados para su funcionamiento. Gracias a su mayor eficiencia energética, mejor rendimiento lumínico y adecuada distribución de la luz, las lámparas LED están reemplazando a las HPS como una opción más eficiente y sostenible [57].

El análisis de los armónicos generados por las luminarias LED en la red es crucial. La norma IEC 61000-3-2 clasifica las emisiones de armónicos de los equipos de iluminación en dos grupos: uno para potencias de entrada hasta 25W y otro para potencias superiores a 25W. Esta normativa ayuda a regular y minimizar los efectos negativos de las emisiones armónicas, asegurando que los sistemas de iluminación cumplan con los estándares internacionales de calidad y eficiencia.

Este estudio se enfoca en comparar la distorsión armónica generada por luminarias LED y HPS en un alimentador de distribución específico (ALIM-1500080T03) en Riobamba. El modelado del sistema y el análisis de los datos y características de las luminarias se realizarán utilizando el software CYME, una herramienta ampliamente utilizada en el sector de la comercialización de energía. Este software permitirá evaluar el impacto de

las diferentes tecnologías de iluminación en la red eléctrica, proporcionando información valiosa para optimizar el diseño y la operación de los sistemas de iluminación pública.

2.8. CYMDIST

La plataforma informática CYMDIST posee paquetes básicos para realizar los análisis de sistemas de distribución del software CYME. Con la plataforma CYMDIST se busca mejorar la calidad de energía eléctrica, identificando las causas y efectos que originan los problemas conforme a la regulación No. ARCERNNR-002-20. Esto se logra a través de análisis de datos, simulaciones y estudios que permiten la presentación de una propuesta de mejoramiento y correcciones.

Para el estudio del presente trabajo, se implementa el uso del software comercialmente disponible, CYME. La red de distribución es configurada estrictamente con bases de información proporcionadas por los propietarios del sistema de distribución. Los equipos, como cargas, líneas, dispositivos de seccionamiento y motores son configurados mediante el uso del software y una base de datos específica. Esta configuración detallada asegura que el modelado del sistema sea preciso y representativo, permitiendo realizar análisis detallados y proponer soluciones efectivas para mejorar la calidad de energía eléctrica y la eficiencia operativa del sistema.

3. METODOLOGÍA

El proceso comienza con la obtención de diagramas unifilares generales y específicos del sistema de iluminación, que incluyen los niveles de THD para luminarias LED y HPS. Estos diagramas, junto con parámetros técnicos como niveles de tensión, cargas y transformadores, se ingresan en el software CYME para calcular el nivel de THD en el sistema. El nivel de THD resultante se utiliza como entrada en MATLAB, junto con otros parámetros como nivel de tensión, frecuencia fundamental, THD y tiempo de muestreo.

En MATLAB, estos parámetros se emplean para diseñar un filtro activo de potencia que mitigará los armónicos presentes en el sistema. MATLAB procesa esta información para determinar el porcentaje de THD y generar parámetros de salida, que incluyen parámetros del filtro activo, señales de voltaje compensadas y comparativas de THD. Esta metodología proporciona una evaluación detallada del proceso que se llevará a cabo en este estudio (ver Figura 4).

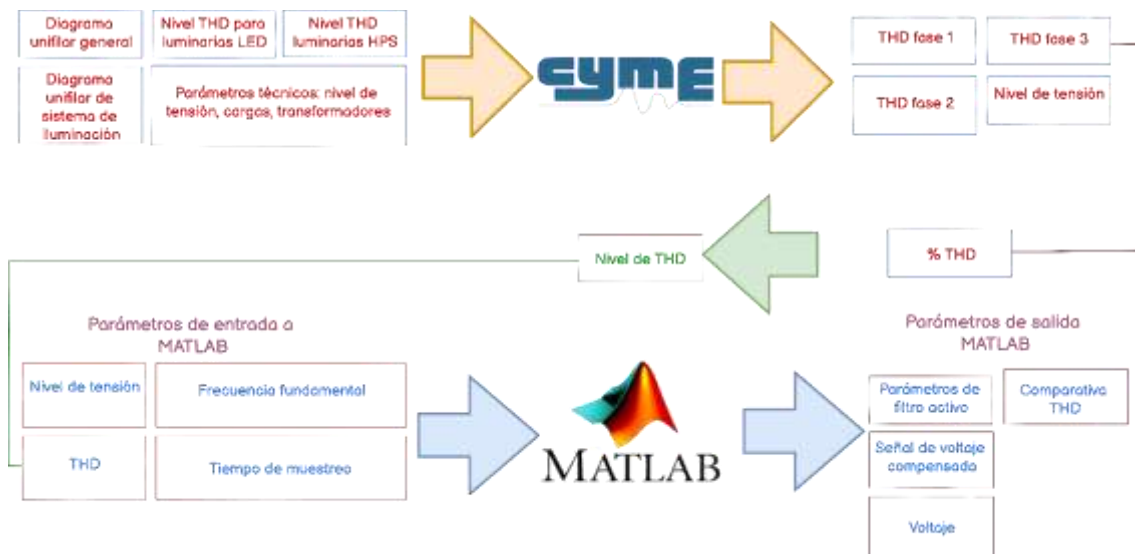


Figura 4 Metodología para el análisis de armónicos y el diseño del FAP.

Fuente: Autor

3.1. Caso de estudio

El estudio se focalizará sobre el alimentador 1500080T03 de la subestación 8 la cual posee un índice alto de armónicos de voltaje, donde la mayor causa de estos es provocada por luminarias viales que se encuentran en el sector. La red de distribución posee varios puntos de caso de estudio, en el cual se ha realizado la investigación sobre 5 puntos diferentes de nodos para el presente proyecto.

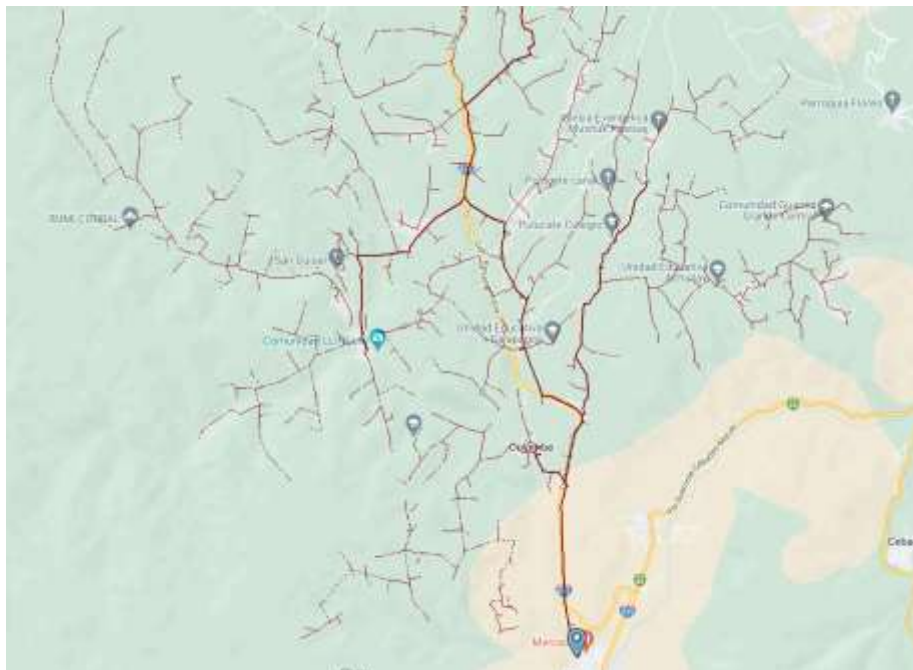


Figura 5. Red de Distribución conectado al alimentador 1500080T03.

Fuente: Autor

El alimentador 1500080T03, Figura 6, se encuentra ubicado en las calles Mariano Curicama – José María PI y Panamericana Antigua, en la Ciudad de Riobamba-Ecuador.



Figura 6. Alimentador 1500080T03 representado en la plataforma CYME.

Fuente: Autor

Los nodos de referencia para el caso de estudio se caracterizan por sus ramales independientes, optimizando así los resultados de armónicos y facilitando una mejor gestión de soluciones sobre el sistema de distribución. Para ello, se tomarán varios puntos de la red de distribución para comparar los datos resultantes de diferentes tipos de luminarias, como las LED y HPS. Los nodos MTA_S_299878, MTA_S_87877, MTA_S_61155, MTA_S_331576 y MTA_S_298959 están compuestos por dos o más ramales con cargas independientes, permitiendo el estudio de luminarias viales en diferentes escenarios: el caso 1 estará compuesto por luminarias LED y el caso 2 por luminarias HPS.

Para mejorar el planteamiento, los nodos escogidos se encuentran en zonas distantes del alimentador, con el propósito de obtener resultados diversos sobre los cinco nodos a ser estudiados. Este enfoque asegura que las mediciones y análisis reflejen una variedad de condiciones operativas, proporcionando una visión detallada del comportamiento de los armónicos en el sistema. La variabilidad en la ubicación de los nodos permitirá identificar patrones y diferencias en el rendimiento de las luminarias LED y HPS, facilitando la implementación de soluciones específicas y efectivas para la mejora de la calidad de energía en la red de distribución.

El nodo MTA_S_299878, Figura7. Ubicado en la Comunidad Guantul Grande Central al Sur del sistema de distribución, está compuesto por cuatro ramales, donde existen 5 transformadores los cuales se implementarán las luminarias LED y HPS, cada uno de ellos con 3 pruebas diferentes de, 5 luminarias, 10 luminarias y 15 luminarias.

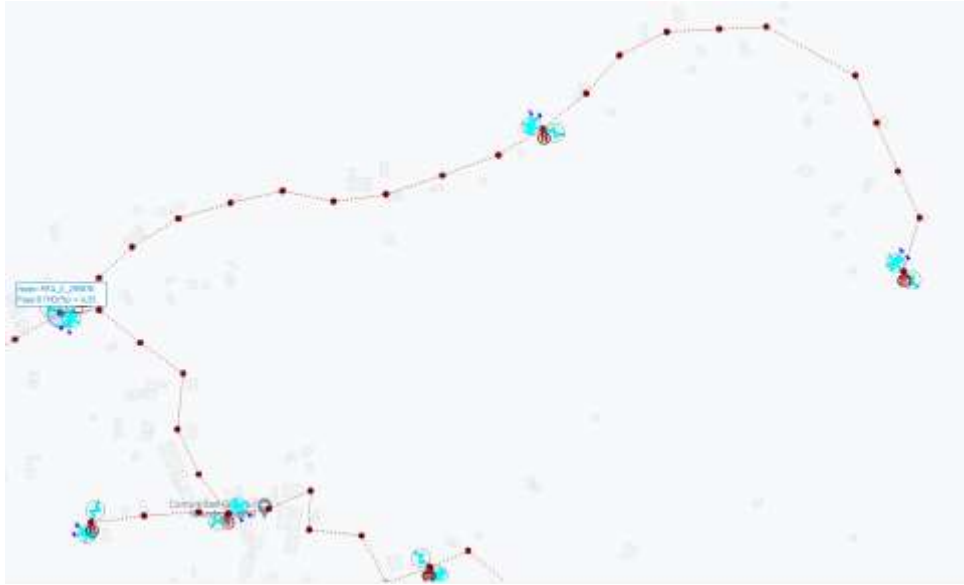


Figura 7. Nodo MTA_S_299878.

Fuente: Autor

En el lado norte del sistema de distribución se localiza el nodo MTA_S_87877, Figura 8, donde está compuesto por 3 ramales independientes uno del otro, utilizando las pruebas de las 5,10 y 15 luminarias, siendo este el punto más alejado del alimentador principal.



Figura 8. Nodo MTA_S_87877.

Fuente: Autor

El nodo MTA_S_61155, Figura 9, con 3 ramales conectados por un ramal principal, fue escogido estratégicamente por la ubicación de zonas residenciales en ese sector este ubicado en el Noroeste del sistema de distribución.

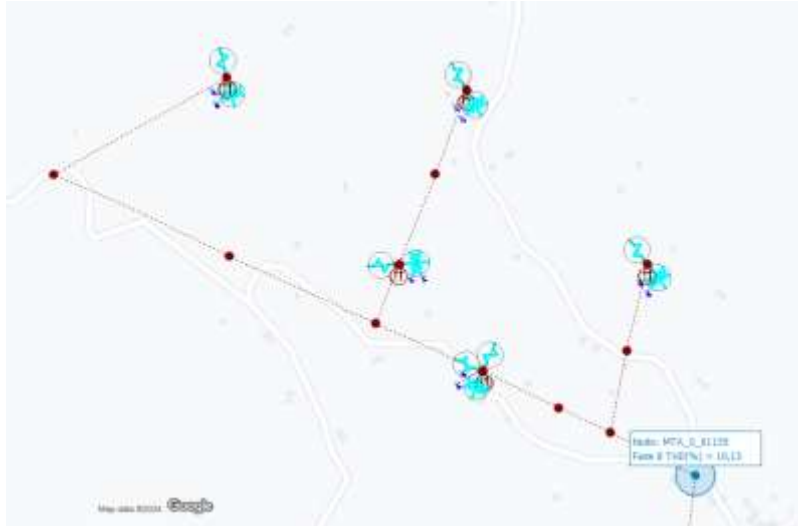


Figura 9. Nodo MTA_S_61155.

Fuente: Autor

El nodo MTA_S_331576, Figura 10, está compuesto por 2 ramales principales, se encuentra ubicado al Norte del sistema de distribución, en la calle San Guisel.



Figura 10. Nodo MTA_S_331576.

Fuente: Autor

El nodo MTA_S_298959, Figura 11, posee dos ramales principales ubicado al Sur del sistema, a diferencia de los demás nodos de prueba, este ya mencionado es el que se encuentra más cerca al alimentador principal del Sistema de Distribución.



Figura 11. Nodo MTA_S_298959.

Fuente: Autor

3.2. SISTEMA DE DISTRIBUCION.

La red de distribución elegida para el análisis de armónicos de voltaje está compuesta por las características de un transformador monofásico conectado a un alimentador de distribución de 13.8 kV/ 240V.

3.3. CARACTERISTICAS DEL TRANSFORMADOR DE DISTRIBUCION.

Tabla 2. Características del Transformador de distribución.

Capacidad Nominal	25kVA
Voltaje Primaria	13.8 kV
Voltaje Secundaria	0.24 kV
Perdidas en núcleo	0.09 kW
Impedancia	4.5%
Relación X/R	4

Fuente: Autor

Representación esquemática de la conexión del transformador monofásico en la red, con implementación de luminarias de prueba, Figura 12.

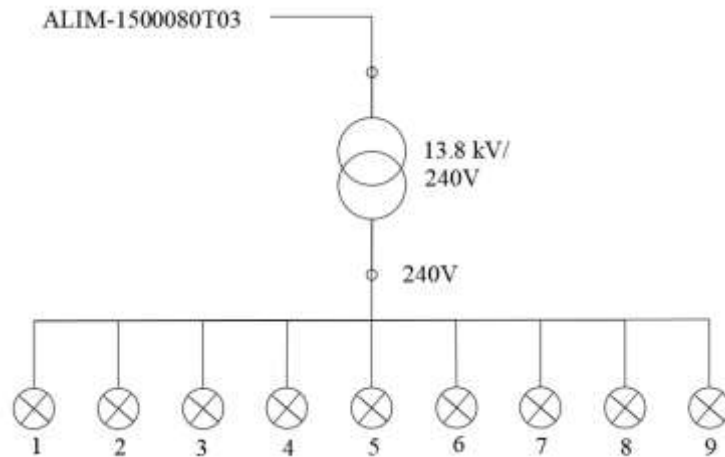


Figura 12. Conexión del Transformador Monofásico.

Fuente: Autor

3.4. Armónicos de luminarias LED Y HPS.

Las mediciones y datos que se obtendrán serán realizados sobre el estudio de luminarias LED y HPS, las características y datos se encuentran sobre la siguiente tabla.

Tabla 3. Potencia Nominal y Flujo Luminoso de luminarias LED y HPS.

TIPO	POTENCIA NOMINAL (W)	FLUJO LUMINOSO (LM)
LED	150	17121.21
HPS	400	42433.82

Fuente: Autor

Las luminarias HPS que se aplicaron en este proyecto poseen características similares a las luminarias instaladas en el sistema de la red de distribución proporcionado por la EERSA. La luminaria LED fue puesta a prueba para comprobación de los cambios de niveles de iluminación. Tanto las luminarias HPS como las LED son aprobadas sobre las condiciones y normas de IEC 61000-3-2, con la utilización de una fuente CA y conectadas hacia un voltaje monofásico, 240V. Esto ya mencionado cumpliendo las normas y requisitos de la investigación CIE 115:2010[20].

Las luminarias HPS y LED, estarán representadas en el Software CYME, como fuentes de corriente armónica, donde se acoplarán a disposición de la investigación, mediante datos de magnitud y Angulo de fase, adquiridos por mediciones de pruebas en laboratorios.

3.5. Distorsión Armónica de voltaje.

Para la comprobación del incremento de la distorsión armónica de voltaje en referencia a las luminarias en conceptos de una carga lineal, los análisis de datos obtenidos se comparan con la distorsión de armónicos total del voltaje medido sobre una carga resistiva. Al implementar una carga resistiva, se obtiene una distorsión armónica de valores eventualmente nulos, donde la distorsión armónica existente proviene únicamente de la fuente de tensión. Esta comparación es necesaria para evaluar el impacto real de las luminarias en la calidad de la energía y determinar la contribución específica de cada tipo de luminaria a la distorsión armónica del sistema.

3.6. Límites Permisibles.

Tomando en cuenta las características del transformador, especialmente su potencia nominal (25kVA) está diseñado para futuras conexiones residenciales, de tal manera que se toman como referencia los límites propuestos por la norma Std 519-2014[20].

La tabla 4 y tabla 5, visualizan los resultados del software CYME, de los reportes de corriente armónica, en donde el estudio principal de investigación son los armónicos impares en comparación a la distorsión individual propuesta por la norma.

3.6.1. Fuente de voltaje de armónico LED.

Tabla 4. Frecuencia y Magnitud Luminaria LED.

NUMERO DE ARMÓNICO	FRECUENCIA (HZ)	MAGNITUD (%)	IEEE STD 519-2014
1	60	100	5
3	180	1.35	5
5	300	0.75	5
7	420	0.29	5
9	540	0.68	5
11	660	0.35	5
13	780	0.17	5
15	900	0.24	5
17	1020	0.02	5

Fuente: Autor

3.6.2. Fuente de voltaje de armónico HPS.

Tabla 5. Frecuencia y Magnitud Luminaria HPS

NUMERO DE ARMÓNICO	FRECUENCIA (HZ)	MAGNITUD (%)	IEEE STD 519-2014
1	60	100	5
3	180	1.7	5
5	300	0.6	5
7	420	0.2	5
9	540	0.6	5
11	660	0.3	5
13	780	0.2	5
15	900	0.3	5

Fuente: Autor

3.7. FUENTE DE FRECUENCIA.

La plataforma CYME permite realizar la composición de equipos armónicos por medio de fuentes de, las cuales permite ingresar datos de investigación acerca de las luminarias HPS y LED. En donde cada fuente de frecuencia está caracterizada por las fuentes de voltaje armónicos de las luminarias HPS como caso 1 y luminarias LED como caso 2.

Para el caso 1 los nodos MTA_S_299878, MTA_S_87877, MTA_S_61155, MTA_S_331576 y MTA_S_298959 están compuestos por 5 Luminarias de HPS y 5 Luminarias LED, Figura 13, como primer prueba, como segunda prueba están compuesto por 10 luminarias de HPS y 10 luminarias led, Figura 14, y como tercera prueba está compuesto por 15 luminarias HPS y 15 luminarias LED, Figura 15, En donde se visualizara los valores de armónicos existentes y obtenidos por estas pruebas para un mejor análisis de resultados.

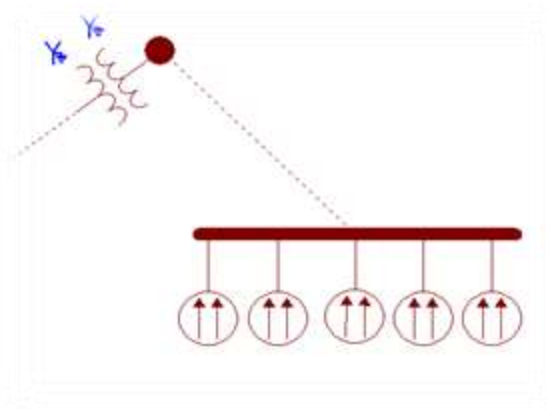


Figura 13. Conexión 5 Luminarias

Fuente: Autor

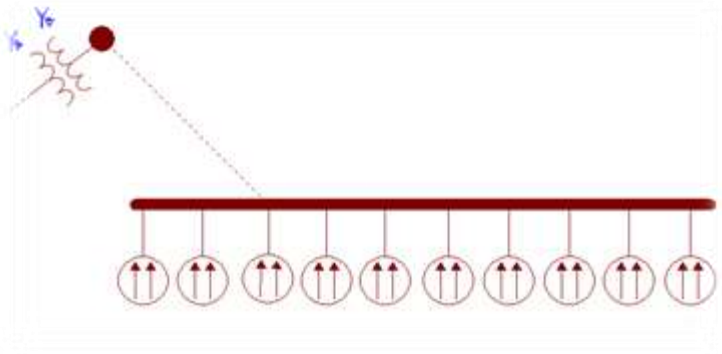


Figura 14. Conexión 10 Luminarias

Fuente: Autor

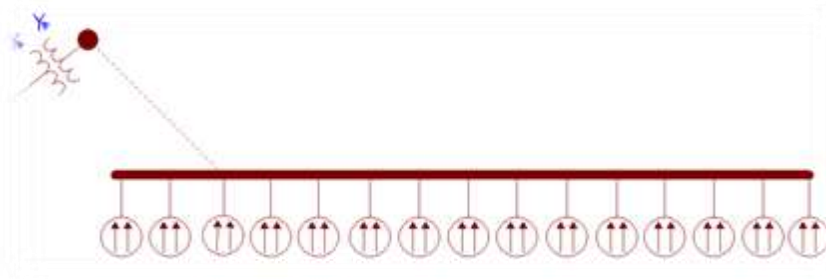


Figura 15. Conexión 15 Luminarias

Fuente: Autor

Los diferentes nodos ubicados en distintos puntos estratégicos en el sistema de distribución, nos permitirá una mayor cantidad de datos a reflejar y analizar, en este sentido nos presta a realizar una mayor investigación y un mejor acercamiento a la realidad en las pérdidas de energía que se encuentran afectando al alimentador 1500080T03.

3.8. Armónicos Luminaria HPS

Los resultados obtenidos en lámparas HPS en el armónico 3, Tabla 6, consta que el nodo MTA_S_298959 con 5 luminarias no sobrepasan la distorsión máxima de voltaje de 3%, en diferencia a las instalaciones de 10 y 15 luminarias, posee un incremento al 3% de limite permisible, con un crecimiento entre ambas del 1.57%. El nodo MTA_S_87877 y MTA_S_299878 de igual forma que le nodo MTA_S_298959 no sobrepasa el límite

permisible en la instalación de 5 luminarias, sin embargo, en la instalación de 10 y 15 luminarias si sobrepasan la norma establecida del 3%. El nodo MTA_S_298959 y MTA_S_61155 en las 3 implementación de lámparas (5,10 y 15) sobrepasan los límites permisibles, con las observaciones que estos nodos son los más alejados al alimentador principal.

Tabla 6. Armónico 3 luminarias HPS.

ID DE NODO	ARMÓNICO 3 (180.00 HZ IHD (%))		
	LUMINARIAS HPS		
	5 LUMINARIAS	10 LUMINARIAS	15 LUMINARIAS
1 MTA_S_298959	1.573	3.143	4.713
2 MTA_S_87877	1.693	3.270	4.905
3 MTA_S_299878	2.987	5.973	8.969
4 MTA_S_331576	3.060	6.117	9.181
5 MTA_S_61155	3.167	6.331	9.502

Fuente: Autor

En el armónico 5, Tabla 7, los nodoso MTA_S_299878, MTA_S_331576 y MTA_S_61155 en la implementación de 15 luminarias, los cálculos obtenidos son los únicos que no se encuentra en el límite del 3%, esto a diferencia con la implementación de 5 y 10 luminarias en los mismos nodos.

Tabla 7. Armónico 5 luminarias HPS

ID DE NODO	ARMÓNICO 5 (300.00 HZ IHD (%))		
	LUMINARIAS HPS		
	5 LUMINARIAS	10 LUMINARIAS	15 LUMINARIAS
1 MTA_S_298959	0.463	0.926	1.388
2 MTA_S_87877	0.500	0.960	1.439
3 MTA_S_299878	1.003	2.005	3.007
4 MTA_S_331576	1.033	2.067	3.098
5 MTA_S_61155	1.068	2.137	3.205

Fuente: Autor

El armónico 7, Tabla 8, no presenta resultados que sobrepasen los límites permisibles por la norma.

Tabla 8. Armónico 7 luminarias HPS

ID DE NODO	ARMÓNICO 7 (420.00 HZ IHD (%))		
	LUMINARIAS HPS		
	5 LUMINARIAS	10 LUMINARIAS	15 LUMINARIAS
1 MTA_S_298959	0.159	0.318	0.478
2 MTA_S_87877	0.161	0.309	0.463
3 MTA_S_299878	0.338	0.676	1.014
4 MTA_S_331576	0.353	0.706	1.059
5 MTA_S_61155	0.363	0.725	1.087

Fuente: Autor

El armónico 9, Tabla 9, presenta resultados fuera la norma establecida, sin embargo, esto solo en la implementación de 15 luminarias en los nodos MTA_S_299878, MTA_S_331576 y MTA_S_61155 donde sobrepasan el 3% admisible.

Tabla 9. Armónico 9 luminarias HPS.

ID DE NODO	ARMÓNICO 9 (540.00 HZ IHD (%))		
	LUMINARIAS HPS		
	5 LUMINARIAS	10 LUMINARIAS	15 LUMINARIAS
1 MTA_S_298959	0.556	1.111	1.666
2 MTA_S_87877	0.599	1.157	1.735
3 MTA_S_299878	1.069	2.136	3.206
4 MTA_S_331576	1.106	2.211	3.314
5 MTA_S_61155	1.137	2.275	3.411

Fuente: Autor

El armónico 11, Tabla 10, no presenta resultados fuera del rango permisible establecido por la norma, esto es reflejado para la instalación 5,10 y 15 luminarias.

Tabla 10. Armónico 11 luminarias HPS.

ID DE NODO	ARMÓNICO 11 (660.00 HZ IHD (%))		
	LUMINARIAS HPS		
	5 LUMINARIAS	10 LUMINARIAS	15 LUMINARIAS
1 MTA_S_298959	0.228	0.456	0.685
2 MTA_S_87877	0.256	0.491	0.736
3 MTA_S_299878	0.499	0.998	1.497
4 MTA_S_331576	0.519	1.038	1.556
5 MTA_S_61155	0.534	1.068	1.602

Fuente: Autor

El armónico 13, Tabla 11, no presenta resultados fuera de la norma, sin embargo, se puede constatar que a comparación del armónico 11, Tabla 10, su resulta disminuyeron en un 0.1% en las 3 instalaciones de luminarias implementadas.

Tabla 11. Armónico 13 luminarias HPS.

ID de nodo	ARMÓNICO 13 (780.00 HZ IHD (%))		
	LUMINARIAS HPS		
	5 LUMINARIAS	10 LUMINARIAS	15 LUMINARIAS
1 MTA_S_298959	0.162	0.325	0.487
2 MTA_S_87877	0.163	0.312	0.467
3 MTA_S_299878	0.324	0.649	0.973
4 MTA_S_331576	0.336	0.672	1.007
5 MTA_S_61155	0.349	0.697	1.046

Fuente: Autor

El armónico 15, Tabla 12, sus resultados se encuentran en los límites establecidos, tomando en cuenta que sus resultados aumentaron en un 0.2% en comparación al armónico 13, Tabla 11.

Tabla 12. Armónico 15 luminarias HPS.

ID DE NODO	ARMÓNICO 15 (900.00 HZ IHD (%))		
	LUMINARIAS HPS		
	5 LUMINARIAS	10 LUMINARIAS	15 LUMINARIAS
1 MTA_S_298959	0.273	0.545	0.817
2 MTA_S_87877	0.291	0.562	0.844
3 MTA_S_299878	0.511	1.022	1.533
4 MTA_S_331576	0.533	1.064	1.594
5 MTA_S_61155	0.550	1.099	1.647

Fuente: Autor

3.9. Armónicos Luminaria LED

La principal observación de la luminaria LED, es el armónico 17, un armónico más que las luminarias HPS. En el armónico 3, Tabla 13, en la implementación de 5 lámparas no presenta ningún valor fuera del rango establecido. Sin embargo, en la implementación de 10 luminarias los resultados fuera de los límites permisibles pertenecen a los nodos MTA_S_299878, MTA_S_331576 y MTA_S_61155, en comparación a la implementación de 15 luminarias los 5 nodos de prueba están fuera de los parámetros.

Tabla 13. Armónico 3 luminarias LED.

ID DE NODO	ARMÓNICO 3 (180.00 HZ IHD (%))		
	LUMINARIAS LED		
	5 LUMINARIAS	10 LUMINARIAS	15 LUMINARIAS
1 MTA_S_298959	1.248	2.494	3.741
2 MTA_S_87877	1.299	2.597	3.896
3 MTA_S_299878	2.371	4.743	7.122
4 MTA_S_331576	2.430	4.857	7.291
5 MTA_S_61155	2.514	5.028	7.545

Fuente: Autor

El armónico 5, Tabla 14, los resultados que no se encuentran en los parámetros establecidos son los nodos MTA_S_299878, MTA_S_331576 y MTA_S_61155 en la implementación de 15 luminarias, con un porcentaje de crecimiento del 0.1%.

Tabla 14. Armónico 5 luminarias LED.

ID DE NODO	ARMÓNICO 5 (300.00 HZ IHD (%))		
	LUMINARIAS LED		
	5 LUMINARIAS	10 LUMINARIAS	15 LUMINARIAS
1 MTA_S_298959	0.579	1.157	1.736
2 MTA_S_87877	0.600	1.200	1.799
3 MTA_S_299878	1.254	2.507	3.760
4 MTA_S_331576	1.292	2.583	3.874
5 MTA_S_61155	1.336	2.671	4.007

Fuente: Autor

El armónico 7. Tabla 15, no presenta resultados fuera del límite permisible, sin embargo, a comparación del armónico 5, Tabla 14, los resultados de las 3 instalaciones de prueba de luminarias disminuyen en un 0.1%.

Tabla 15. Armónico 7 luminarias LED.

ID DE NODO	ARMÓNICO 7 (420.00 HZ IHD (%))		
	LUMINARIAS LED		
	5 LUMINARIAS	10 LUMINARIAS	15 LUMINARIAS
1 MTA_S_298959	0.231	0.462	0.693
2 MTA_S_87877	0.224	0.447	0.671
3 MTA_S_299878	0.491	0.980	1.470
4 MTA_S_331576	0.512	1.024	1.535
5 MTA_S_61155	0.526	1.051	1.577

Fuente: Autor

El armónico 9, Tabla 16, los nodos MTA_S_299878, MTA_S_331576 y MTA_S_61155, son los que presentan resultados fuera los límites establecidos, esto solo reflejando para la implementación de 15 luminarias con un incremento del 0.1%.

Tabla 16. Armónico 9 luminarias LED.

ID DE NODO	ARMÓNICO 9 (540.00 HZ IHD (%))		
	LUMINARIAS LED		
	5 LUMINARIAS	10 LUMINARIAS	15 LUMINARIAS
1 MTA_S_298959	0.630	1.260	1.888
2 MTA_S_87877	0.655	1.311	1.965
3 MTA_S_299878	1.211	2.422	3.634
4 MTA_S_331576	1.253	2.505	3.756
5 MTA_S_61155	1.288	2.578	3.866

Fuente: Autor

El armónico 11, Tabla 17, los resultados se encuentran en los límites permisibles en las 3 implementaciones de lámparas, tanto para 5, 10 y 15 luminarias se obtiene una disminución entre los 0.4% y 0.6%.

Tabla 17. Armónico 11 luminarias LED.

ID DE NODO	ARMÓNICO 11 (660.00 HZ IHD (%))		
	LUMINARIAS LED		
	5 LUMINARIAS	10 LUMINARIAS	15 LUMINARIAS
1 MTA_S_298959	0.266	0.573	0.799
2 MTA_S_87877	0.286	1.164	0.858
3 MTA_S_299878	0.582	1.211	1.747
4 MTA_S_331576	0.606	1.246	1.816
5 MTA_S_61155	0.624	0.573	1.870

Fuente: Autor

El armónico 13, Tabla 18, sus resultados se encuentran en los límites permisibles, sin embargo, estos, siguen disminuyendo, en comparación al armónico 11, Tabla 17, los resultados se encuentran en -0.1%.

Tabla 18. Armónico 13 luminarias LED

ID DE NODO	ARMÓNICO 13 (780.00 HZ IHD (%))		
	LUMINARIAS LED		
	5 LUMINARIAS	10 LUMINARIAS	15 LUMINARIAS
1 MTA_S_298959	0.138	0.276	0.414
2 MTA_S_87877	0.132	0.265	0.397
3 MTA_S_299878	0.276	0.551	0.827
4 MTA_S_331576	0.286	0.571	0.856

5	MTA_S_61155	0.296	0.593	0.889
----------	--------------------	-------	-------	-------

Fuente: Autor.

Los armónicos 14, Tabla 19, y el armónico 15, Tabla 20, no presentan resultados fuera de los límites permisibles, sin embargo, estos representan una mayor estabilidad en sus parámetros, los cuales no sobrepasan el 1.5%.

Tabla 19. Armónico 14 luminarias LED.

ID DE NODO	ARMÓNICO 15 (900.00 HZ IHD (%))		
	LUMINARIAS LED		
	5 LUMINARIAS	10 LUMINARIAS	15 LUMINARIAS
1 MTA_S_298959	0.218	0.436	0.653
2 MTA_S_87877	0.225	0.450	0.675
3 MTA_S_299878	0.409	0.818	1.227
4 MTA_S_331576	0.426	0.851	1.276
5 MTA_S_61155	0.440	0.879	1.318

Fuente: Autor

Tabla 20. Armónico 15 luminarias LED.

ID DE NODO	ARMÓNICO 17 (1020.00 HZ IHD (%))		
	LUMINARIAS LED		
	5 LUMINARIAS	10 LUMINARIAS	15 LUMINARIAS
1 MTA_S_298959	0.015	0.031	0.046
2 MTA_S_87877	0.017	0.033	0.050
3 MTA_S_299878	0.032	0.064	0.095
4 MTA_S_331576	0.033	0.065	0.098
5 MTA_S_61155	0.034	0.068	0.102

Fuente: Autor

3.10. THD total, Luminaria HPS.

Dado los resultados de la Luminaria HPS en las pruebas de 5,10 y 15 luminarias, el resultado de armonice está representado por el THD total. Donde la implementación de 5 luminarias no sobrepasan los límites permisibles del 5% establecido por la norma IEEE Std 519-2014, sin embargo para la implementación de 10 luminarias, los nodos MTA_S_331576, MTA_S_61155 y MTA_S_87877 no cumplen con los parámetros de la norma del 5%, así mismo en la implementación de 15 luminarias los resultados sobrepasan en un 0.5% en los nodos MTA_S_331576, MTA_S_61155 y MTA_S_87877.

Tabla 21. Comparación THD resultante de luminarias 5,10 y 15.

ID DE NODO	THD (%)		
	5 LUMINARIAS HPS	10 LUMINARIAS HPS	15 LUMINARIAS HPS
1 MTA_S_298959	1.782	3.561	4.340
2 MTA_S_299878	3.435	5.801	9.552
3 MTA_S_331576	3.528	6.269	9.611
4 MTA_S_61155	3.648	6.452	9.782
5 MTA_S_87877	1.918	7.292	6.523

Fuente: Autor

3.11. THD total, Luminaria LED.

La luminaria LED, los THD obtenidos muestran una gran estabilidad en la implementación de 5 luminarias, en todos los nodos de estudio, sin embargo, en la implementación de 10 luminarias y 15 luminarias, en los nodos MTA_S_331576, MTA_S_61155 y MTA_S_87877, sobrepasan los límites permisibles del 5% teniendo un desbalance del 1% al 4% de incremento.

Tabla 22. Comparación THD resultante de luminarias 5,10 y 15.

ID DE NODO	THD (%)		
	5 LUMINARIAS LED	10 LUMINARIAS LED	15 LUMINARIAS LED
1 MTA_S_298959	1.575	3.148	4.721
2 MTA_S_299878	1.636	3.271	4.907
3 MTA_S_331576	3.079	5.760	8.545
4 MTA_S_61155	3.168	5.784	8.603
5 MTA_S_87877	3.273	5.546	8.621

Fuente: Autor

3.12. Metodología P-Q

En Sistemas de Distribución, la calidad y eficiencia energética son afectadas por ámbitos negativos como son las cargas no lineales las cuales se encuentran desbalanceadas, esto influye que las ondas resultantes sean completamente opuestas a la onda ideal [58]. Generando que existan problemas de pérdidas y daños sobre los equipos instalados en el sistema de distribución, provocando que el tiempo de vida útil sea más corto.

La solución para evitar estos ámbitos negativos es necesario la implementación de un sistema de compensación, en donde se realiza un diseño de un filtro activo, el cual se ejecutará por la metodología P-Q. Este tipo de Metodología está representada por

diagramas de bloques, estos son puestos a prueba en Matlab-Simulink con la finalidad de analizar y estudiar su funcionalidad con la implementación del sistema de distribución del alimentador ALIM-1500080T03 donde se analizarán las cargas desbalanceadas y no lineales [59].

3.14.1. Sistema de Compensación basado en la Teoría P-Q

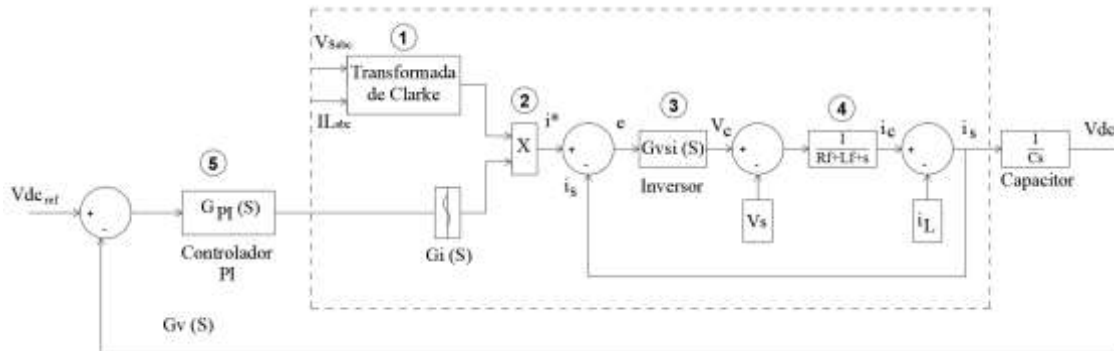


Figura 16. Diagrama de flujo Metodología PQ

Fuente: Autor

El algoritmo planteado por la teoría P-Q está basada sobre la implementación de una serie de bloques de control, el cual está conformado por 5 bloques conectados de forma analítica y lógica [60], Figura 16.

El bloque 1, consiste a la ecuación Ecuación 19, esto conforma a las magnitudes de tensión y corrientes de fase las cuales se transforman en coordenadas cartesianas.

$$\begin{bmatrix} f\alpha[n] \\ f\beta[n] \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} fa[n] \\ fb[n] \\ fc[n] \end{bmatrix} \quad (19)$$

Seguido hacia el bloque 2, se verifica el estado del sistema, en donde se calcula el valor de la potencia instantánea referente al sistema implementada sobre la ecuación Ecuación 20 [61].

Los datos obtenidos se dividen en componentes individuales, estos son caracterizados y relacionados con el armónico fundamental en la secuencia positiva, secuencia negativa y las magnitudes de corriente de armónicos sobre mayor amplitud. Ecuación 21.

$$\begin{bmatrix} p[n] \\ q[n] \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_\alpha[n] & v_\beta[n] \\ -v_\beta[n] & v_\alpha[n] \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_\alpha[n] \\ i_\beta[n] \end{bmatrix} \quad (20)$$

$$\begin{bmatrix} p[n] \\ q[n] \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \bar{p} & + & \tilde{p}[n] \\ \bar{q} & + & \tilde{q}[n] \end{bmatrix} \quad (21)$$

Definimos como \bar{p} , al armónico fundamental que se encuentra en secuencia positiva, quien está asociada a la potencia activa instantánea[8]. Esta define a la corriente mínima de RMS la cual garantiza que la carga llegue potencia activa. La \tilde{p} corresponde al componente de secuencia negativa sobre el armónico [59].

El armónico fundamental que está relacionada con la potencia imaginaria está definido por \bar{q} , La potencia instantánea se encuentra representado por \tilde{q} . El estudio y uso de filtros con lleva a la descomposición de componentes con características de respuestas infinitas, que se visualiza en el bloque 3 [59].

Las principales ventajas que se encuentran en las coordenadas a-b, es la poca complejidad que se encuentran las ecuaciones las cuales representan corrientes de compensación. Previo a esta acción mencionada la corriente se transforma en el sistema α - β mostradas en la Ecuación 22 [59].

$$\begin{bmatrix} i_\alpha[n] \\ i_\beta[n] \end{bmatrix} = \frac{1}{v_\alpha^2[n] + v_\beta^2[n]} \begin{bmatrix} v_\alpha[n] & -v_\beta[n] \\ v_\beta[n] & v_\alpha[n] \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{p} & + & \tilde{p}[n] \\ \bar{q} & + & \tilde{q}[n] \end{bmatrix} \quad (22)$$

Mediante la Ecuación 23, representa la fuente de alimentación que expresa la tensión asimétrica [62]. La Ecuación 24 representa al bloque 4 la cual determina la compensación de la corriente.

$$v_{\alpha}[n]^2 + v_{\beta}[n]^2 = 3|v_{\alpha}|^2 \quad (23)$$

$$\begin{array}{c} \begin{bmatrix} i_{\alpha}[n] \\ i_{\beta}[n] \end{bmatrix} \\ \frac{1}{v_{\alpha}^2[n] + v_{\beta}^2[n]} \\ \begin{bmatrix} v_{\alpha}[n] & -v_{\beta}[n] \\ v_{\beta}[n] & v_{\alpha}[n] \end{bmatrix} \\ \begin{bmatrix} p_k[n] \\ q_k[n] \end{bmatrix} \end{array} \quad (24)$$

Los componentes p_k y q_k se eliminan siempre y cuando sea necesario ejecutar una compensación. Por último, los valores de corrientes que se obtienen se convierten en un sistema cartesiano el cual actúa para un sistema trifásico. Para control de inversor, es controlado por un PI, visualizado en el bloque 5 y en base de un PWM [59].

3.13. Especificación técnica de un filtro Activo.

Los filtros deben colocarse estratégicamente en el sistema de distribución para mejorar su eficiencia y la calidad del servicio. Es crucial situarnos lo más cerca posible de las cargas no lineales que generan armónicos, permitiendo así que actúen de la manera efectiva antes que los armónicos afecten a todo el sistema de distribución. Las especificaciones de los filtros activos para sistemas de distribución de media tensión pueden variar según el fabricante y las necesidades específicas de la red eléctrica. A continuación, se detallan las funciones y especificaciones principales de estos filtros activos en sistemas de distribución.

Tabla 23. Especificaciones técnicas-filtro activo.

Marca	Diram	
Normativas	-	IEC/EN/EN50081-2/EN50082-2
Corriente nominal	A	50-600A
Voltaje nominal	v	230/400/480v
Rango de voltaje de entrada y salida	kV	6 a 36
Frecuencia	Hz	60
Controlador	-	Procesador/entras digitales
Capacidad de Filtración	H	2-61 (seleccionable por el usuario)
Modo de compensación	-	Armónicos, desequilibrio trifásico y potencia reactiva
thdv/thdi	%	thdv < 3, thdv < 5 después del filtrado
Mitigación armónica	%	>97
Tiempo mínimo de respuesta	ms	5
Eficiencia	%	>97
Interfase HMI	-	Pantalla táctil de 7 pulgadas
Red de Comunicación	-	RS485/CAN/Internet

Fuente: Autor

3.13.1. Sintonización del FAP

El ajuste y dimensionamiento del controlador PI se basan en la evaluación de la respuesta del sistema a un escalón en el lazo cerrado. Este proceso se describe mediante la Ecuación 25. Este método permite determinar los parámetros óptimos del controlador PI para asegurar una respuesta adecuada del sistema, minimizando el error y mejorando la estabilidad [63].

$$\frac{V_{dc}}{V_{dc_{ref}}} = \frac{\frac{kp * ki}{C}}{s^2 + \frac{kp}{C} * S + \frac{kp * ki}{C}} \quad (25)$$

El voltaje de corriente continua se representa como V_{dc} , mientras que $V_{dc_{ref}}$ es el voltaje de referencia de CC. Los parámetros kp y ki se refieren a la ganancia proporcional e

integral, respectivamente, y CC denota el capacitor. Los valores de k_i y k_p se determinan usando las Ecuaciones 26 y 27 [63].

$$k_p = 2 * L * w_n \quad (26)$$

$$k_i = \frac{w_n}{2 * L} \quad (27)$$

Aquí, w_n representa la frecuencia natural de amortiguación y L es el factor de amortiguación. Además, los diagramas de control del filtro P-Q se ilustran en la Figura 17. La frecuencia natural de amortiguación w_n es un parámetro esencial en el diseño de sistemas de control, ya que determina la rapidez con la que el sistema responde a las perturbaciones. Por otro lado, el factor de amortiguación L influye en la estabilidad del sistema, controlando la atenuación de las oscilaciones no deseadas. La Figura 17 proporciona una visualización clara de los diagramas de control del filtro P-Q, destacando la relación entre estos parámetros y su impacto en la operación del sistema.

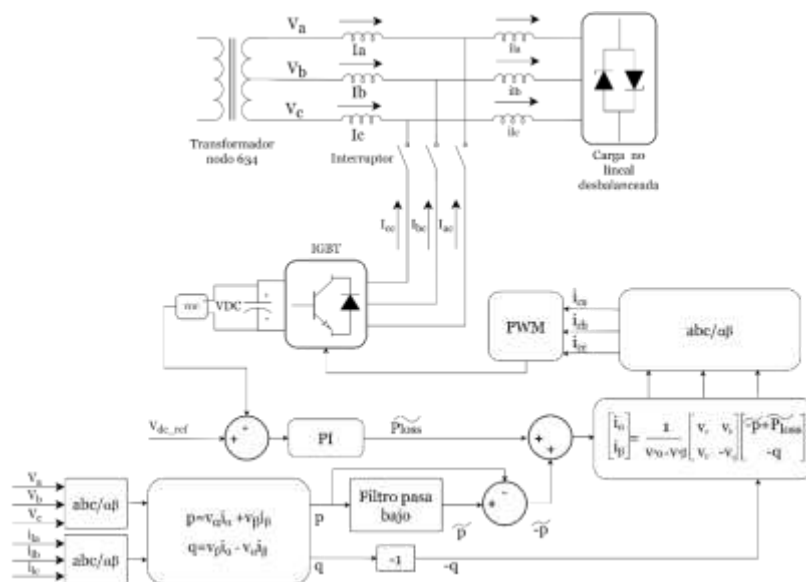


Figura 17. Diagrama de control para filtro comandado por la Metodología PQ

Fuente: Autor

4. RESULTADOS

4.1. Resultados Método P-Q luminarias HPS

El nodo MTA_S_299878 de 10 lámparas de HPS, el dominio del tiempo original presenta picos que oscilan en amplitud entre 220 V y 245 V, la principal deformación se localiza en los picos en cada ciclo, Figura 18. En la Figura 19, se observa el comportamiento del filtro activo aplicado, el cual rectifica la onda donde el pico de amplitud es de 237 V, se estabiliza y se asemeja a una onda sinusoidal perfecta en cada ciclo.

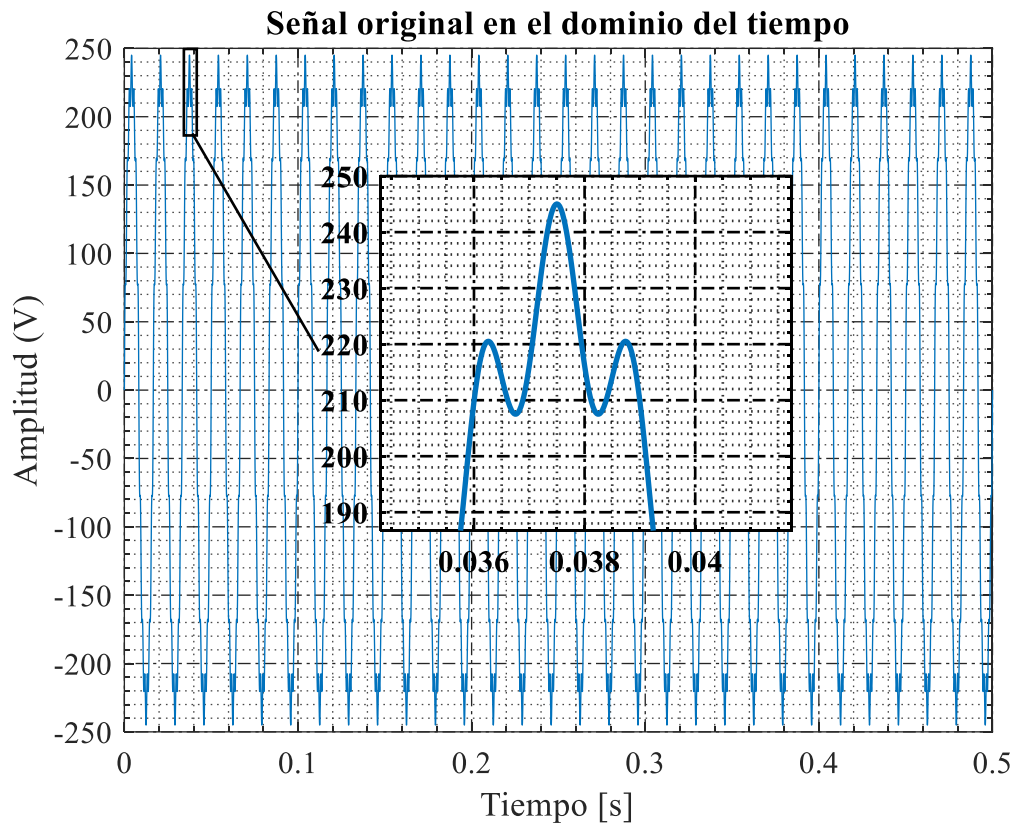


Figura 18. Señal original en el dominio del tiempo.

Fuente: Autor

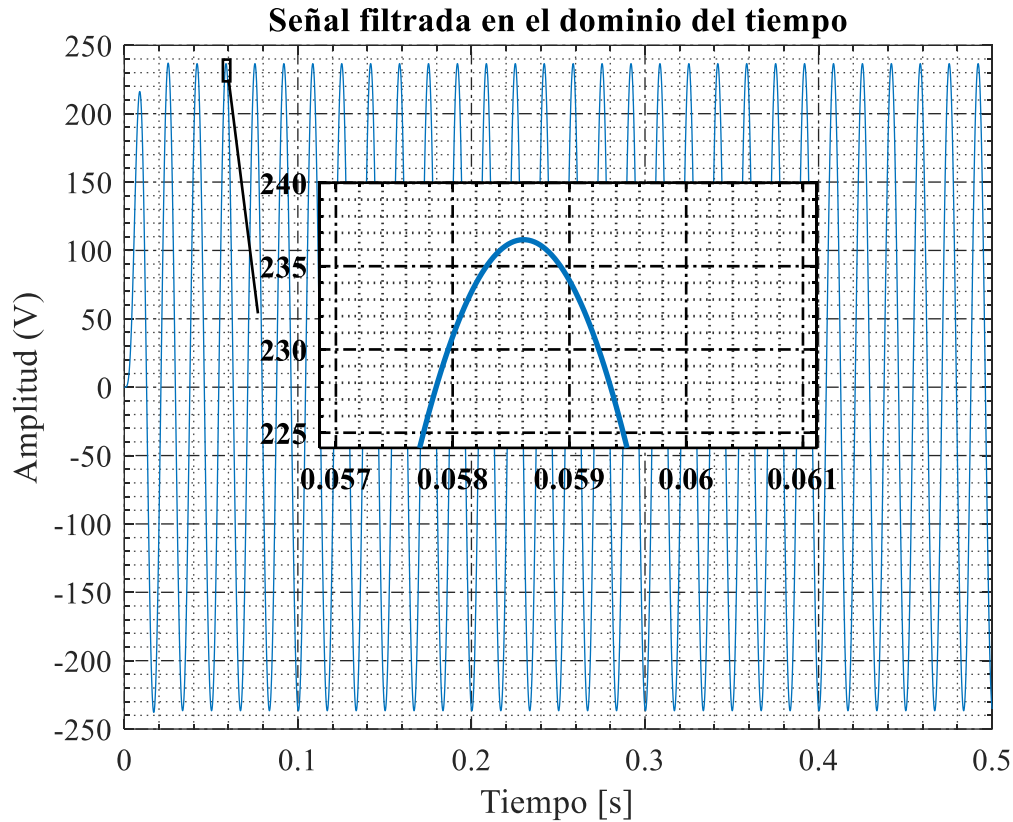


Figura 19. Señal filtrada en el dominio del tiempo.

Fuente: **Autor**

En el dominio de la frecuencia de la señal original, Figura 20, la frecuencia de 181 Hz tiene una amplitud de 5.30 %, la frecuencia 300 Hz tiene una amplitud de 1.99 %, la frecuencia 420 tiene una amplitud de 0.70 %, la frecuencia 540 Hz tiene una amplitud de 2.04 %, la frecuencia 660 Hz tiene una amplitud de 0.94 %, la frecuencia 780 Hz tiene una amplitud de 6.78 % y la frecuencia 900 Hz tiene una amplitud de 0.94 %. Aplicado el filtro activo, Figura 21, Todas las frecuencias en los diferentes rangos desaparecieron y no se obtienen picos importantes a lo largo del análisis frecuencial.

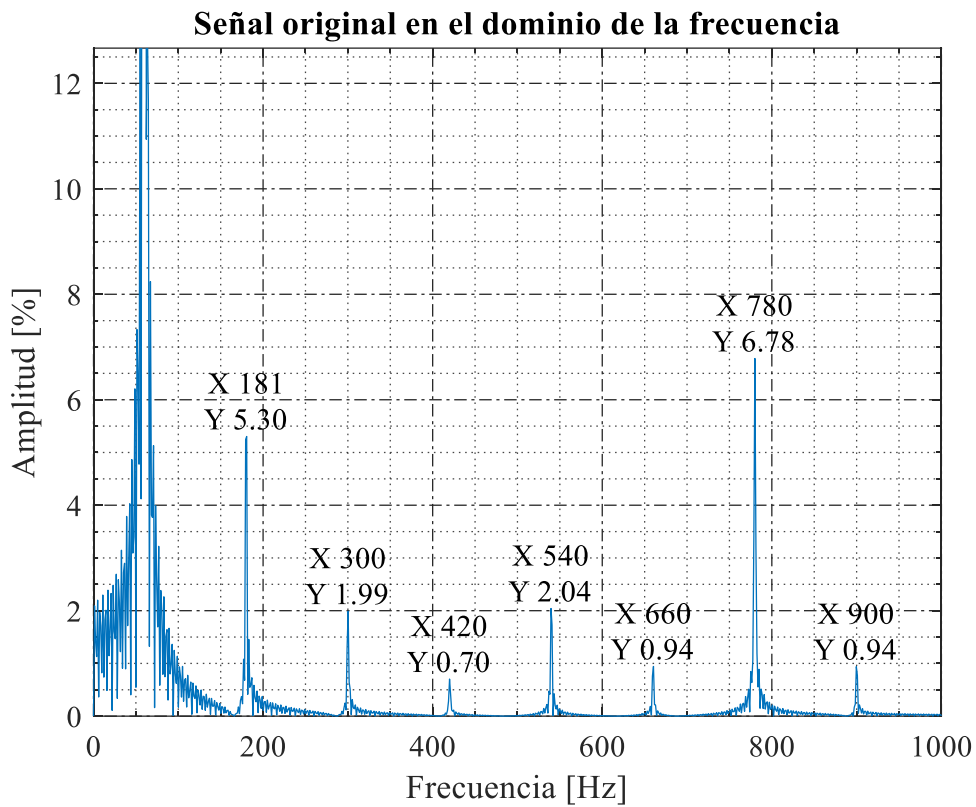


Figura 20. Señal en el dominio de la frecuencia.

Fuente: Autor

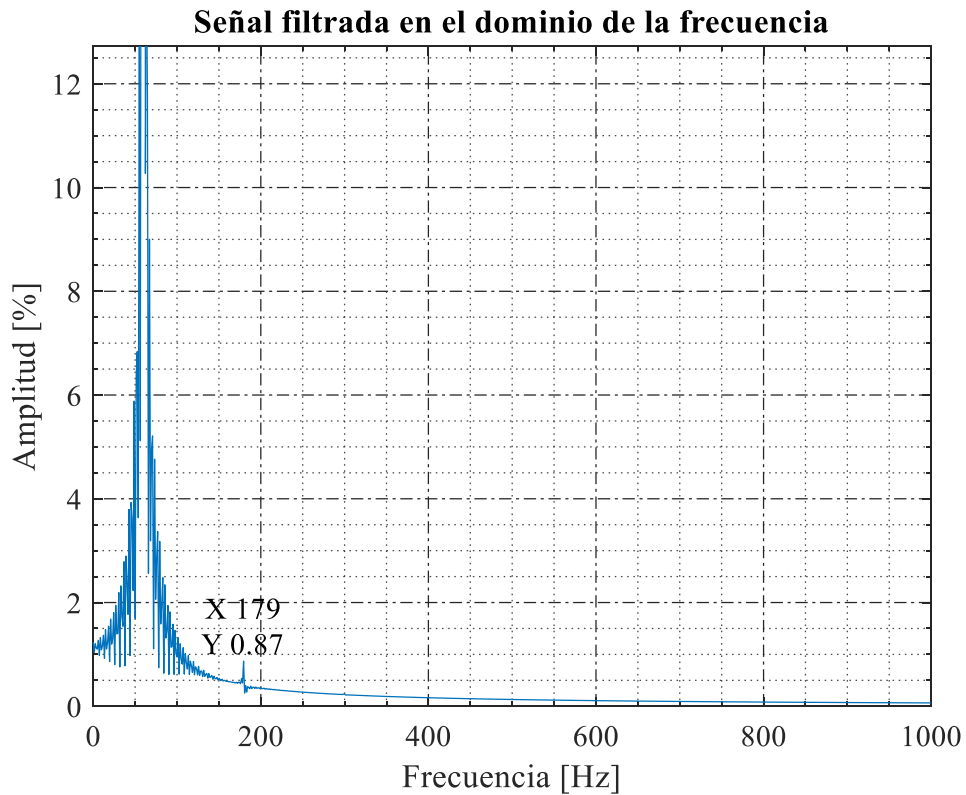


Figura 21. Señal filtrada en el dominio de la frecuencia.

Fuente: Autor

En la figura 22, expresa el THD inicial con un valor de 9.17 % de THD, reflejado en la Tabla 20. Con la aplicación del filtro El THD disminuye a un porcentaje de 1.33 % el cual se encuentra en los parámetros establecidos por la norma IEEE STD 519-2014.

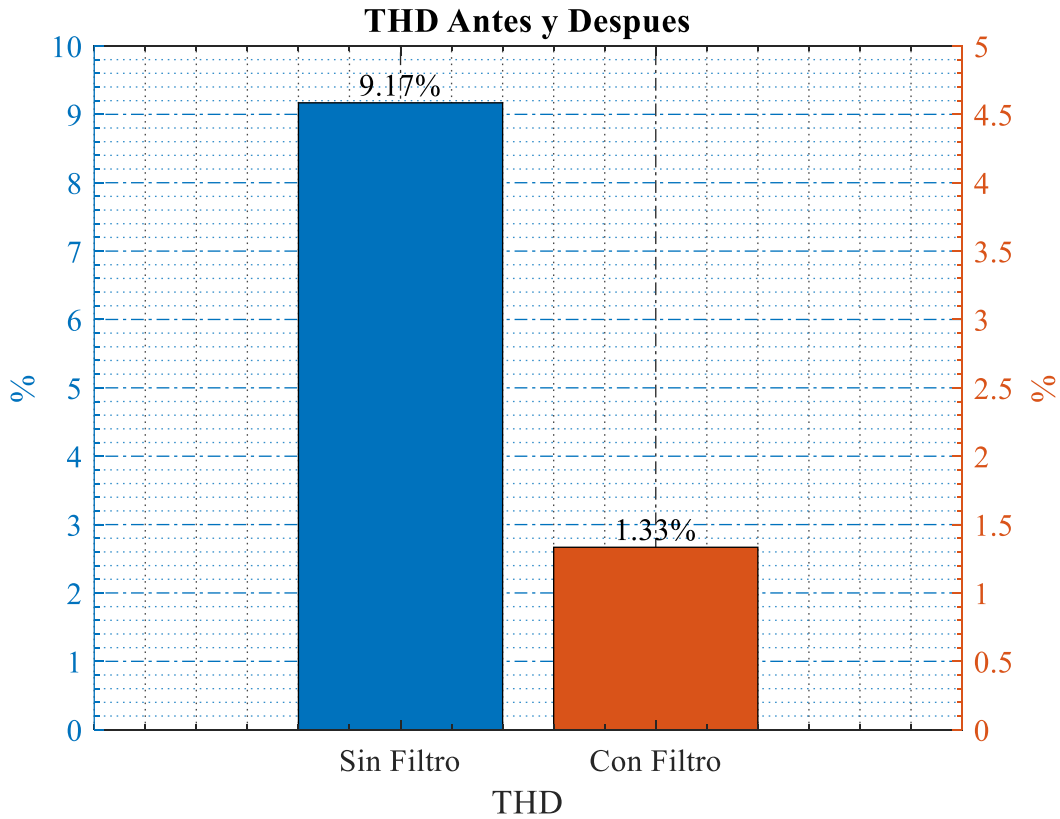


Figura 22. THD Antes y Después.

Fuente: Autor

El nodo MTA_S_331576 de 10 lámparas de HPS, el dominio del tiempo original presenta picos que oscilan entre 170 V y de 241 V, la principal deformación se localiza en los picos en cada ciclo, Figura 23. En la Figura 24, se observa el comportamiento del filtro activo aplicado, el cual rectifica la onda donde el pico de amplitud es de 237 V, se estabiliza y se asemeja a una onda sinusoidal perfecta en cada ciclo.

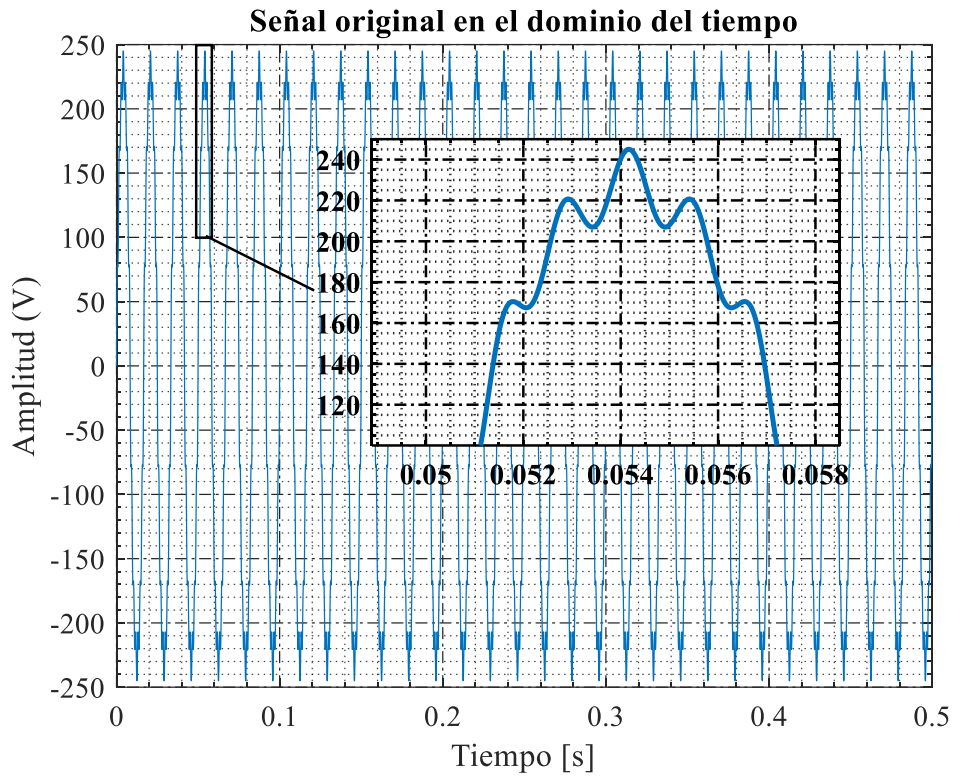


Figura 23. Señal original en el dominio del tiempo.

Fuente: Autor

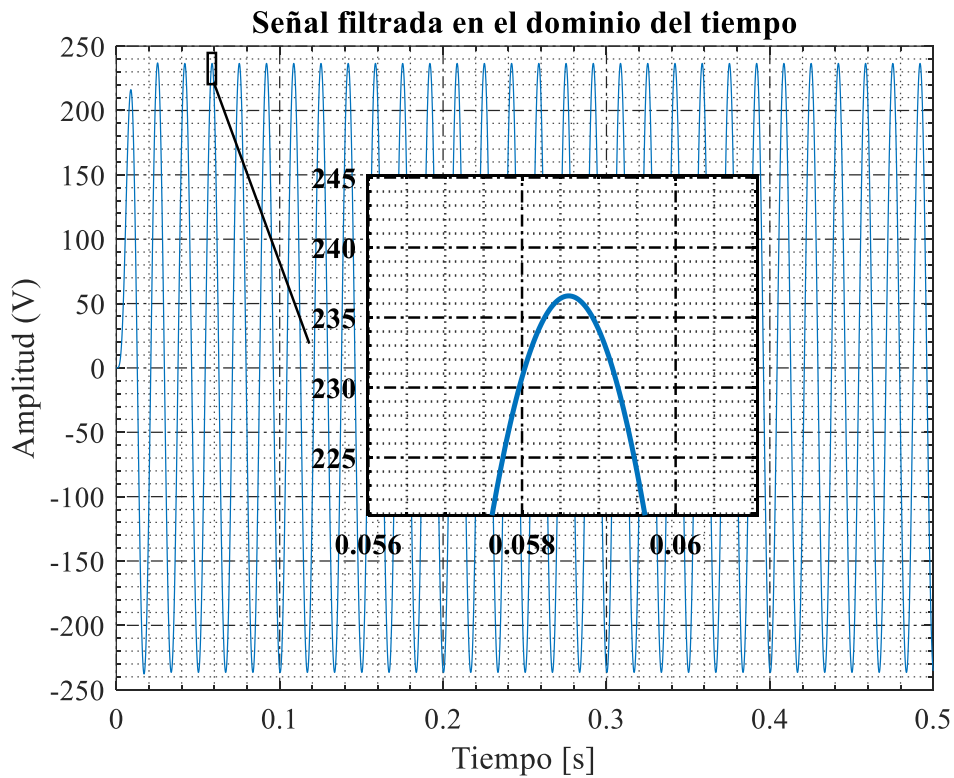


Figura 24. Señal filtrada en el dominio del tiempo.

Fuente: Autor

En el dominio de la frecuencia de la señal original, Figura 25, la frecuencia de 181 Hz tiene una amplitud de 5.47 %, la frecuencia 300 Hz tiene una amplitud de 2.09 %, la frecuencia 420 tiene una amplitud de 0.70 %, la frecuencia 540 Hz tiene una amplitud de 2.04 %, la frecuencia 660 Hz tiene una amplitud de 1.04 %, la frecuencia 780 Hz tiene una amplitud de 7.09 % y la frecuencia 900 Hz tiene una amplitud de 1.03 %. Aplicado el filtro activo, Figura 26, Todas las frecuencias en los diferentes rangos desaparecieron y no se obtienen picos importantes a lo largo del análisis frecuencial.

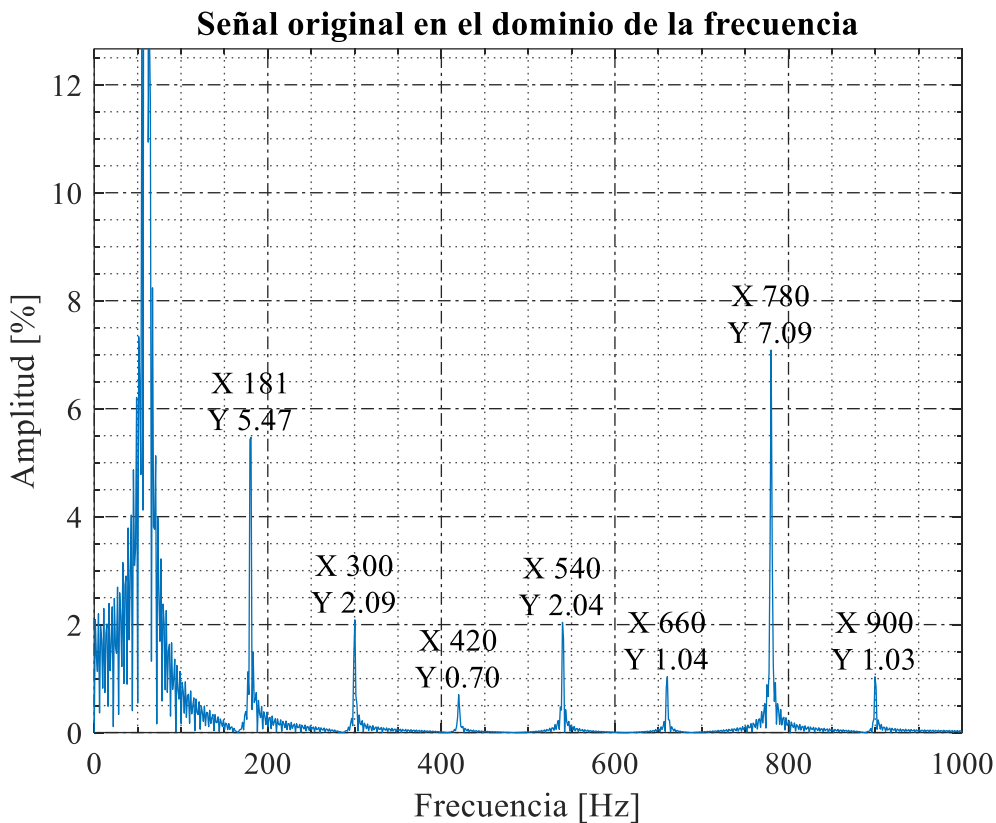


Figura 25. Señal original en el dominio de la frecuencia.

Fuente: Autor

En la figura 27, expresa el THD inicial con un valor de 9.54 % de THD, reflejado en la Tabla 20. Con la aplicación del filtro El THD disminuye a un porcentaje de 1.34 % el cual se encuentra en los parámetros establecidos por la norma IEEE STD 519-2014.

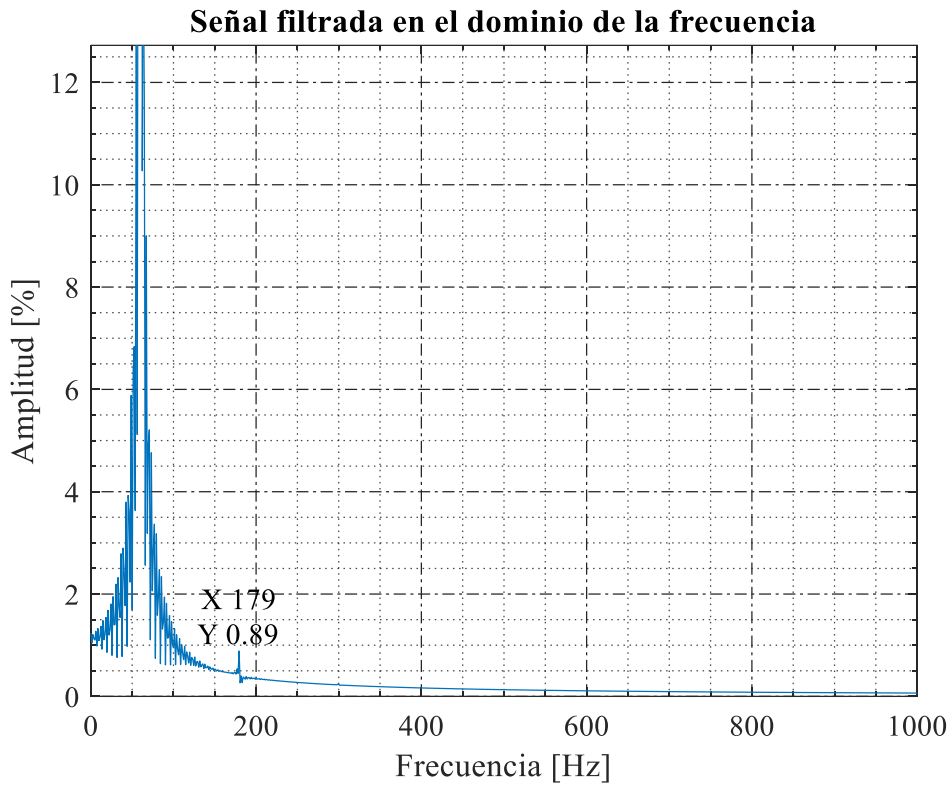


Figura 26. Señal filtrada en el dominio de la frecuencia.

Fuente: Autor

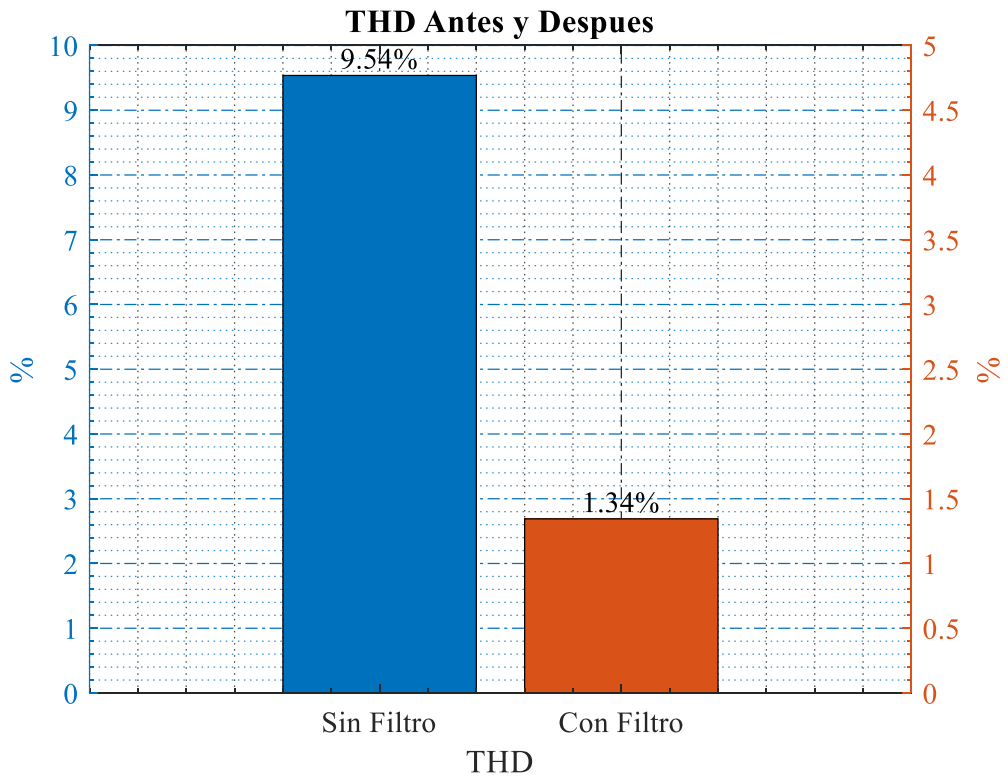


Figura 27. THD Antes y Después.

Fuente: Autor

El nodo MTA_S_61155 de 10 lámparas de HPS, el dominio del tiempo original presenta picos que oscilan en amplitud entre 170 V y 241 V, la principal deformación se localiza en los picos en cada ciclo, Figura 28. En la Figura 29, se observa el comportamiento del filtro activo aplicado, el cual rectifica la onda donde el pico de amplitud es de 237 V, se estabiliza y se asemeja a una onda sinusoidal perfecta en cada ciclo.

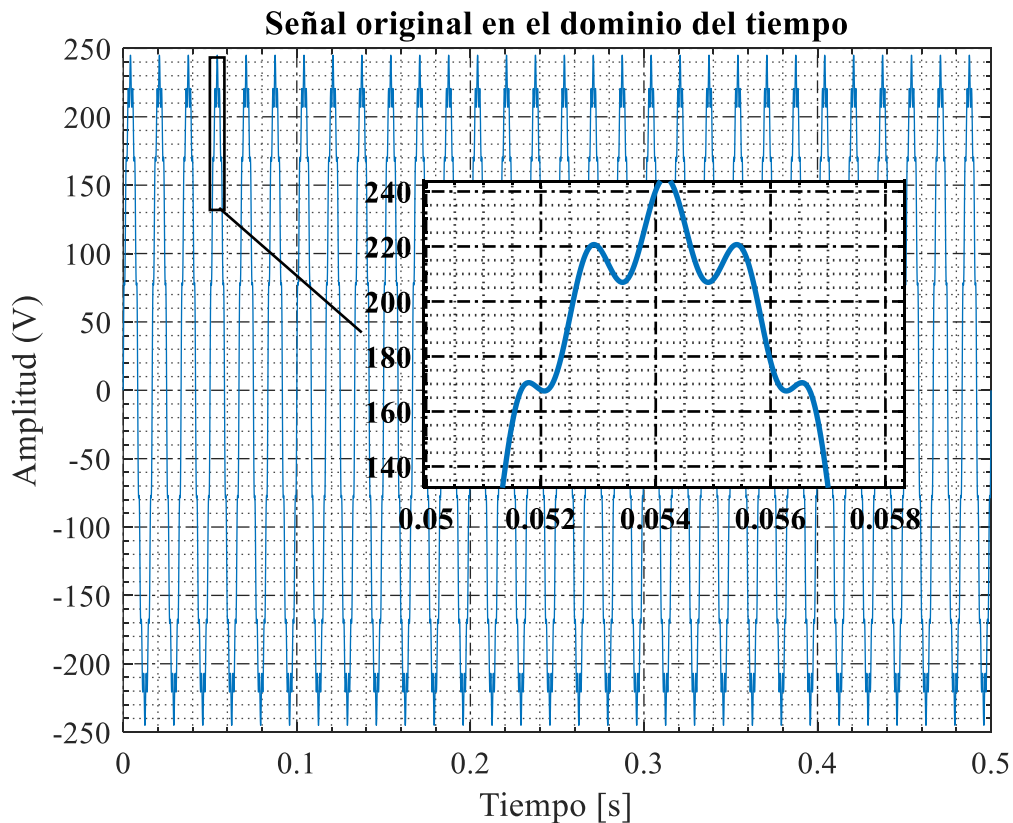


Figura 28. Señal original en el dominio del tiempo.

Fuente: Autor

En el dominio de la frecuencia de la señal original, Figura 30, la frecuencia de 181 Hz tiene una amplitud de 5.47 %, la frecuencia 300 Hz tiene una amplitud de 2.09 %, la frecuencia 420 tiene una amplitud de 0.70 %, la frecuencia 540 Hz tiene una amplitud de 2.04 %, la frecuencia 660 Hz tiene una amplitud de 1.04 %, la frecuencia 780 Hz tiene una amplitud de 7.09 % y la frecuencia 900 Hz tiene una amplitud de 1.03 %. Aplicado el filtro activo, Figura 31, Todas las frecuencias en los diferentes rangos desaparecieron y no se obtienen picos importantes a lo largo del análisis frecuencial.

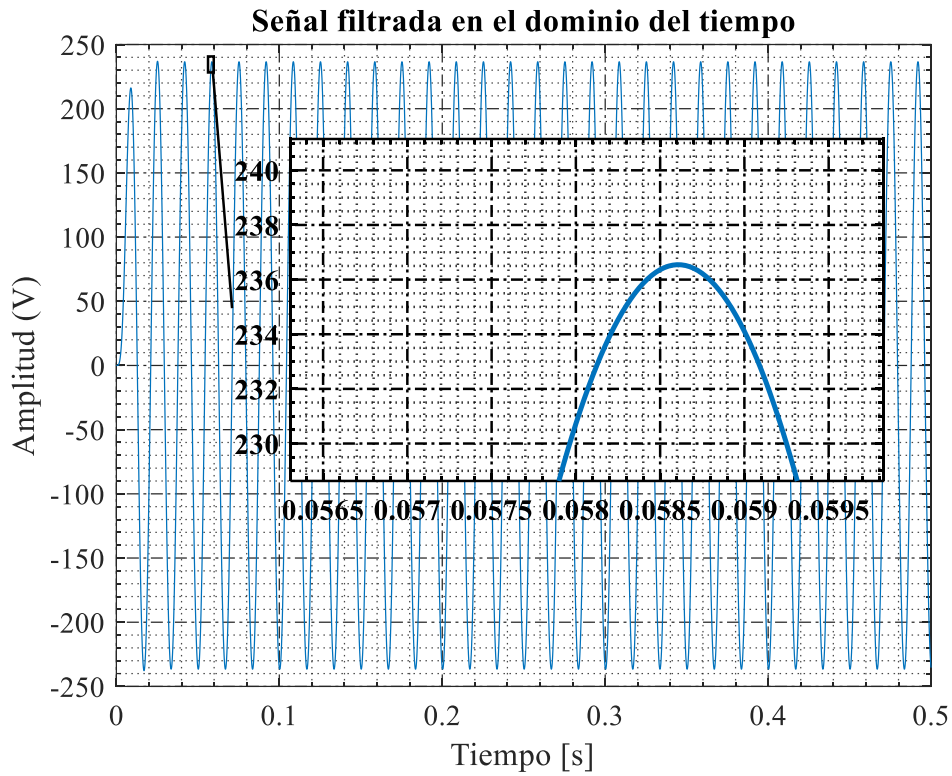


Figura 29. Señal filtrada en el dominio del tiempo.

Fuente: Autor

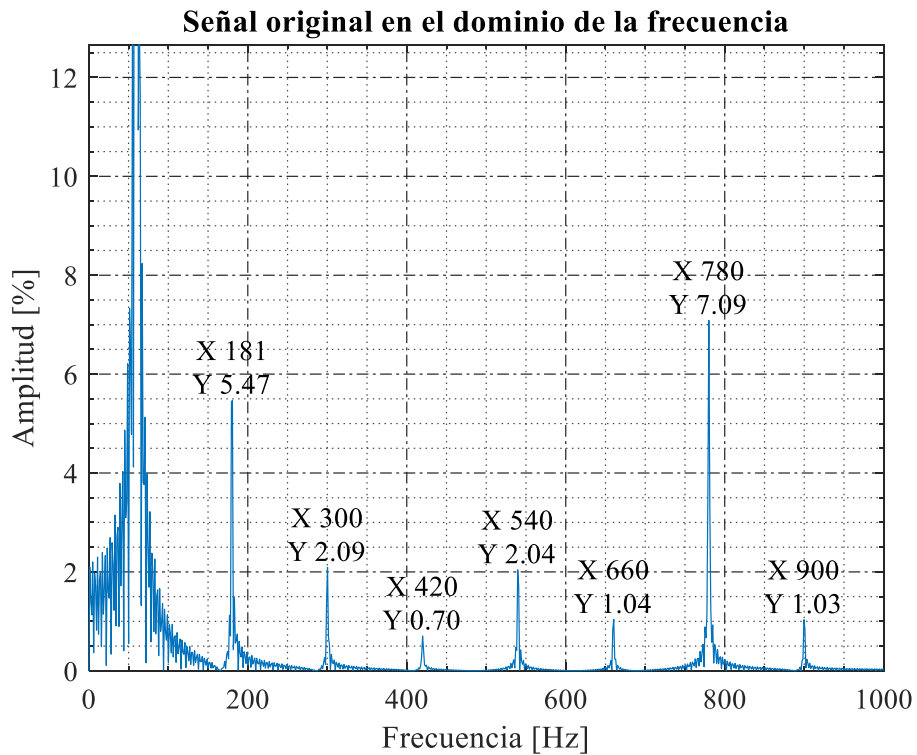


Figura 30. Señal original en el dominio de la frecuencia.

Fuente: Autor

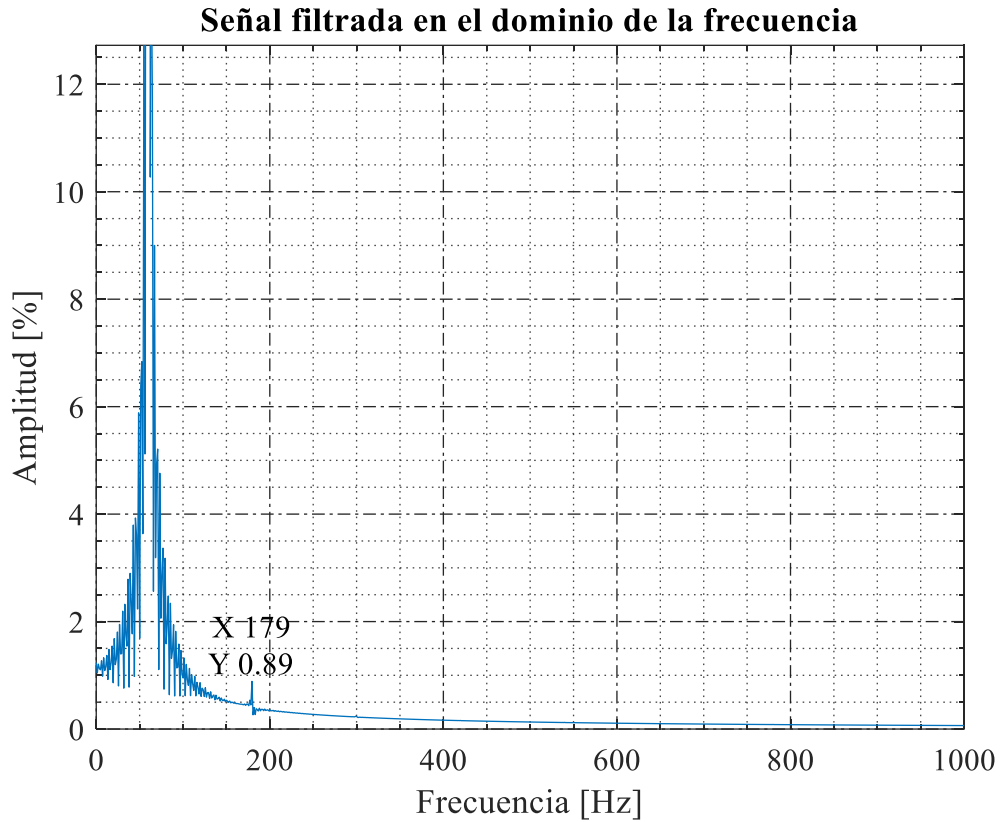


Figura 31. Señal filtrada en el dominio de la frecuencia.

Fuente: Autor

En la Figura 32, expresa el THD inicial con un valor de 9.54 % de THD, reflejado en la Tabla 20. Con la aplicación del filtro El THD disminuye a un porcentaje de 1.34 % el cual se encuentra en los parámetros establecidos por la norma IEEE STD 519-2014.

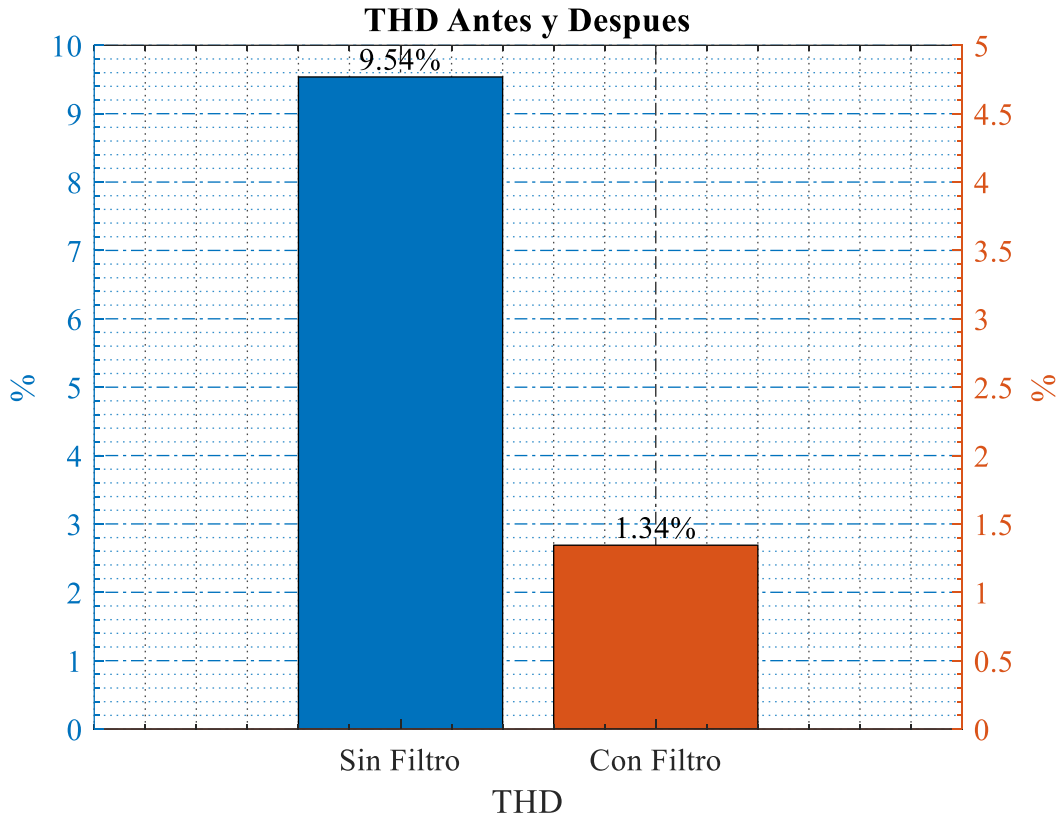


Figura 32. THD Antes y Después

Fuente: Autor

El nodo MTA_S_87877 de 15 lámparas de HPS, el dominio del tiempo original presenta picos que oscilan en amplitud de 227 V, la principal deformación se localiza en los picos en cada ciclo, Figura 33. En la Figura 34, se observa el comportamiento del filtro activo aplicado, el cual rectifica la onda donde el pico de amplitud es de 237 V, se estabiliza y se asemeja a una onda sinusoidal perfecta en cada ciclo.

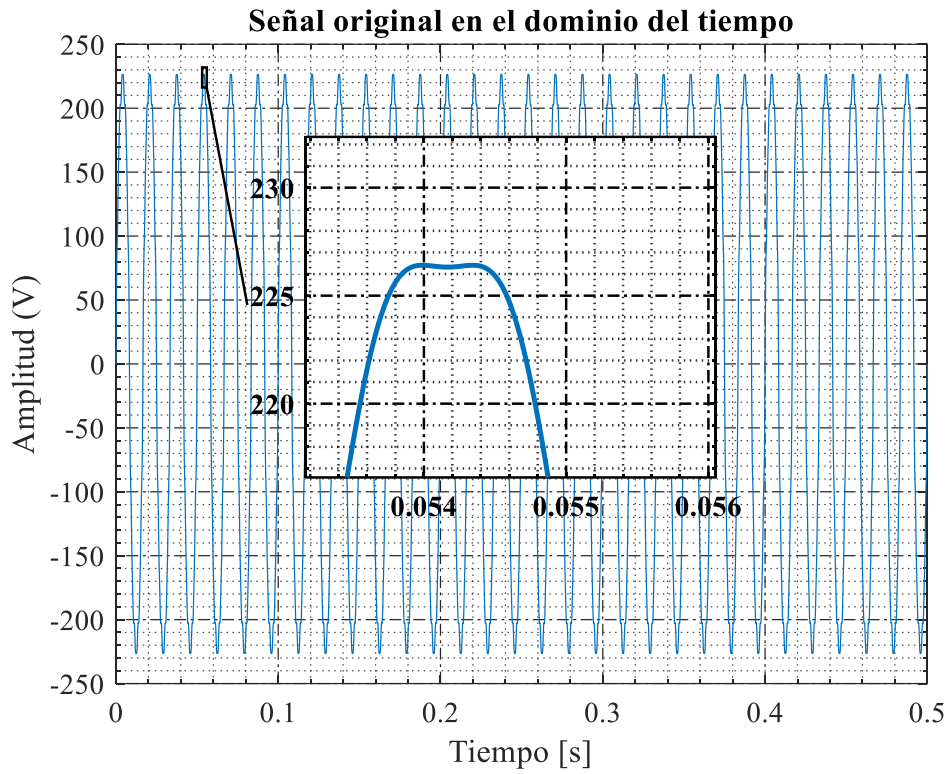


Figura 33. Señal original en el dominio del tiempo.

Fuente: Autor

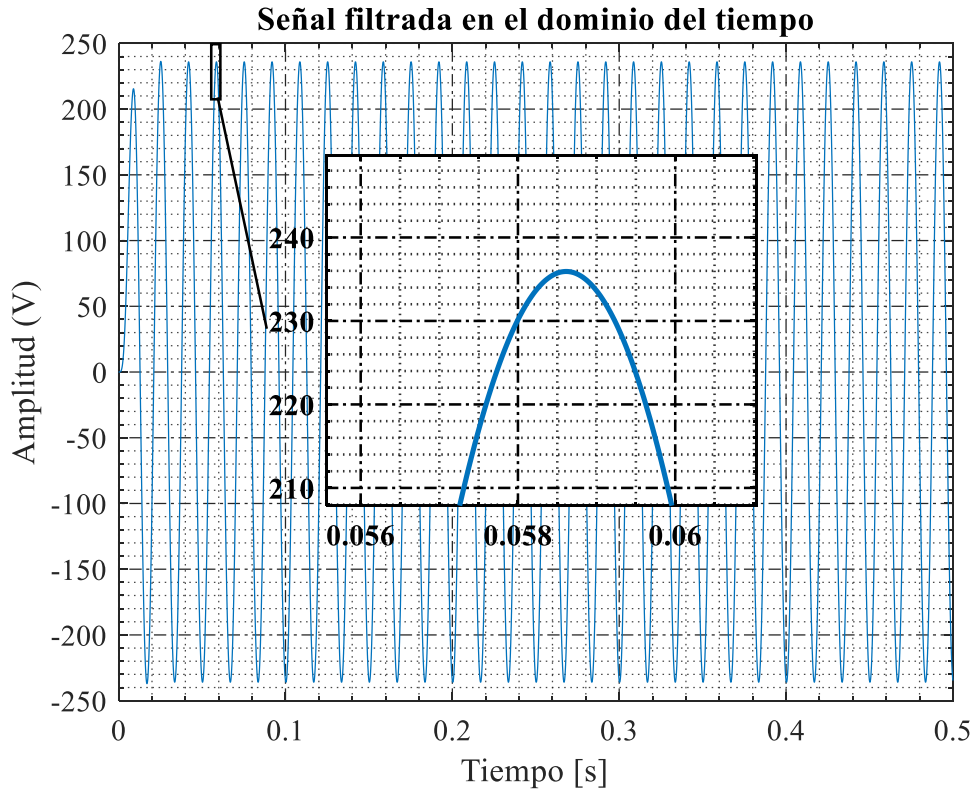


Figura 34. Señal filtrada en el dominio del tiempo.

Fuente: Autor

En el dominio de la frecuencia de la señal original, Figura 35, la frecuencia de 179 Hz tiene una amplitud de 7.83 %, la frecuencia 300 Hz tiene una amplitud de 2.97 %, la frecuencia 420 tiene una amplitud de 1%, la frecuencia 540 Hz tiene una amplitud de 2.96 %, la frecuencia 660 Hz tiene una amplitud de 1.35 %, la frecuencia 780 Hz tiene una amplitud de 1.01 % y la frecuencia 900 Hz tiene una amplitud de 1.43 %. Aplicado el filtro activo, Figura 36, Todas las frecuencias en los diferentes rangos desaparecieron y no se obtienen picos importantes a lo largo del análisis frecuencial.

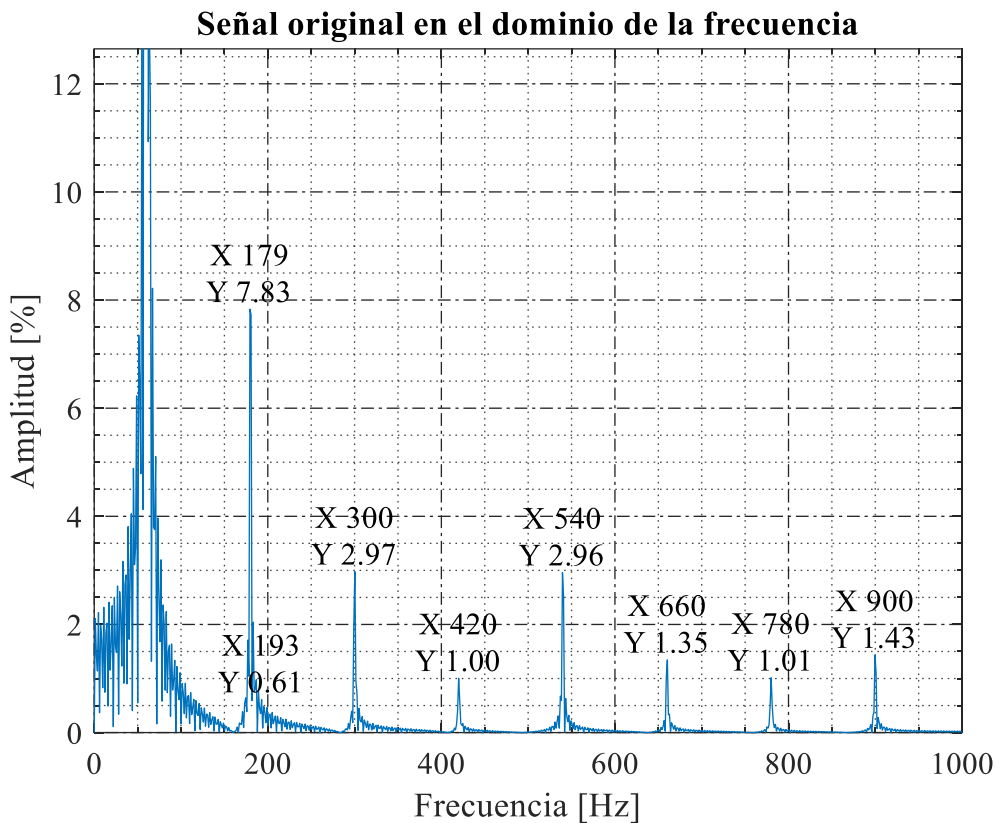


Figura 35. Señal original en el dominio de la frecuencia.

Fuente: Autor

En la Figura 37, expresa el THD inicial con un valor de 9.21 % de THD, reflejado en la Tabla 20. Con la aplicación del filtro El THD disminuye a un porcentaje de 1.50 % el cual se encuentra en los parámetros establecidos por la norma IEEE STD 519-2014.

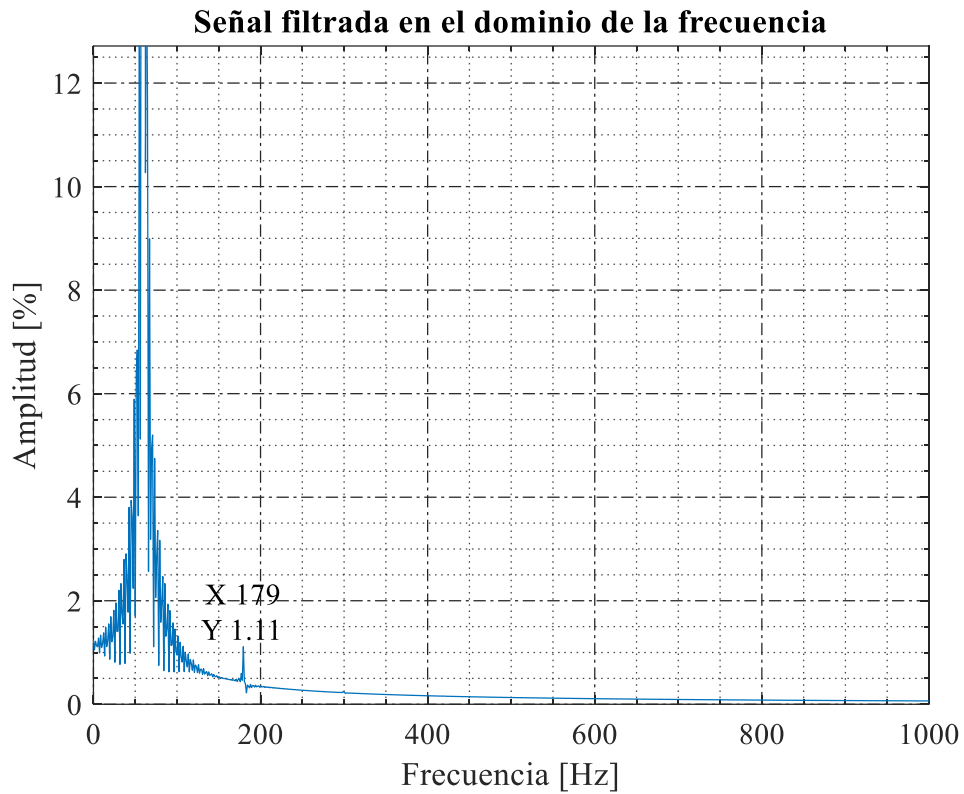


Figura 36. Señal original en el dominio de la frecuencia.

Fuente: Autor

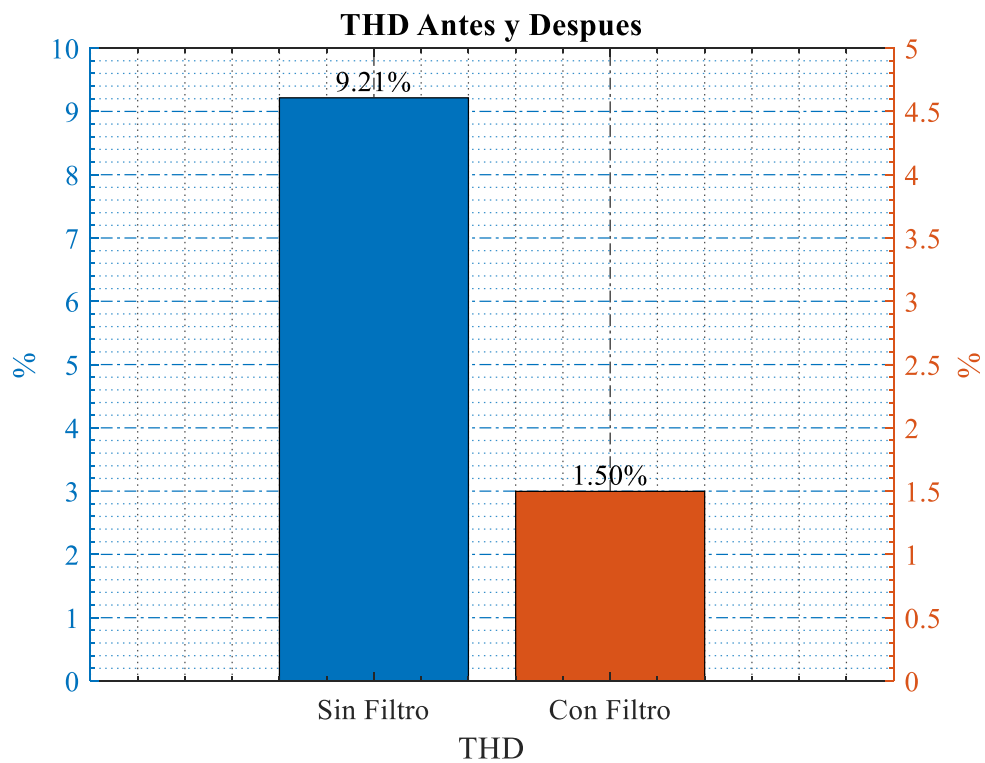


Figura 37 THD Antes y Después.

Fuente: Autor

El nodo MTA_S_299878 de 15 lámparas de HPS, el dominio del tiempo original presenta picos que oscilan en amplitud entre 204 V a 227 V, la principal deformación se localiza en los picos en cada ciclo, Figura 38. En la Figura 39, se observa el comportamiento del filtro activo aplicado, el cual rectifica la onda donde el pico de amplitud es de 236 V, se estabiliza y se asemeja a una onda sinusoidal perfecta en cada ciclo.

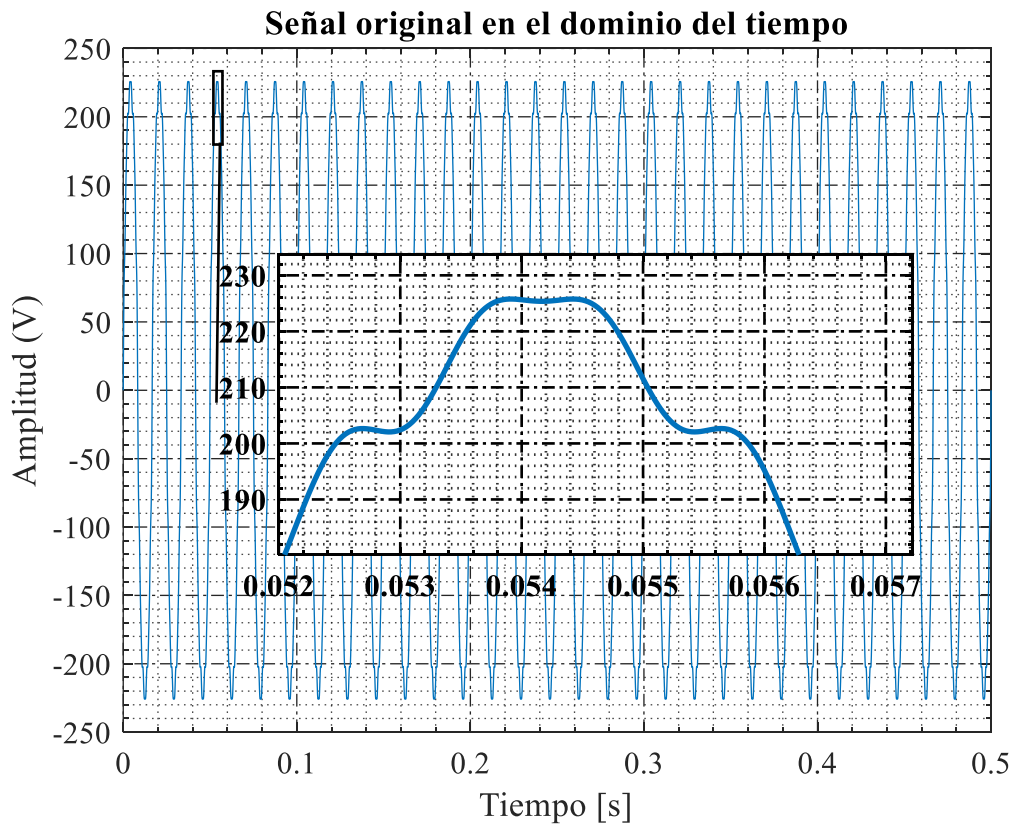


Figura 38. Señal original en el dominio del tiempo.

Fuente: Autor

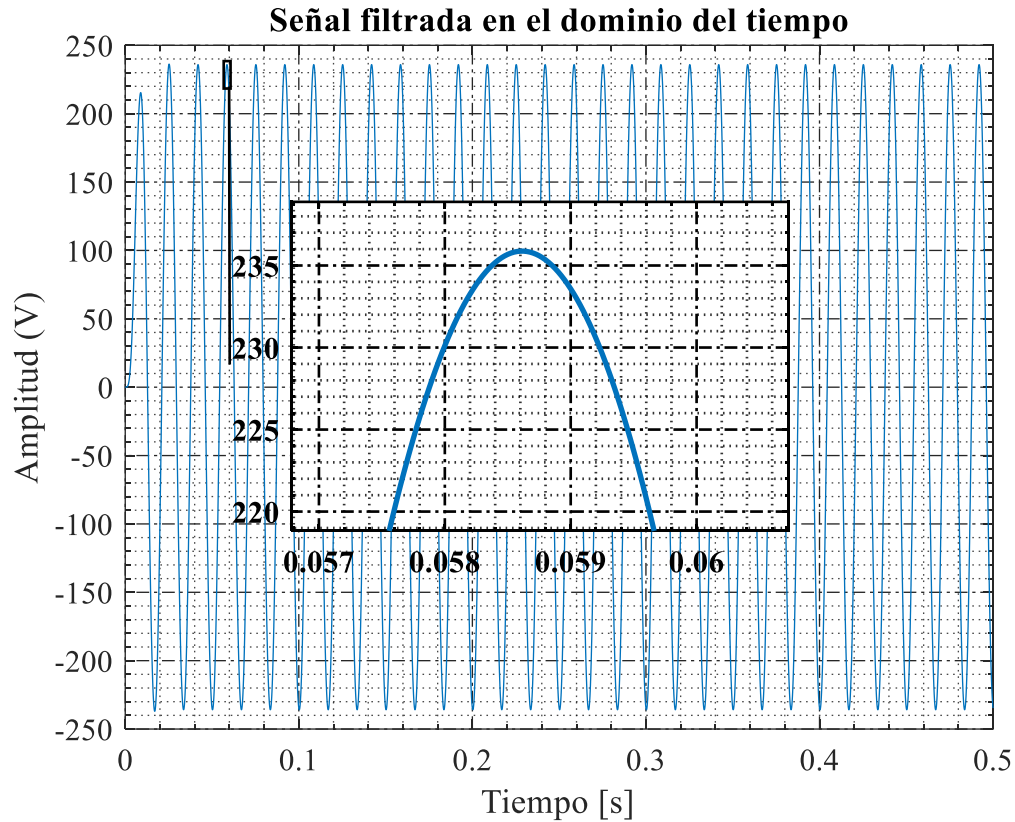


Figura 39. Señal filtrada en el dominio del tiempo.

Fuente: Autor

En el dominio de la frecuencia de la señal original, Figura 40, la frecuencia de 179 Hz tiene una amplitud de 8.01 %, la frecuencia 300 Hz tiene una amplitud de 3.07 %, la frecuencia 420 tiene una amplitud de 1.11 %, la frecuencia 540 Hz tiene una amplitud de 3.05 %, la frecuencia 660 Hz tiene una amplitud de 1.53 %, la frecuencia 780 Hz tiene una amplitud de 1.01 % y la frecuencia 900 Hz tiene una amplitud de 1.53 %. Aplicado el filtro activo, Figura 41, Todas las frecuencias en los diferentes rangos desaparecieron y no se obtienen picos importantes a lo largo del análisis frecuencial.

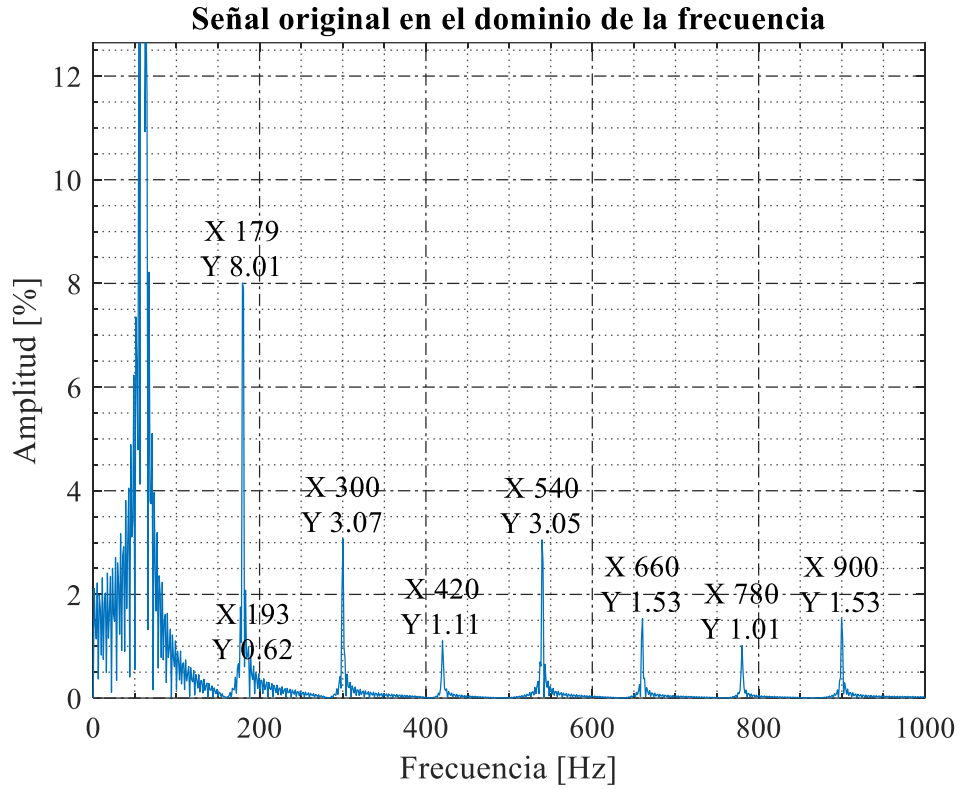


Figura 40. Señal original en el dominio de la frecuencia.

Fuente: Autor

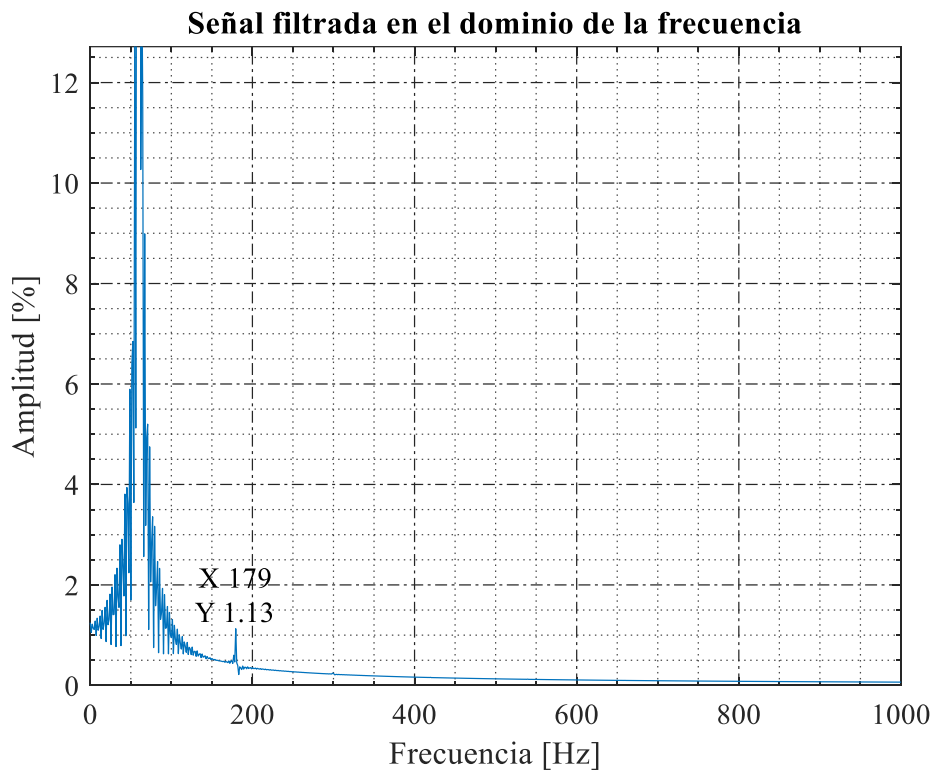


Figura 41. Señal filtrada en el dominio de la frecuencia.

Fuente: Autor

En la Figura 42, expresa el THD inicial con un valor de 9.48 % de THD, reflejado en la Tabla 20. Con la aplicación del filtro El THD disminuye a un porcentaje de 1.51 % el cual se encuentra en los parámetros establecidos por la norma IEEE STD 519-2014.

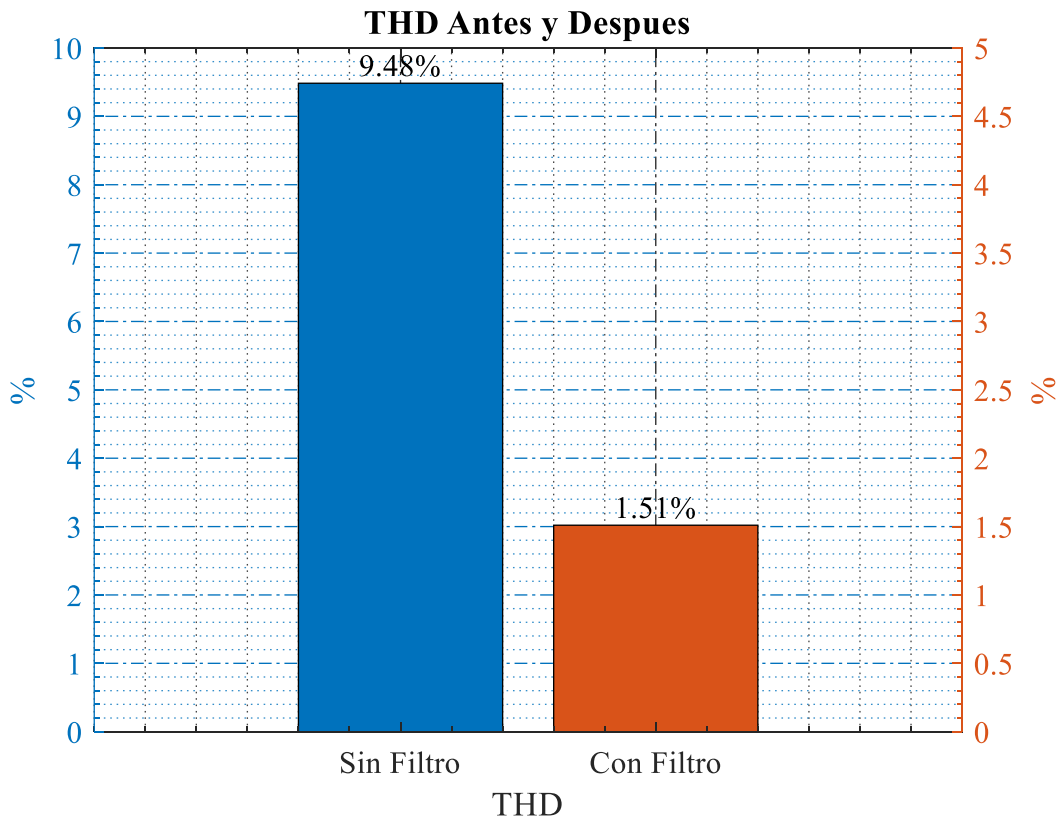


Figura 42. THD Antes y Después.

Fuente: Autor

El nodo MTA_S_331576 de 15 lámparas de HPS, el dominio del tiempo original presenta picos que oscilan en amplitud entre 201 V y 223 V, la principal deformación se localiza en los picos en cada ciclo, Figura 43. En la Figura 44, se observa el comportamiento del filtro activo aplicado, el cual rectifica la onda donde el pico de amplitud es de 236V, se estabiliza y se asemeja a una onda sinusoidal perfecta en cada ciclo.

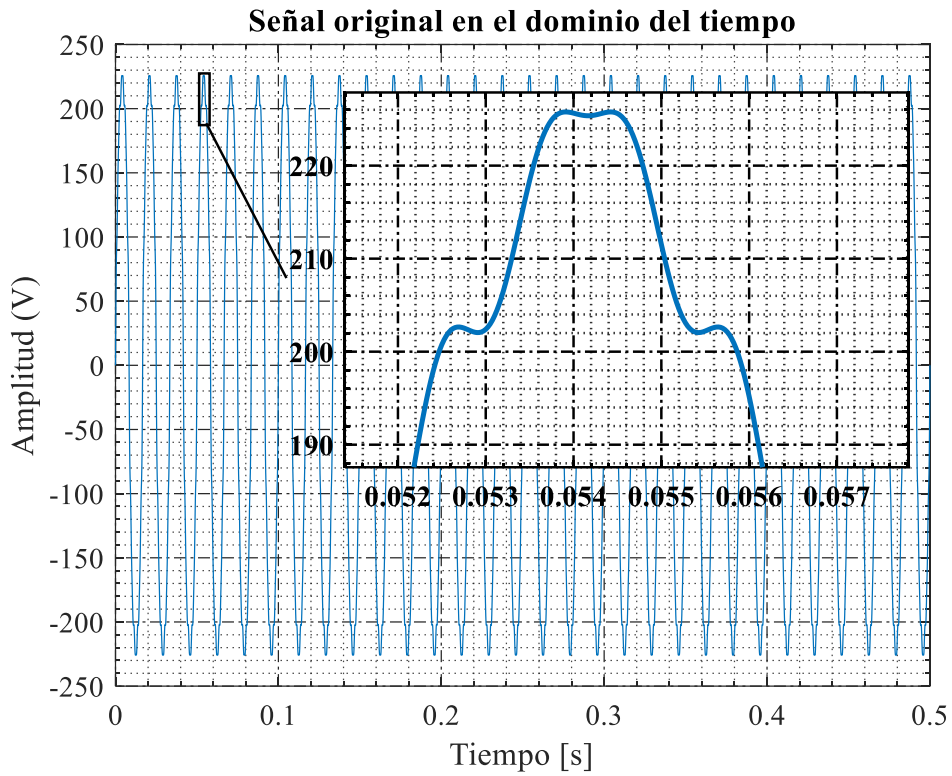


Figura 43. Señal original en el dominio del tiempo.

Fuente: Autor

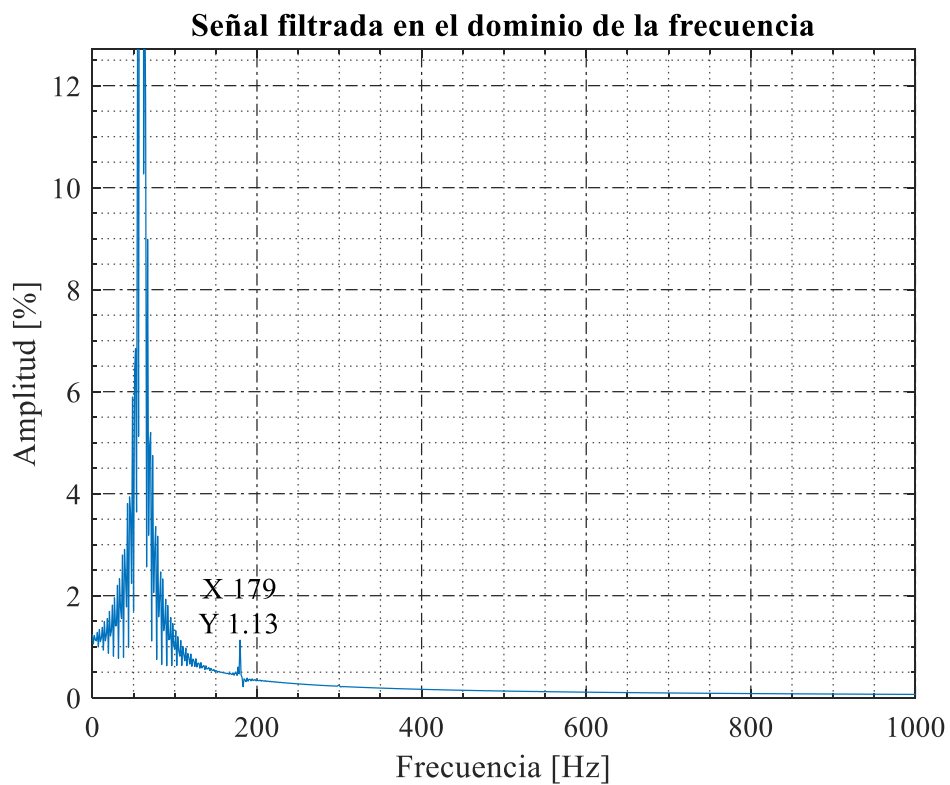


Figura 44. Señal filtrada en el dominio del tiempo.

Fuente: Autor

En el dominio de la frecuencia de la señal original, Figura 45, la frecuencia de 179 Hz tiene una amplitud de 8.01 %, la frecuencia 300 Hz tiene una amplitud de 3.07 %, la frecuencia 420 tiene una amplitud de 1.11 \$, la frecuencia 540 Hz tiene una amplitud de 3.05 %, la frecuencia 660 Hz tiene una amplitud de 1.53 %, la frecuencia 780 Hz tiene una amplitud de 1.01 % y la frecuencia 900 Hz tiene una amplitud de 1.53 %. Aplicado el filtro activo, Figura 46, Todas las frecuencias en los diferentes rangos desaparecieron y no se obtienen picos importantes a lo largo del análisis frecuencial.

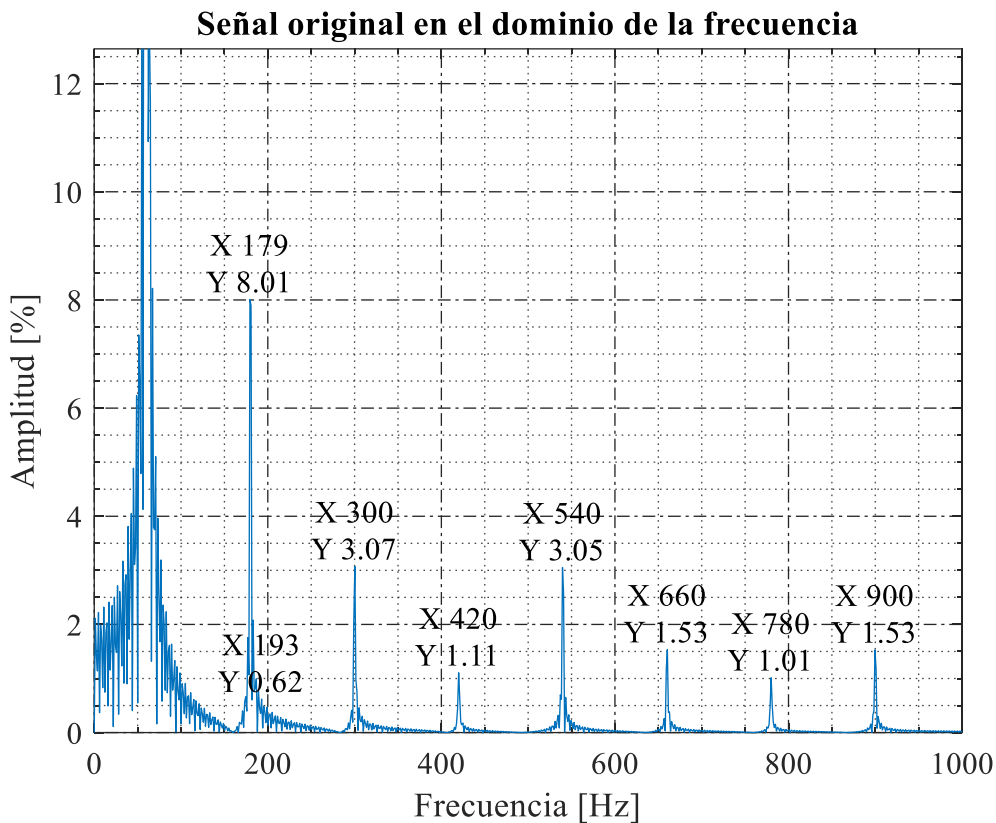


Figura 45. Señal original en el dominio de la frecuencia.

Fuente: Autor

En la Figura 47, expresa el THD inicial con un valor de 9.48 % de THD, reflejado en la Tabla 20. Con la aplicación del filtro El THD disminuye a un porcentaje de 1.51 % el cual se encuentra en los parámetros establecidos por la norma IEEE STD 519-2014.

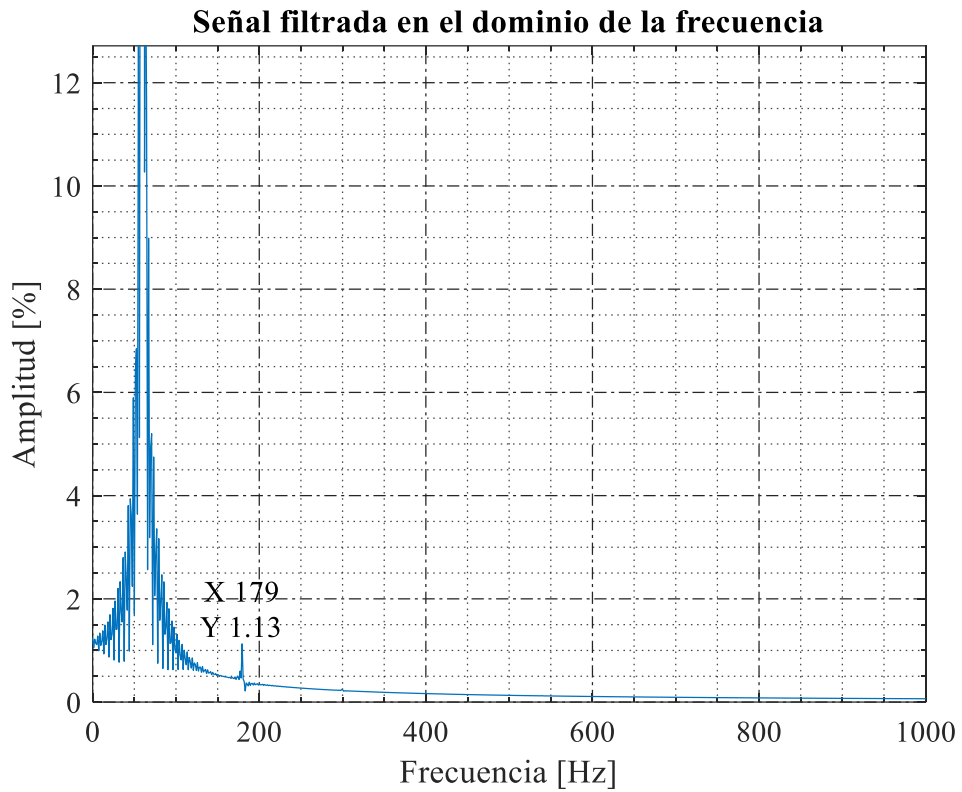


Figura 46. Señal original en el dominio de la frecuencia.

Fuente: Autor

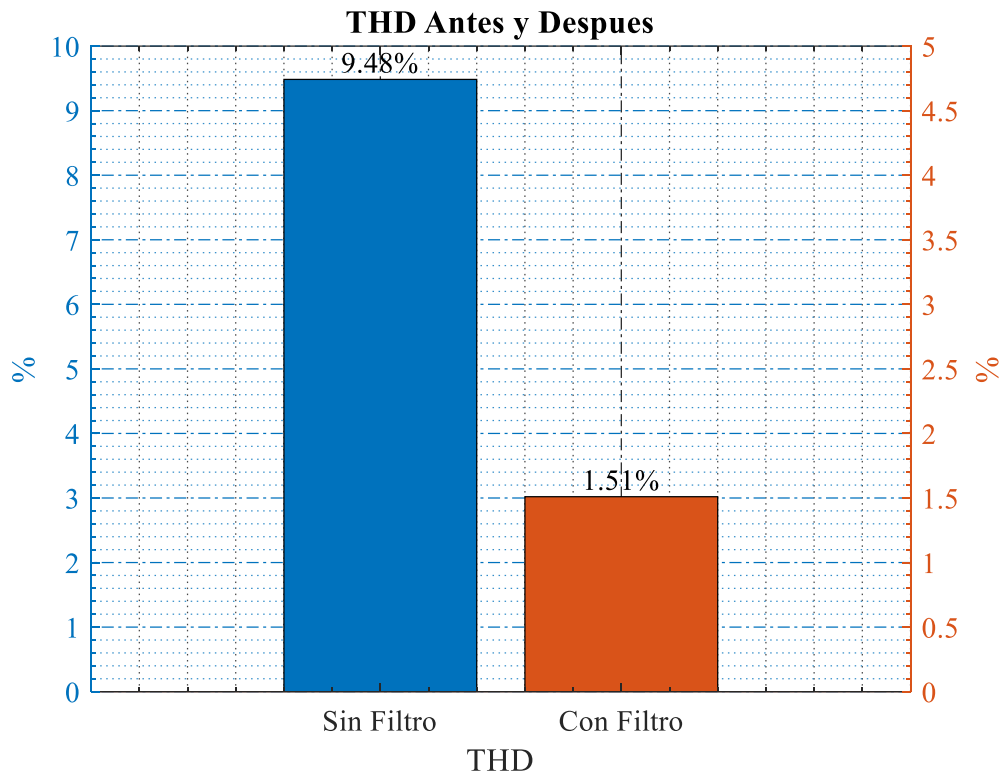


Figura 47. THD Antes y Después.

Fuente: Autor

El nodo MTA_S_61155 de 15 lámparas de HPS, el dominio del tiempo original presenta picos que oscilan en amplitud entre 221 V y 236 V, la principal deformación se localiza en los picos en cada ciclo, Figura 48. En la Figura 49, se observa el comportamiento del filtro activo aplicado, el cual rectifica la onda donde el pico de amplitud es de 236 V, se estabiliza y se asemeja a una onda sinusoidal perfecta en cada ciclo.

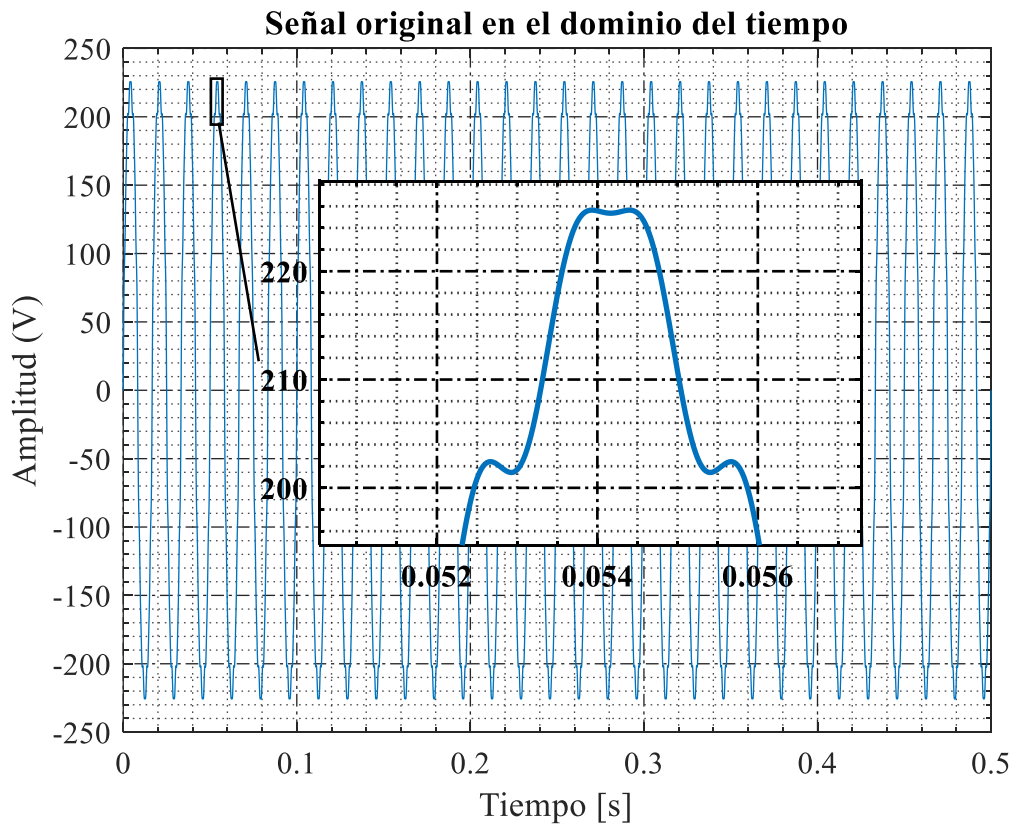


Figura 48. Señal original en el dominio del tiempo.

Fuente: Autor

En el dominio de la frecuencia de la señal original, Figura 50, la frecuencia de 179 Hz tiene una amplitud de 8.28 %, la frecuencia 300 Hz tiene una amplitud de 3.17 %, la frecuencia 420 tiene una amplitud de 1 %, la frecuencia 540 Hz tiene una amplitud de 3.15 %, la frecuencia 660 Hz tiene una amplitud de 1.54 %, la frecuencia 780 Hz tiene una amplitud de 1.01 % y la frecuencia 900 Hz tiene una amplitud de 1.53 %. Aplicado el filtro activo, Figura 51, Todas las frecuencias en los diferentes rangos desaparecieron y no se obtienen picos importantes a lo largo del análisis frecuencial.

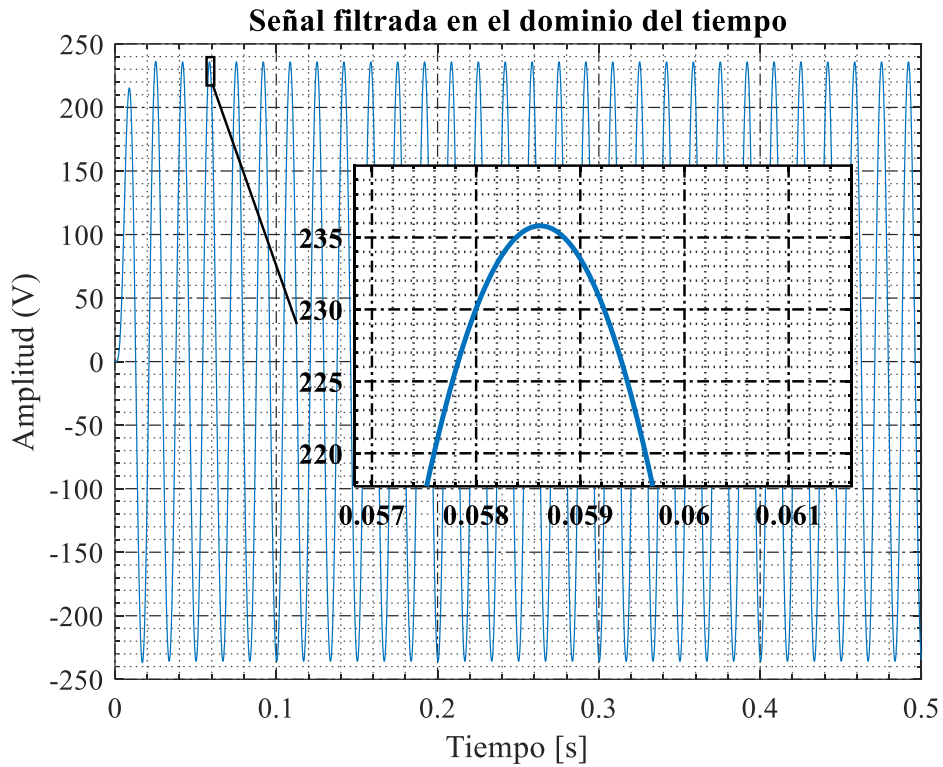


Figura 49. Señal filtrada en el dominio del tiempo.

Fuente: Autor

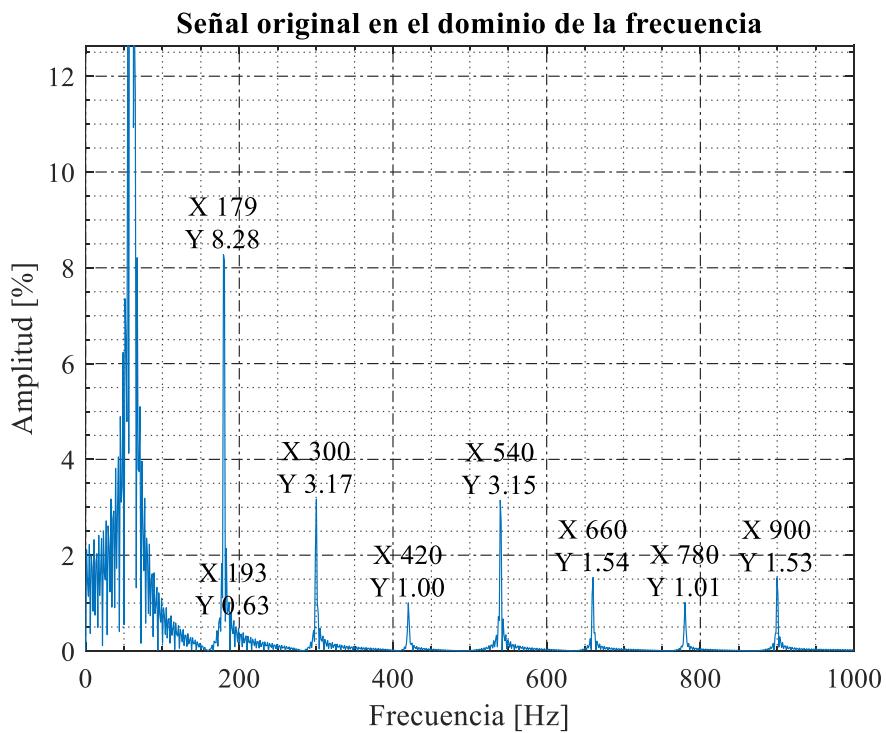


Figura 50. Señal original en el dominio de la frecuencia.

Fuente: Autor

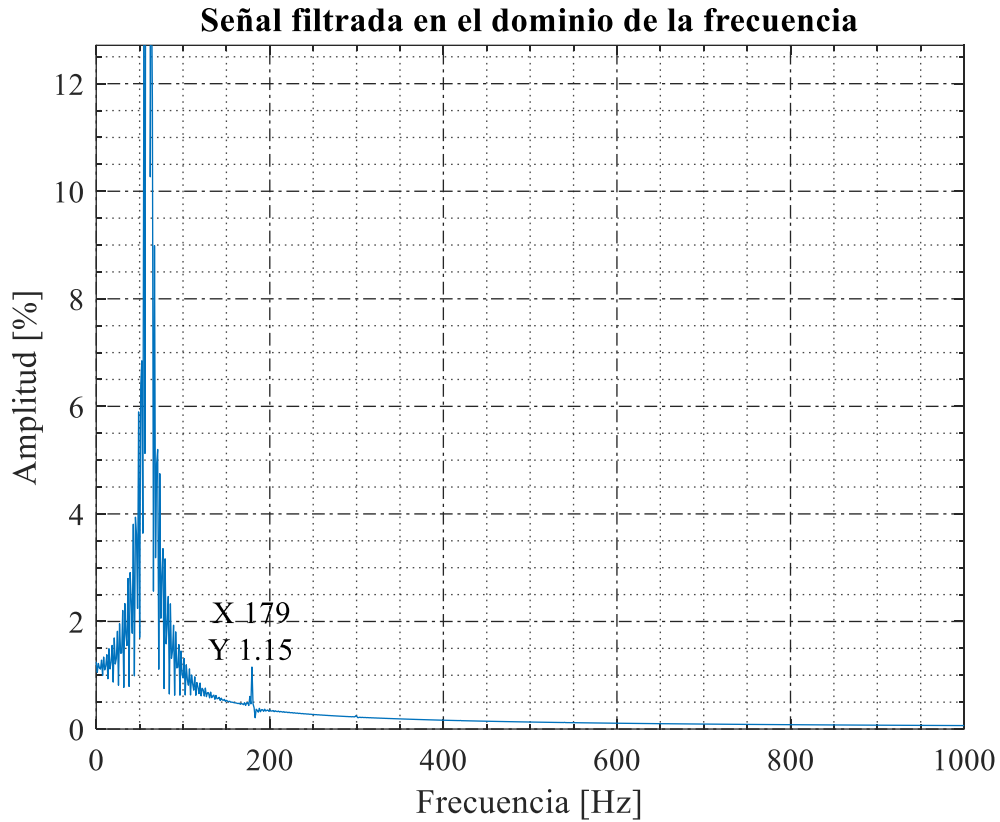


Figura 51. Señal filtrada en el dominio de la frecuencia.

Fuente: Autor

En la Figura 52, expresa el THD inicial con un valor de 9.76 % de THD, reflejado en la Tabla 20. Con la aplicación del filtro El THD disminuye a un porcentaje de 1.53 % el cual se encuentra en los parámetros establecidos por la norma IEEE STD 519-2014.

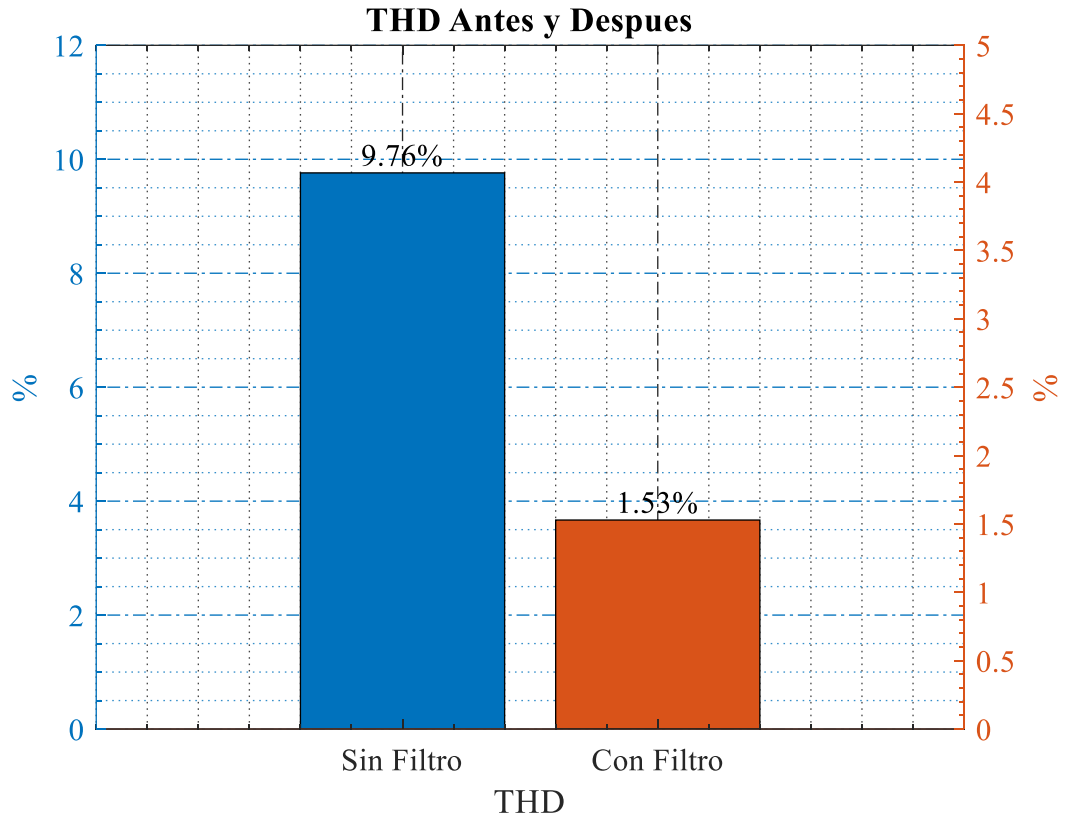


Figura 52. THD Antes y Después.

Fuente: Autor

4.2. Resultados Método P-Q luminarias LED

El nodo MTA_S_331576 de 10 lámparas LED, el dominio del tiempo original presenta picos que oscilan en amplitud entre 220 V y 235 V, la principal deformación se localiza en los picos en cada ciclo, Figura 53. En la Figura 54, se observa el comportamiento del filtro activo aplicado, el cual rectifica la onda donde el pico de amplitud es de 237 V, se estabiliza y se asemeja a una onda sinusoidal perfecta en cada ciclo.

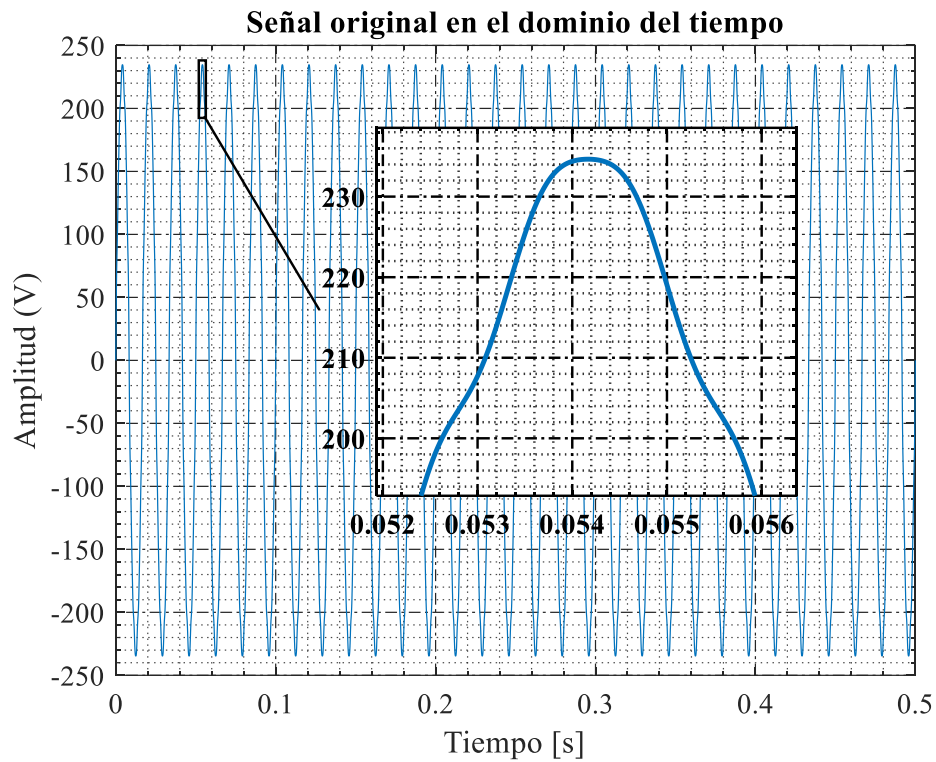


Figura 53. Señal original en el dominio del tiempo.

Fuente: Autor

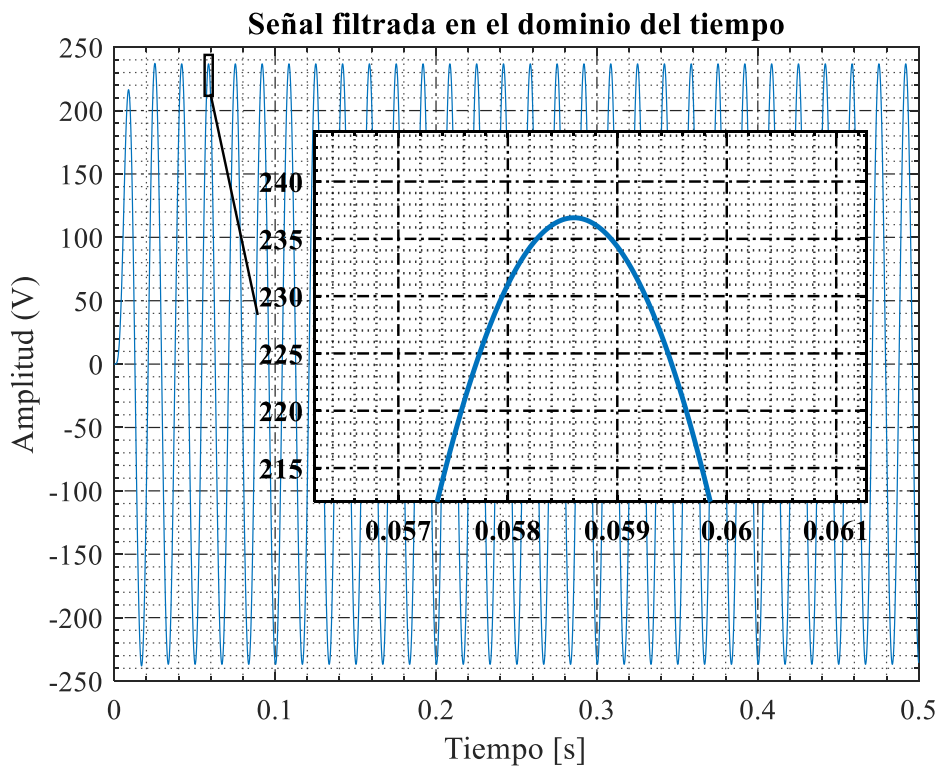


Figura 54. Señal filtrada en el dominio del tiempo.

Fuente: Autor

En el dominio de la frecuencia de la señal original, Figura 55, la frecuencia de 181 Hz tiene una amplitud de 4.30 %, la frecuencia 300 Hz tiene una amplitud de 2.58 %, la frecuencia 420 tiene una amplitud de 1 %, la frecuencia 540 Hz tiene una amplitud de 2.31 %, la frecuencia 660 Hz tiene una amplitud de 1.15 %, la frecuencia 780 Hz tiene una amplitud de 0.61 %, la frecuencia 900 Hz tiene una amplitud de 0.86 %. Aplicado el filtro activo, Figura 56, Todas las frecuencias en los diferentes rangos desaparecieron y no se obtienen picos importantes a lo largo del análisis frecuencial.

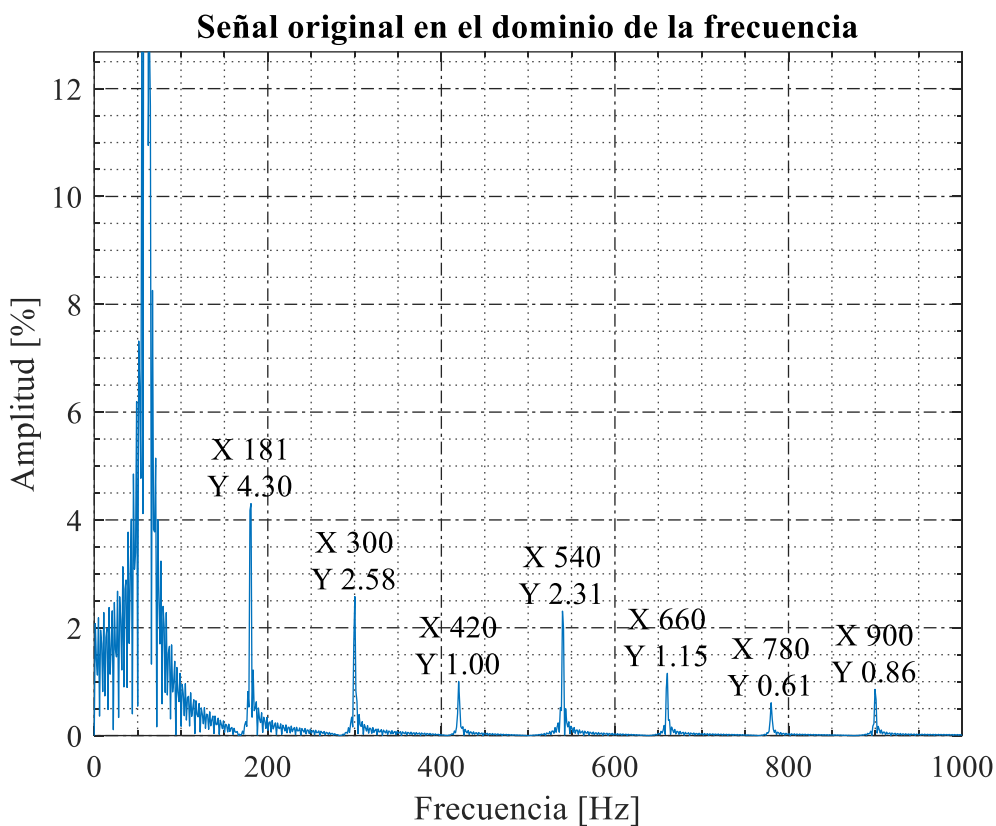


Figura 55. Señal original en el dominio de la frecuencia.

Fuente: Autor3

En la Figura 57, expresa el THD inicial con un valor de 5.75 % de THD, reflejado en la Tabla 21. Con la aplicación del filtro El THD disminuye a un porcentaje de 1.28 % el cual se encuentra en los parámetros establecidos por la norma IEEE STD 519-2014.

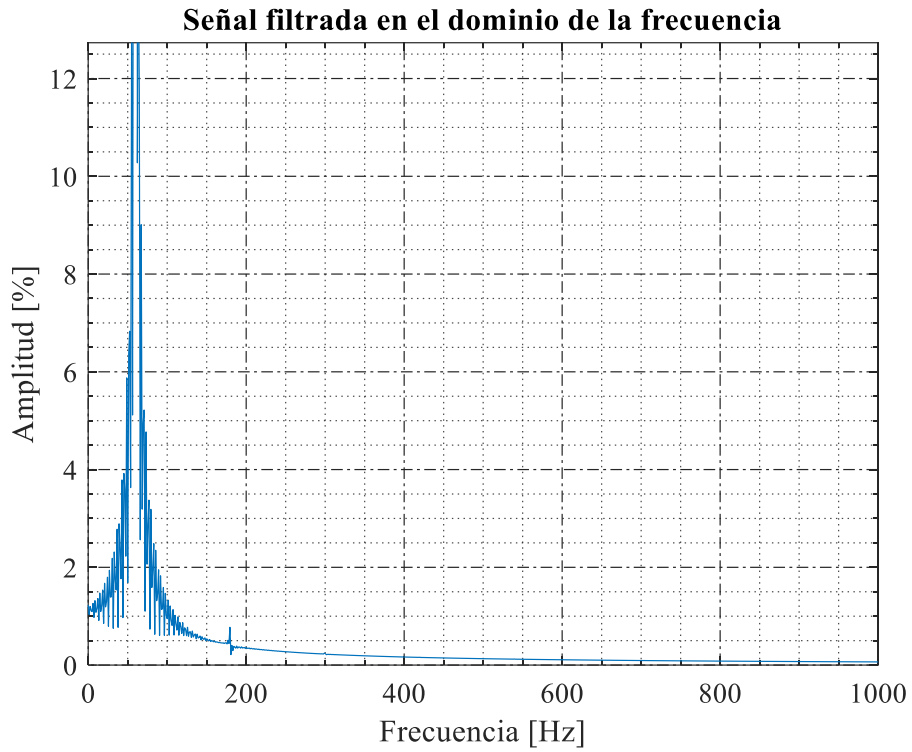


Figura 56. Señal filtrada en el dominio de la frecuencia.

Fuente: Autor

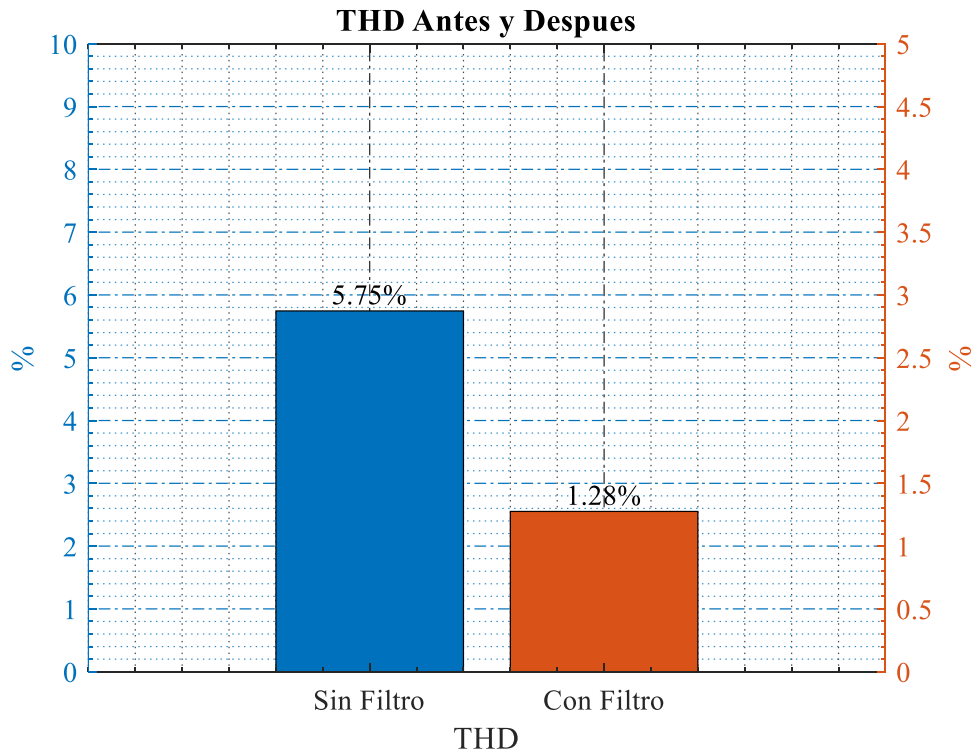


Figura 57. THD Antes y Después.

Fuente: Autor

El nodo MTA_S_61155 de 10 lámparas LED, el dominio del tiempo original presenta picos que oscilan en amplitud entre 200 V y 235 V, la principal deformación se localiza en los picos en cada ciclo, Figura 58. En la Figura 59, se observa el comportamiento del filtro activo aplicado, el cual rectifica la onda donde el pico de amplitud es de 239 V, se estabiliza y se asemeja a una onda sinusoidal perfecta en cada ciclo.

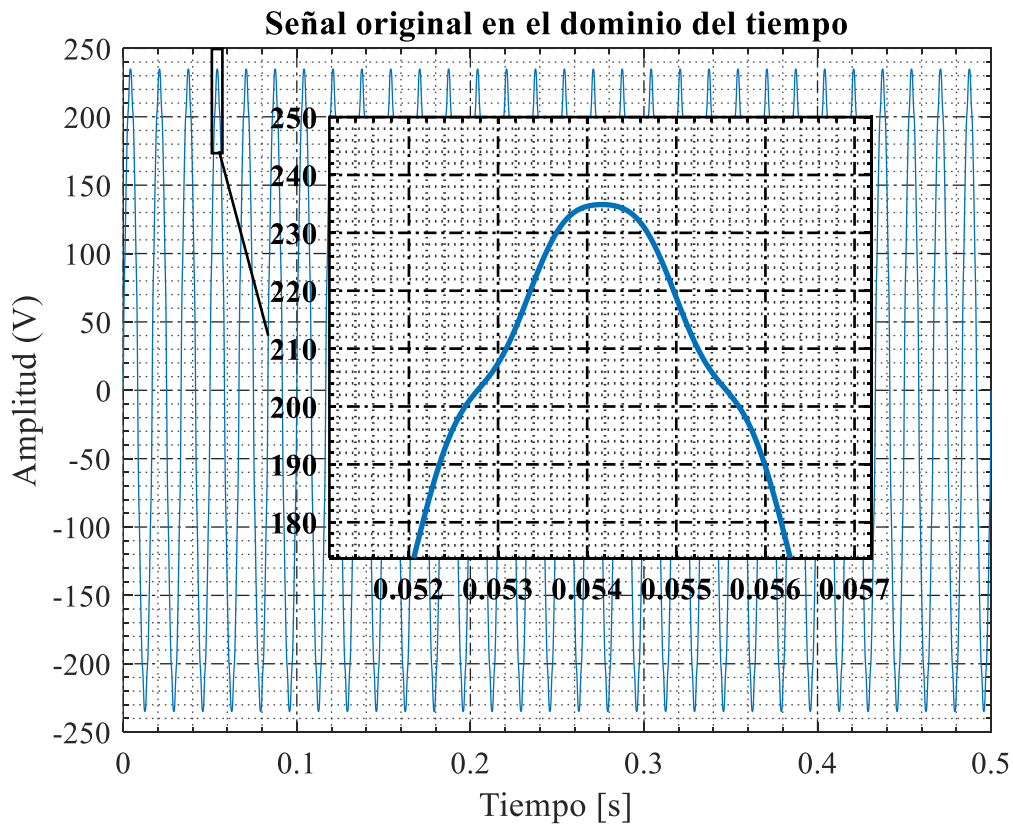


Figura 58. Señal original en el dominio del tiempo.

Fuente: Autor

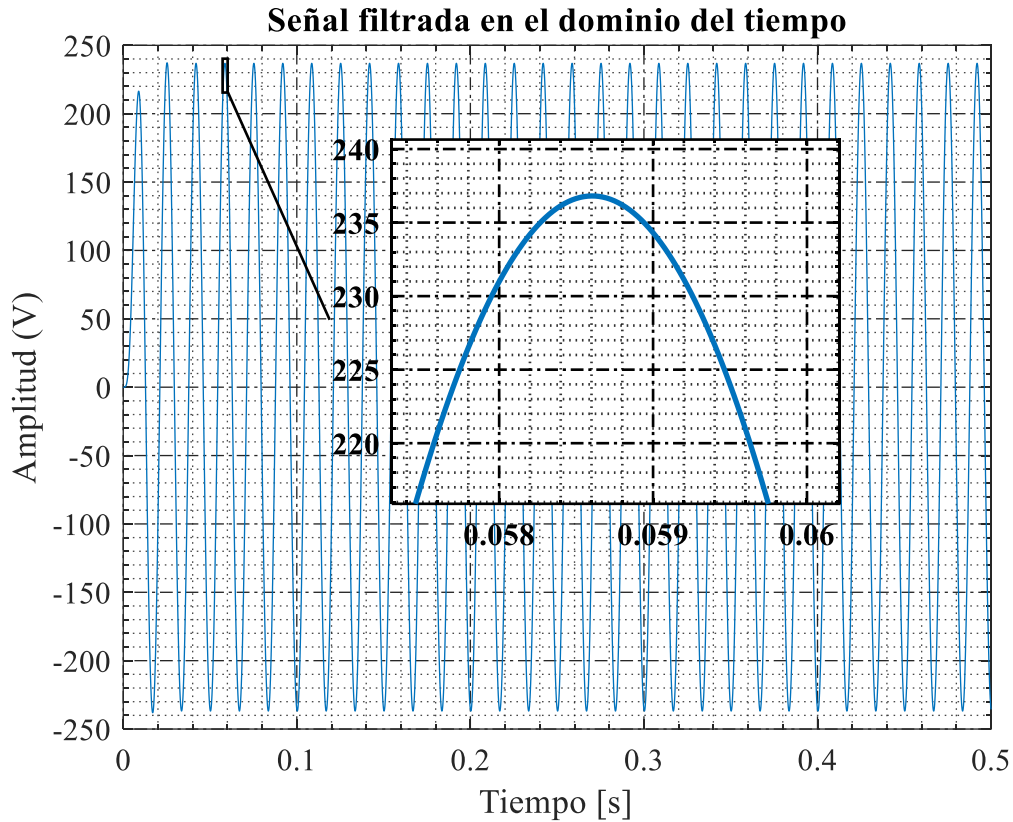


Figura 59. Señal original en el dominio del tiempo.

Fuente: Autor

En el dominio de la frecuencia de la señal original, Figura 60, la frecuencia de 181 Hz tiene una amplitud de 4.39 %, la frecuencia 300 Hz tiene una amplitud de 2.77 %, la frecuencia 420 tiene una amplitud de 1.11 %, la frecuencia 540 Hz tiene una amplitud de 2.40 %, la frecuencia 660 Hz tiene una amplitud de 1.16 %, la frecuencia 780 Hz tiene una amplitud de 0.61 %, la frecuencia 900 Hz tiene una amplitud de 0.86 %. Aplicado el filtro activo, Figura 61, Todas las frecuencias en los diferentes rangos desaparecieron y no se obtienen picos importantes a lo largo del análisis frecuencial.

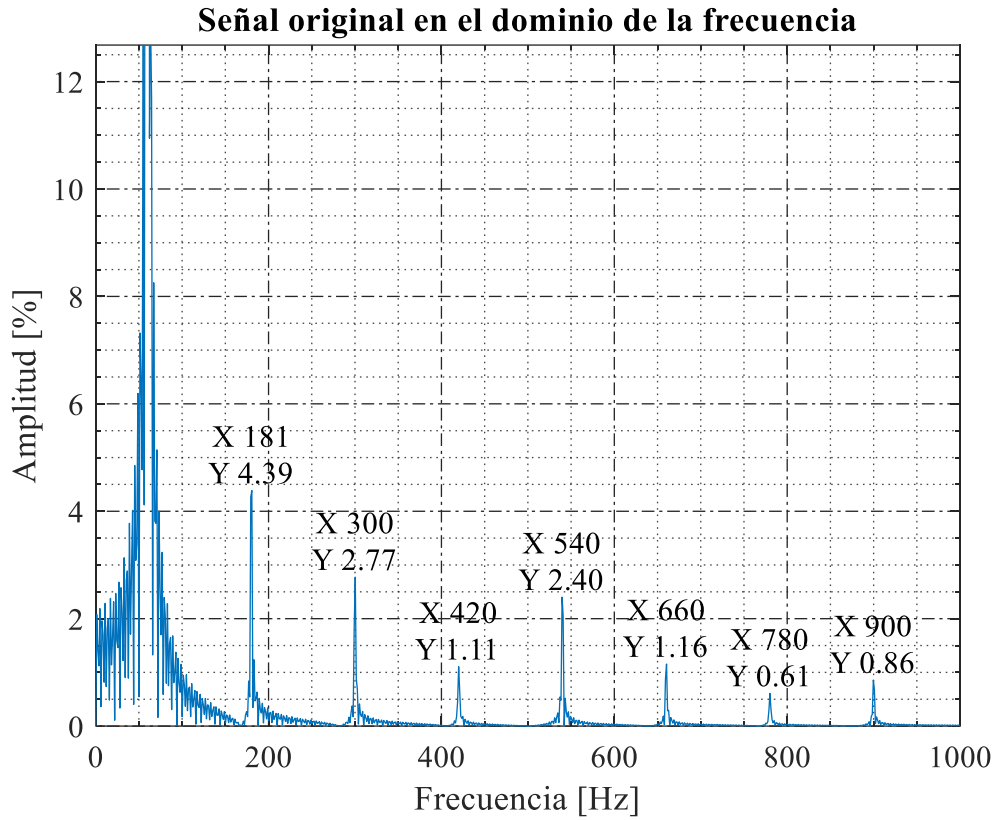


Figura 60. Señal original en el dominio de la frecuencia.
Fuente: Autor

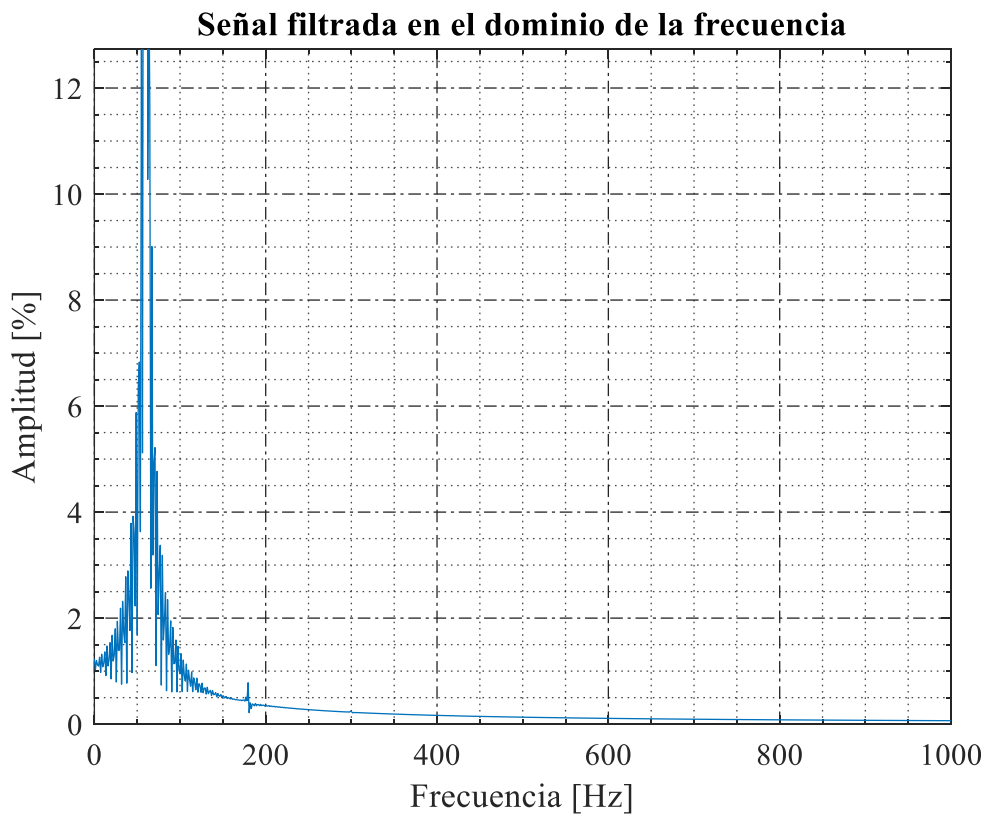


Figura 61. Señal original en el dominio de la frecuencia.
Fuente: Autor

En la Figura 62, expresa el THD inicial con un valor de 5.96 % de THD, reflejado en la Tabla 21. Con la aplicación del filtro El THD disminuye a un porcentaje de 1.28 % el cual se encuentra en los parámetros establecidos por la norma IEEE STD 519-2014.

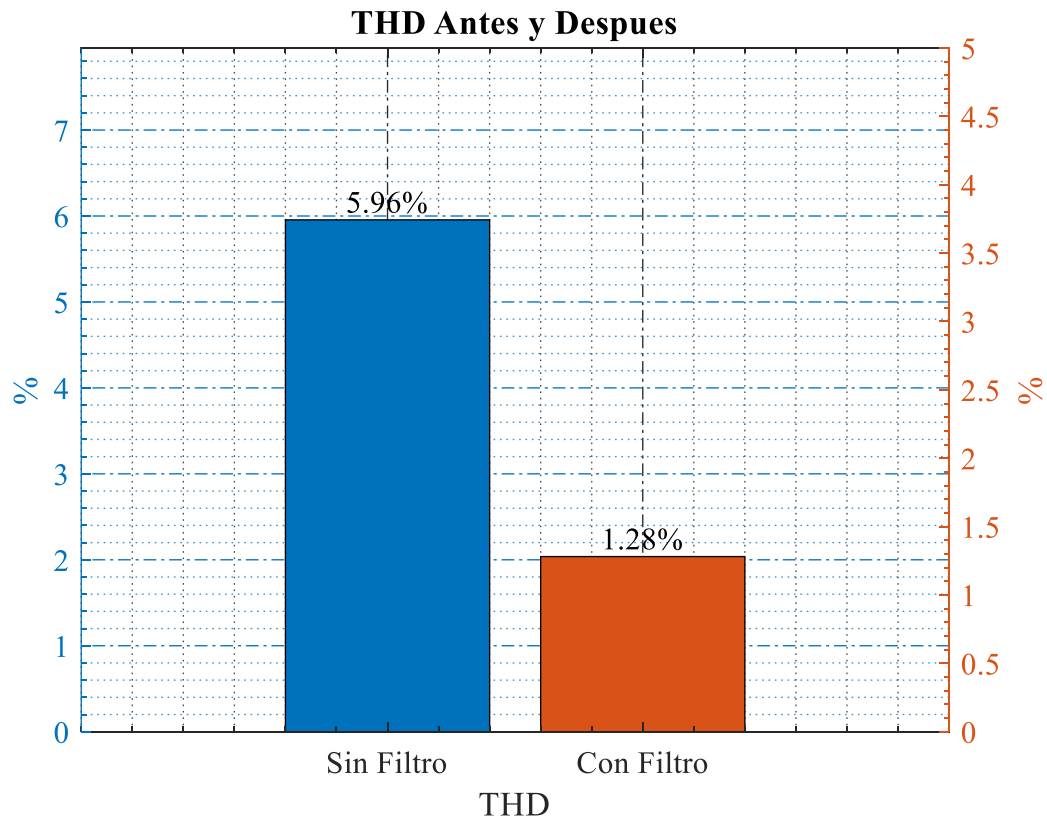


Figura 62. THD Antes y Después.
Fuente: Autor

El nodo MTA_S_87877 de 10 lámparas LED, el dominio del tiempo original presenta picos que oscilan en amplitud entre 203 V y 235 V, la principal deformación se localiza en los picos en cada ciclo, Figura 63. En la Figura 64, se observa el comportamiento del filtro activo aplicado, el cual rectifica la onda donde el pico de amplitud es de 232 V, se estabiliza y se asemeja a una onda sinusoidal perfecta en cada ciclo.

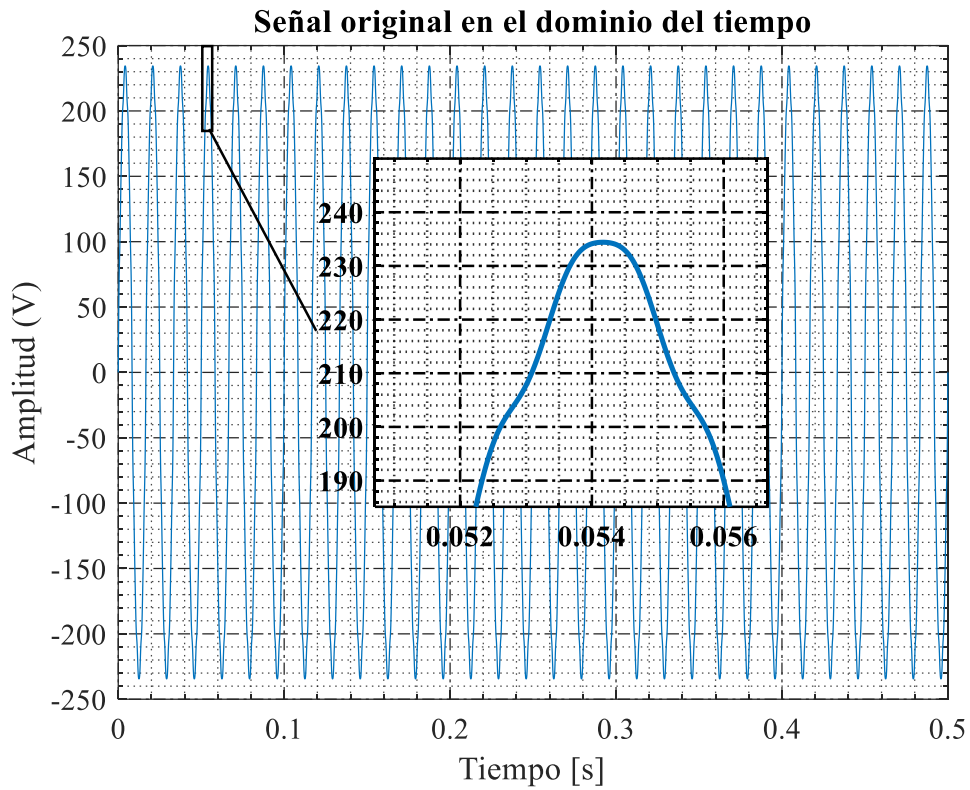


Figura 63. Señal original en el dominio del tiempo.

Fuente: Autor

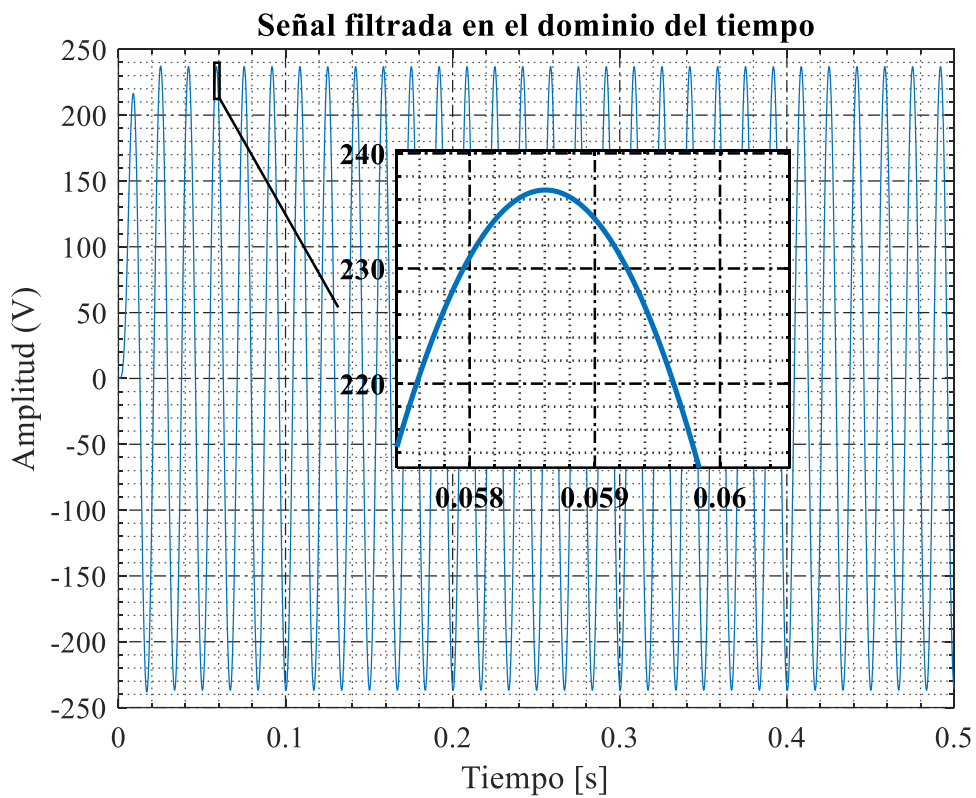


Figura 64. Señal filtrada en el dominio del tiempo.

Fuente: Autor

En el dominio de la frecuencia de la señal original, Figura 65, la frecuencia de 181 Hz tiene una amplitud de 4.39 %, la frecuencia 300 Hz tiene una amplitud de 2.58 %, la frecuencia 420 tiene una amplitud de 1.11 %, la frecuencia 540 Hz tiene una amplitud de 2.40 %, la frecuencia 660 Hz tiene una amplitud de 1.16 %, la frecuencia 780 Hz tiene una amplitud de 0.61 % y la frecuencia 900 Hz tiene una amplitud de 0.86 %. Aplicado el filtro activo, Figura 66, Todas las frecuencias en los diferentes rangos desaparecieron y no se obtienen picos importantes a lo largo del análisis frecuencial.

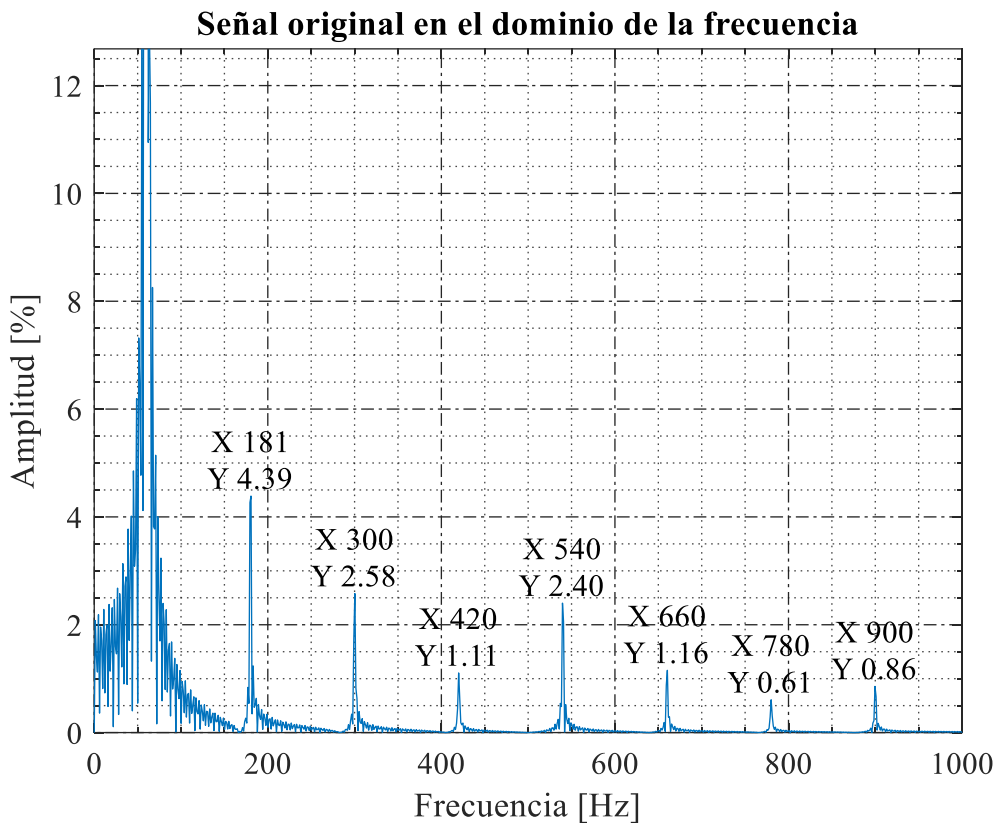


Figura 65. Señal original en el dominio de la frecuencia.

Fuente: Autor

En la Figura 67, expresa el THD inicial con un valor de 5.87 % de THD, reflejado en la Tabla 21. Con la aplicación del filtro El THD disminuye a un porcentaje de 1.28 % el cual se encuentra en los parámetros establecidos por la norma IEEE STD 519-2014.

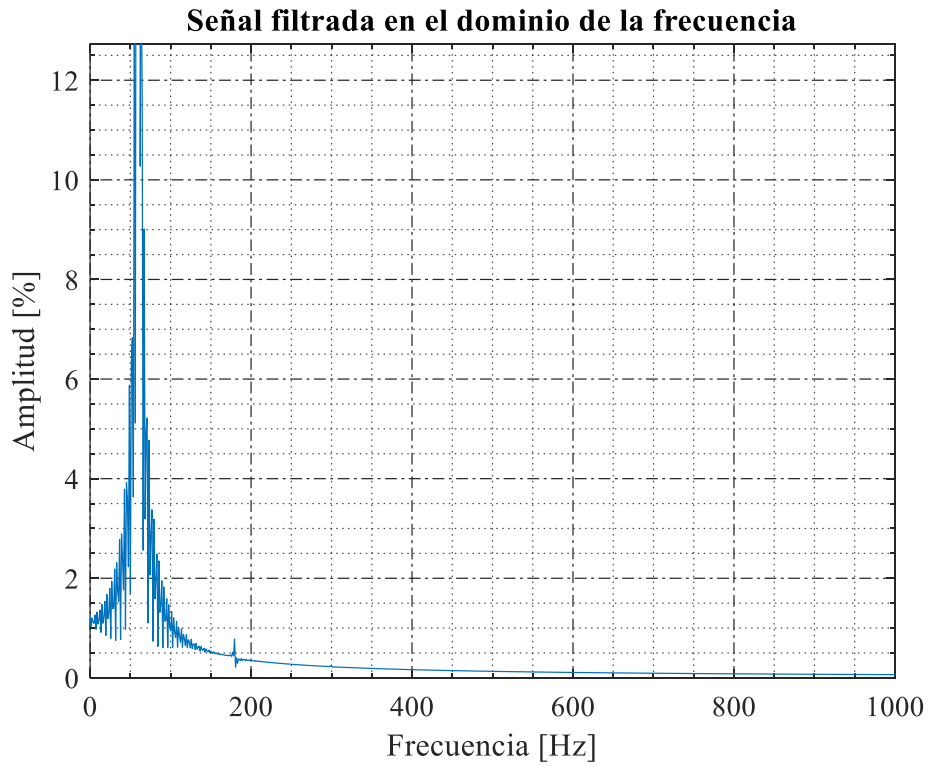


Figura 66. Señal filtrada en el dominio de la frecuencia.

Fuente: Autor

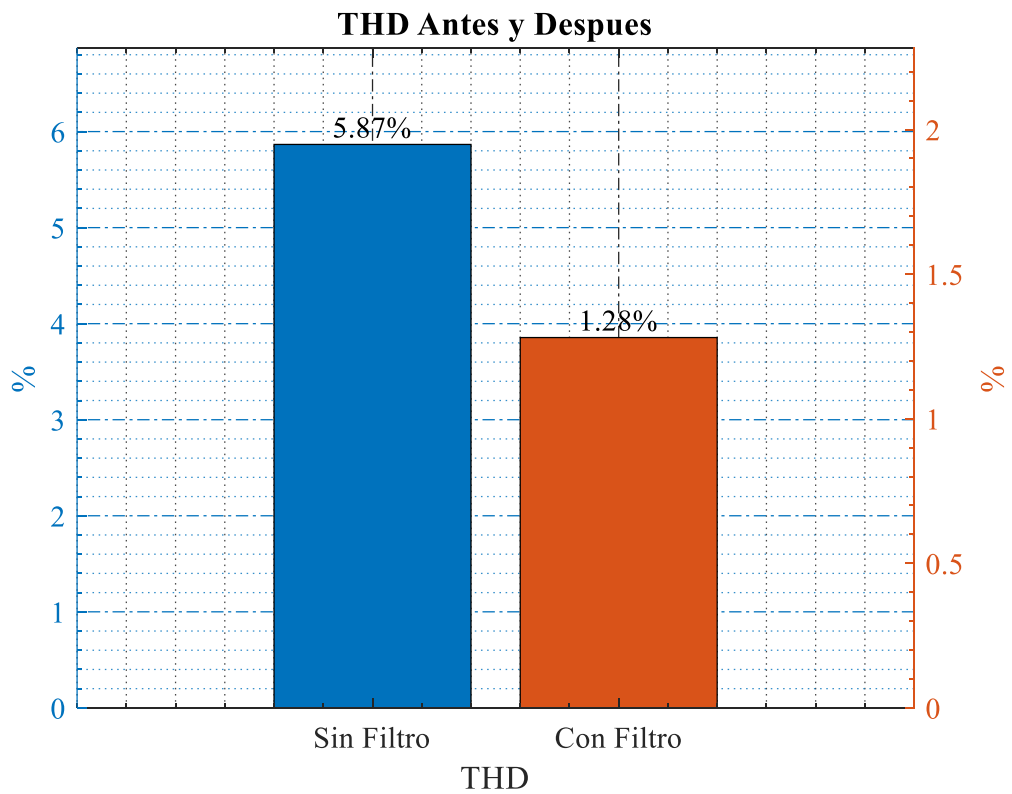


Figura 67. THD Antes y Después.

Fuente: Autor

El nodo MTA_S_331576 de 15 lámparas LED, el dominio del tiempo original presenta picos que oscilan en amplitud entre 199 V y 235 V, la principal deformación se localiza en los picos en cada ciclo, Figura 68. En la Figura 69, se observa el comportamiento del filtro activo aplicado, el cual rectifica la onda donde el pico de amplitud es de 238 V, se estabiliza y se asemeja a una onda sinusoidal perfecta en cada ciclo.

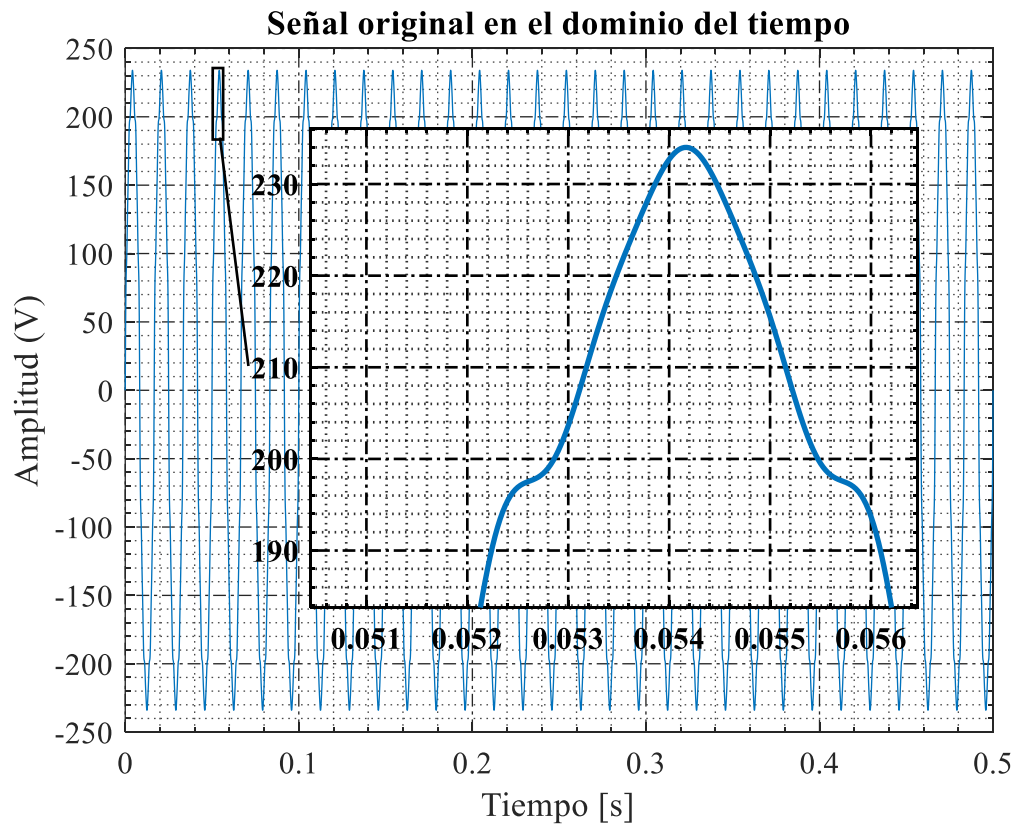


Figura 68. Señal original en el dominio del tiempo.

Fuente: Autor

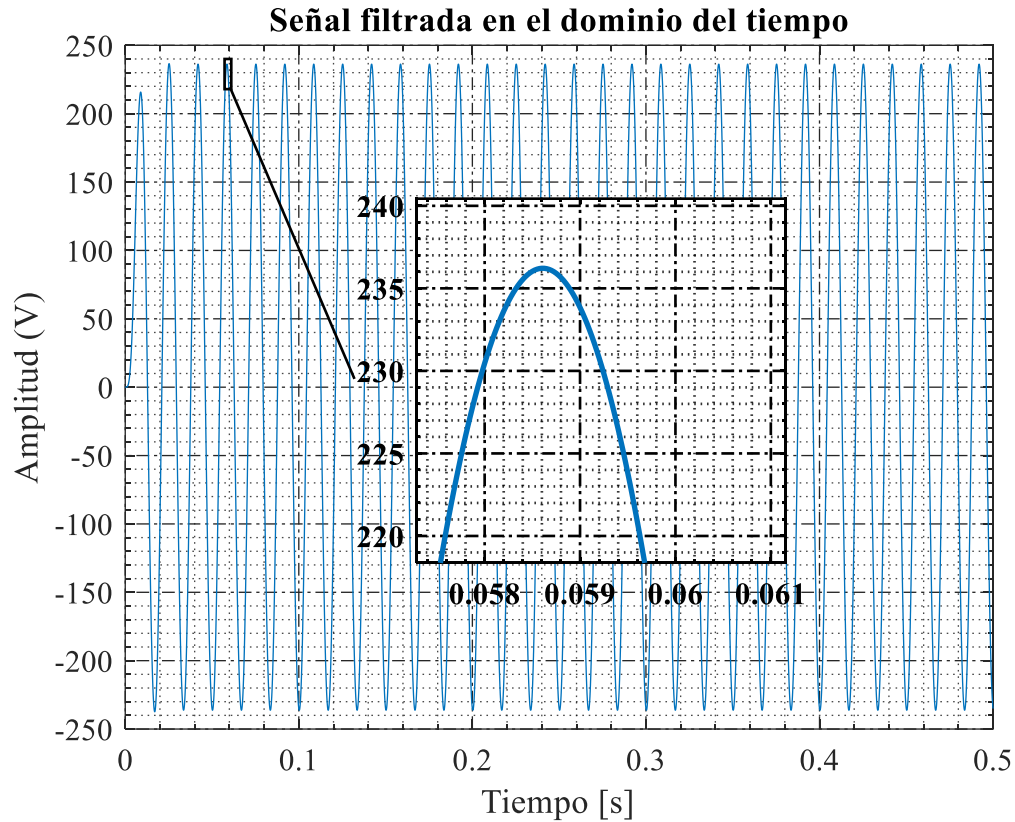


Figura 69. Señal filtrada en el dominio del tiempo.

Fuente: Autor

En el dominio de la frecuencia de la señal original, Figura 70, la frecuencia de 179 Hz tiene una amplitud de 6.50 %, la frecuencia 300 Hz tiene una amplitud de 3.94 %, la frecuencia 420 tiene una amplitud de 1.61 %, la frecuencia 540 Hz tiene una amplitud de 3.61 %, la frecuencia 660 Hz tiene una amplitud de 1.81 %, la frecuencia 780 Hz tiene una amplitud de 0.91 %, la frecuencia 900 Hz tiene una amplitud de 1.24 % y la frecuencia 1021 Hz tiene una amplitud de 0.23 %. Aplicado el filtro activo, Figura 71, Todas las frecuencias en los diferentes rangos desaparecieron y no se obtienen picos importantes a lo largo del análisis frecuencial.

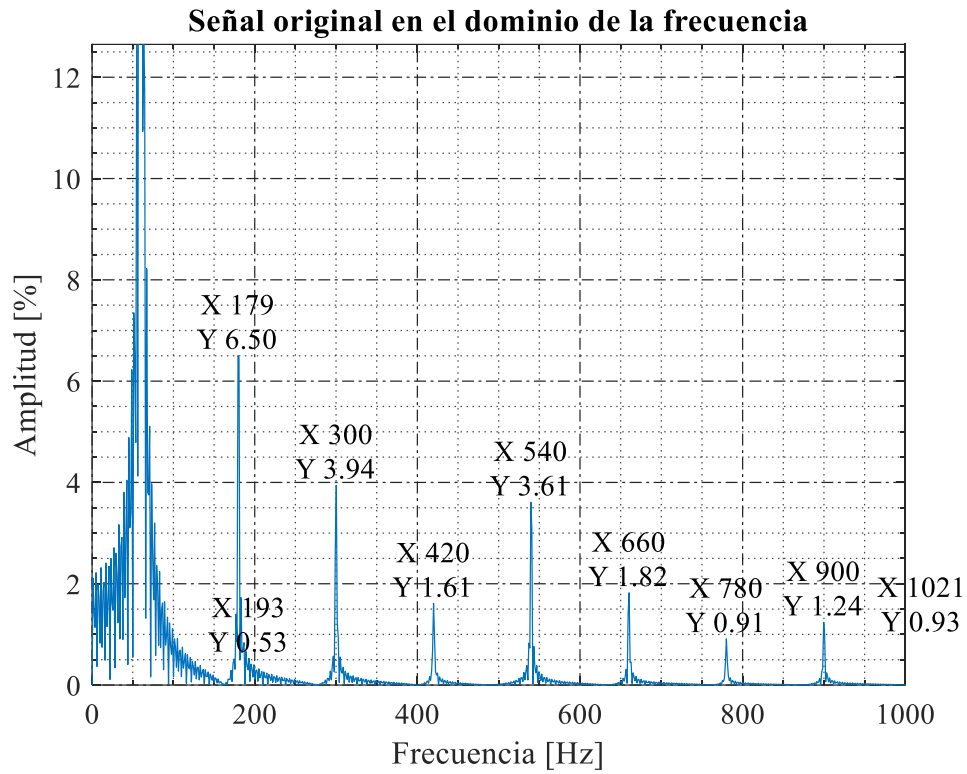


Figura 70. Señal original en el dominio de la frecuencia.

Fuente: Autor

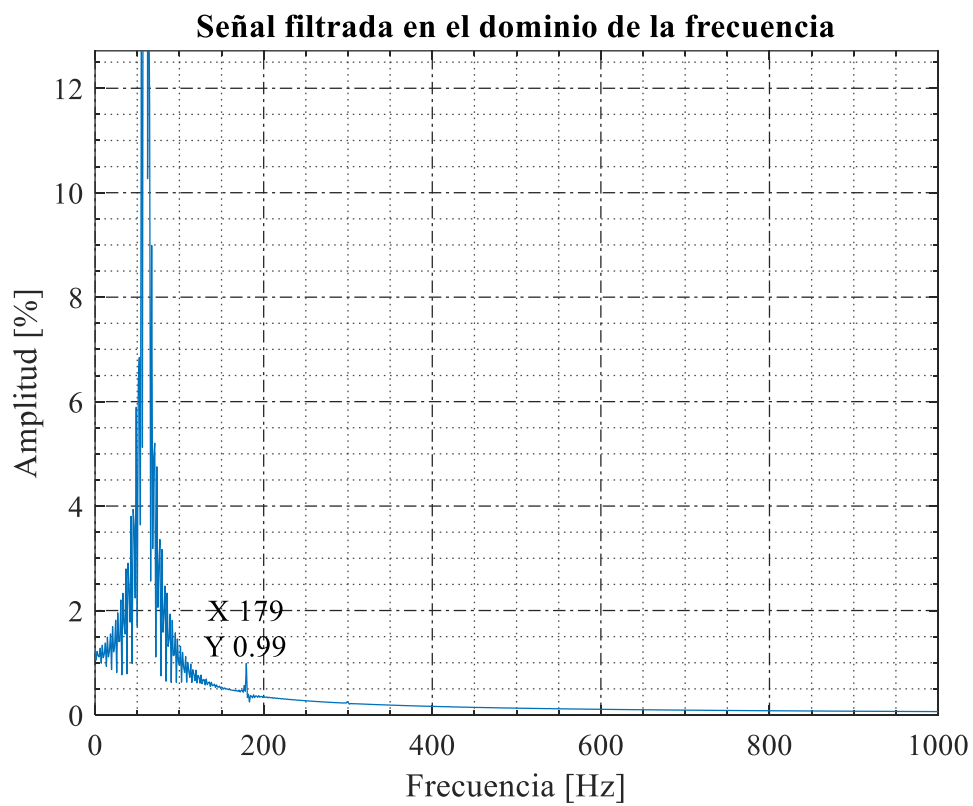


Figura 71. Señal filtrada en el dominio de la frecuencia.

Fuente: Autor

En la Figura 72, expresa el THD inicial con un valor de 8.91 % de THD, reflejado en la Tabla 21. Con la aplicación del filtro El THD disminuye a un porcentaje de 1.41 % el cual se encuentra en los parámetros establecidos por la norma IEEE STD 519-2014.

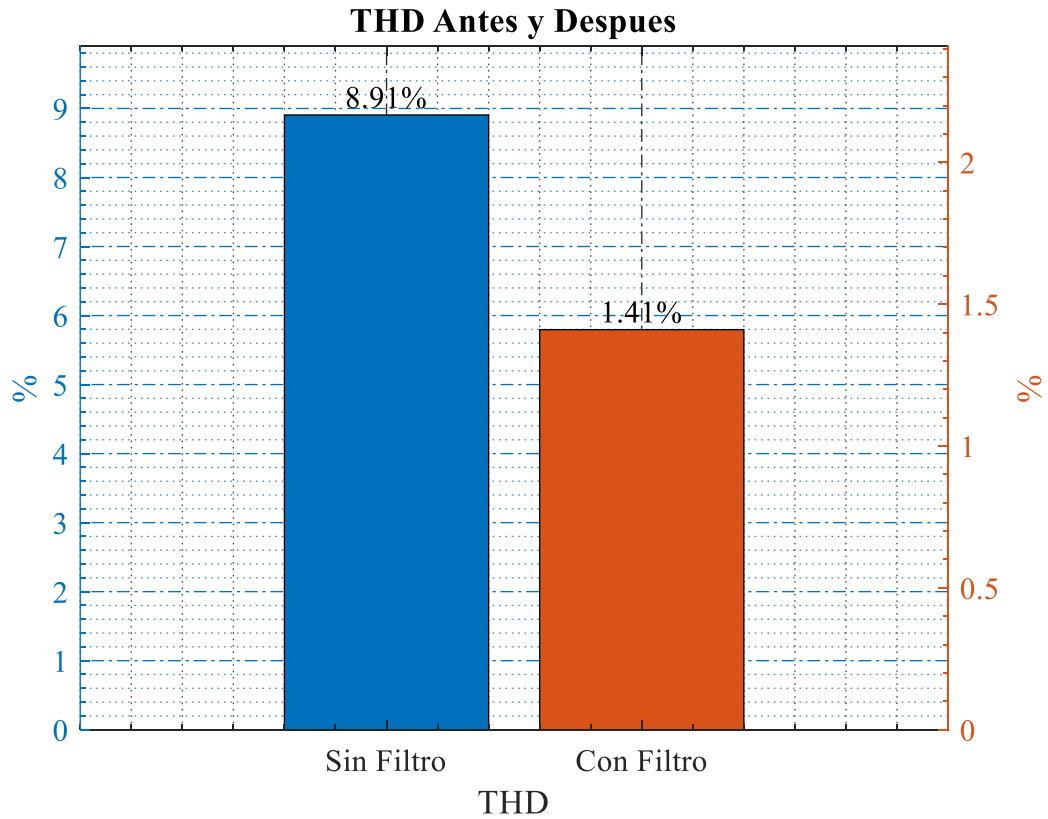


Figura 72. THD Antes y Después.

Fuente: Autor

El nodo MTA_S_61155 de 15 lámparas LED, el dominio del tiempo original presenta picos que oscilan en amplitud entre 197 V y 234 V, la principal deformación se localiza en los picos en cada ciclo, Figura 73. En la Figura 74, se observa el comportamiento del filtro activo aplicado, el cual rectifica la onda donde el pico de amplitud es de 236.5 V, se estabiliza y se asemeja a una onda sinusoidal perfecta en cada ciclo.

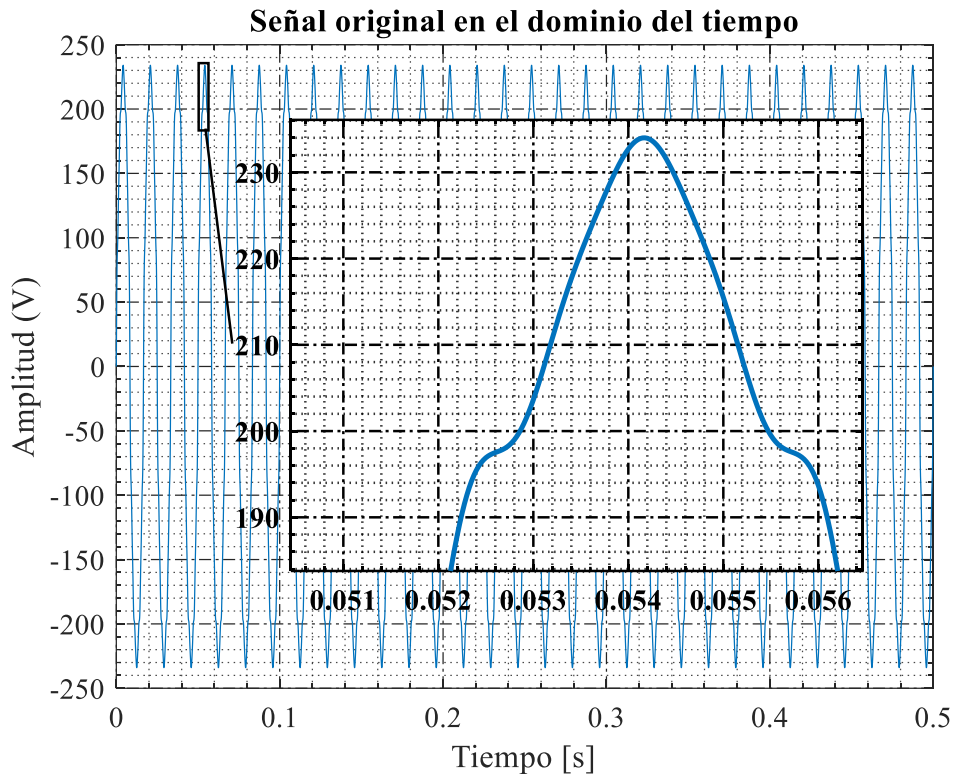


Figura 73. Señal original en el dominio del tiempo.

Fuente: Autor

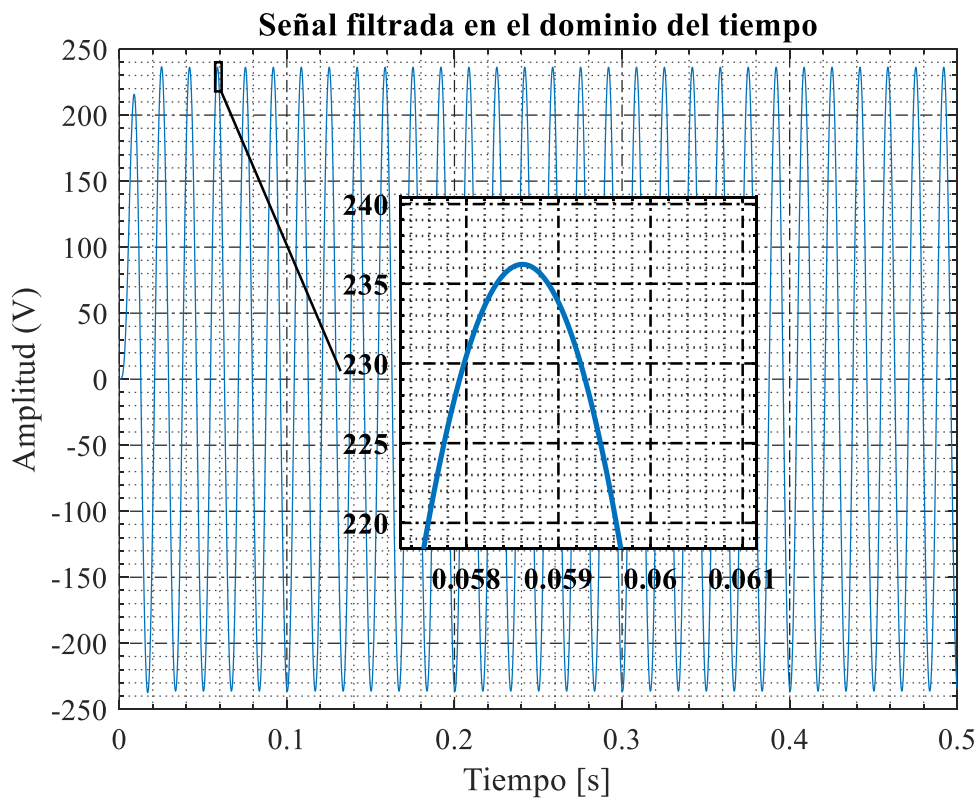


Figura 74. Señal original en el dominio del tiempo.

Fuente: Autor

En el dominio de la frecuencia de la señal original, Figura 75, la frecuencia de 179 Hz tiene una amplitud de 6.50 %, la frecuencia 300 Hz tiene una amplitud de 3.94 %, la frecuencia 420 tiene una amplitud de 1.61 %, la frecuencia 540 Hz tiene una amplitud de 3.61 %, la frecuencia 660 Hz tiene una amplitud de 1.82 %, la frecuencia 780 Hz tiene una amplitud de 0.91 %, la frecuencia 900 Hz tiene una amplitud de 1.24 % y la frecuencia 1020 Hz tiene una amplitud de 0.93 %. Aplicado el filtro activo, Figura 76, Todas las frecuencias en los diferentes rangos desaparecieron y no se obtienen picos importantes a lo largo del análisis frecuencial

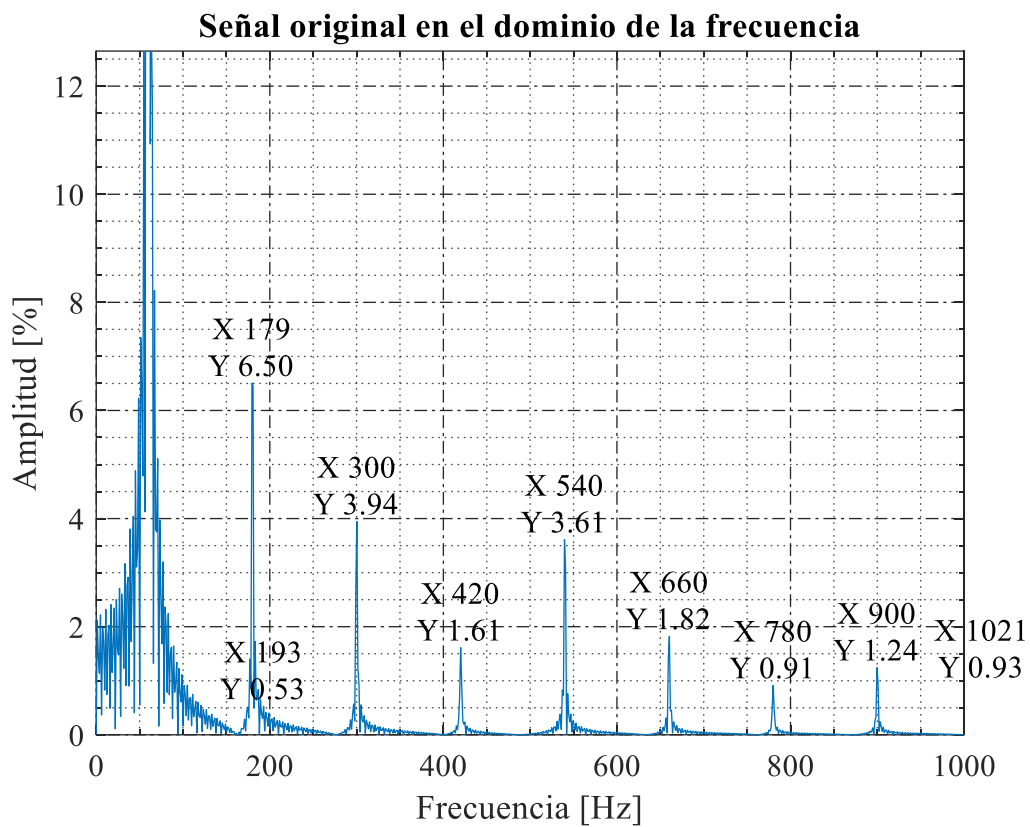


Figura 75. Señal original en el dominio de la frecuencia.

Fuente: Autor

En la Figura 77, expresa el THD inicial con un valor de 8.91 % de THD, reflejado en la Tabla 21. Con la aplicación del filtro El THD disminuye a un porcentaje de 1.41 % el cual se encuentra en los parámetros establecidos por la norma IEEE STD 519-2014.

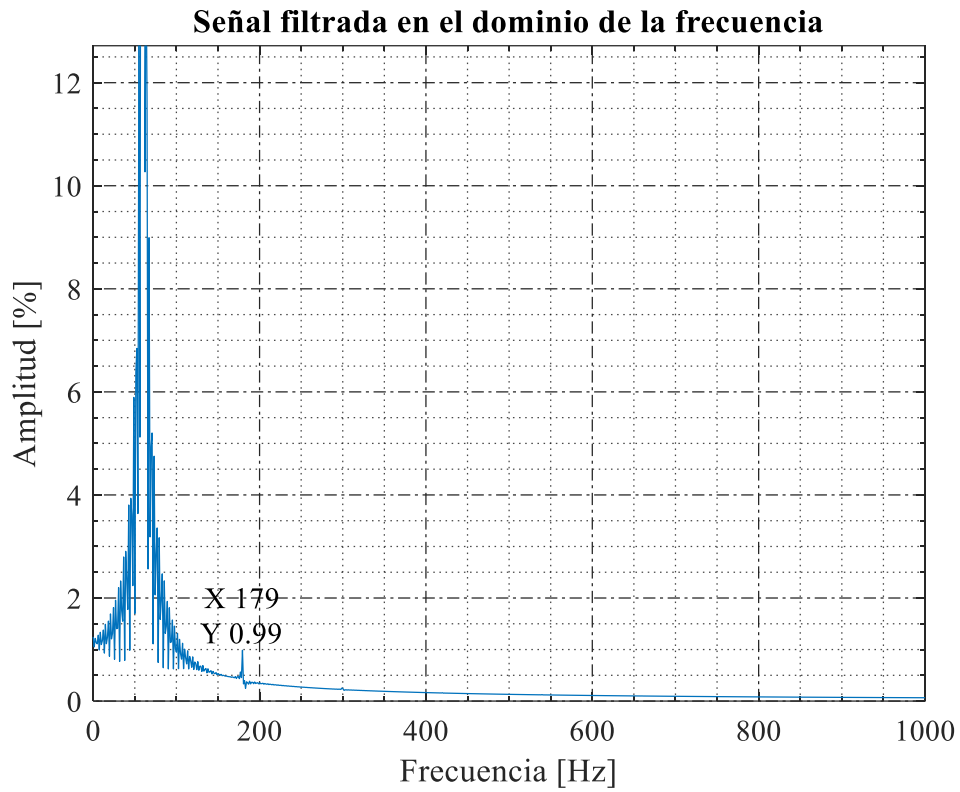


Figura 76. Señal filtrada en el dominio de la frecuencia.

Fuente: Autor

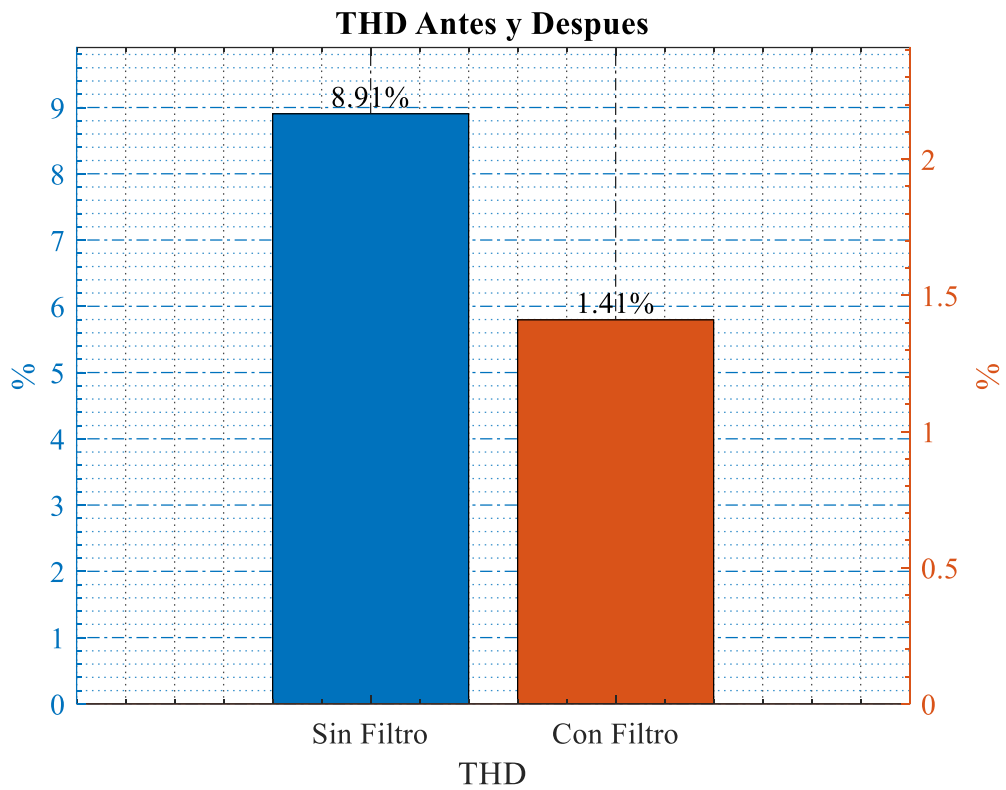


Figura 77. THD Antes y Después.

Fuente: Autor

El nodo MTA_S_87877 de 15 lámparas LED, el dominio del tiempo original presenta picos que oscilan en amplitud entre 197 V y 235 V, la principal deformación se localiza en los picos en cada ciclo, Figura 78. En la Figura 79, se observa el comportamiento del filtro activo aplicado, el cual rectifica la onda donde el pico de amplitud es de 238 V, se estabiliza y se asemeja a una onda sinusoidal perfecta en cada ciclo.

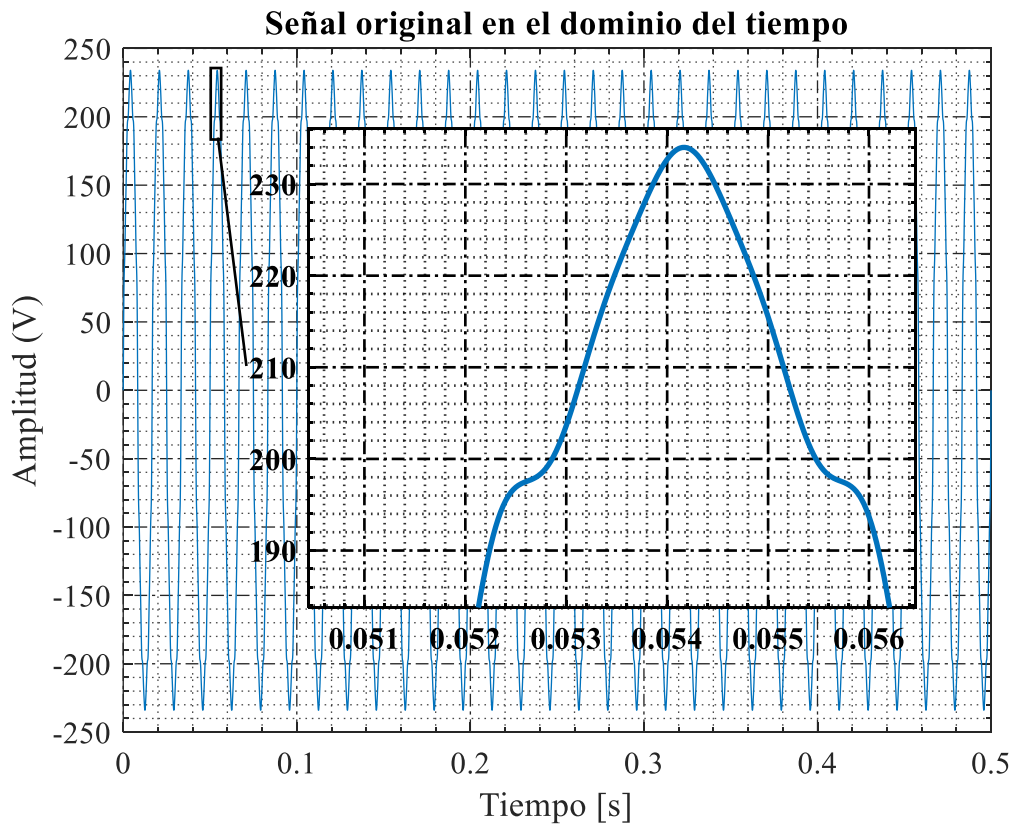


Figura 78. Señal original en el dominio del tiempo.

Fuente: Autor

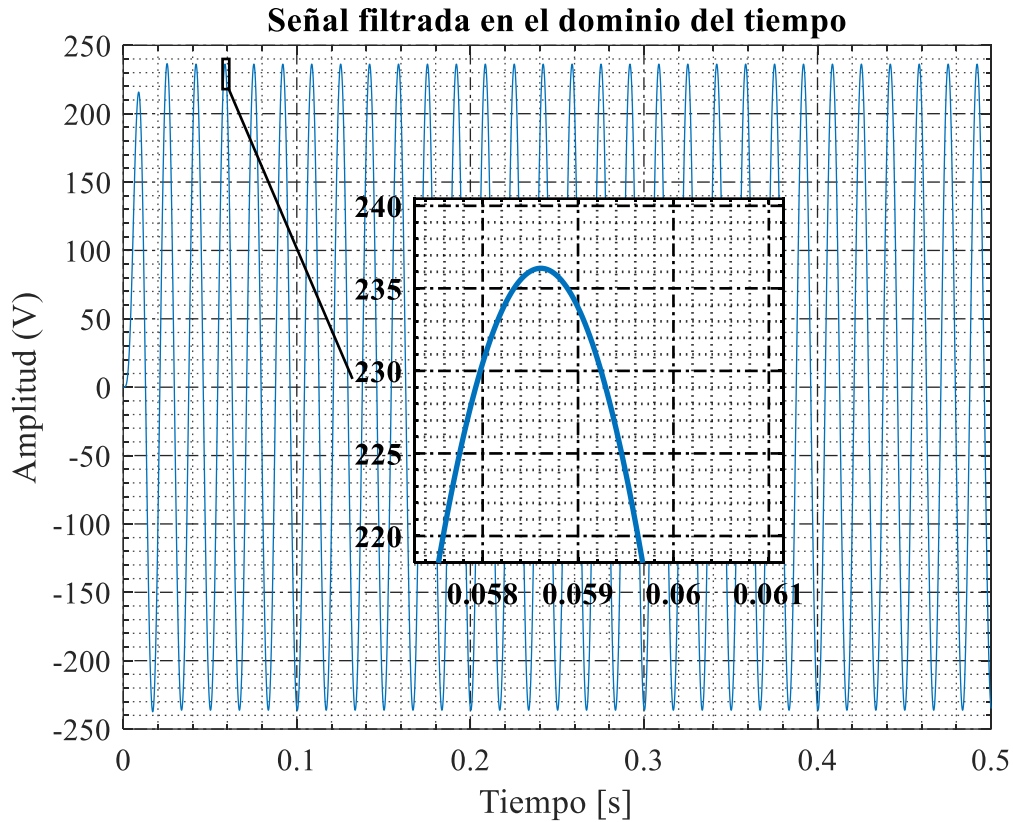


Figura 79. Señal original en el dominio del tiempo.

Fuente: Autor

En el dominio de la frecuencia de la señal original, Figura 80, la frecuencia de 179 Hz tiene una amplitud de 6.50 %, la frecuencia 300 Hz tiene una amplitud de 3.94 %, la frecuencia 420 tiene una amplitud de 1.61 %, la frecuencia 540 Hz tiene una amplitud de 3.61 %, la frecuencia 660 Hz tiene una amplitud de 1.82 %, la frecuencia 780 Hz tiene una amplitud de 0.91 %, la frecuencia 900 Hz tiene una amplitud de 1.24 % y la frecuencia 1020 Hz tiene una amplitud de 0.93 %. Aplicado el filtro activo, Figura 81, Todas las frecuencias en los diferentes rangos desaparecieron y no se obtienen picos importantes a lo largo del análisis frecuencial.

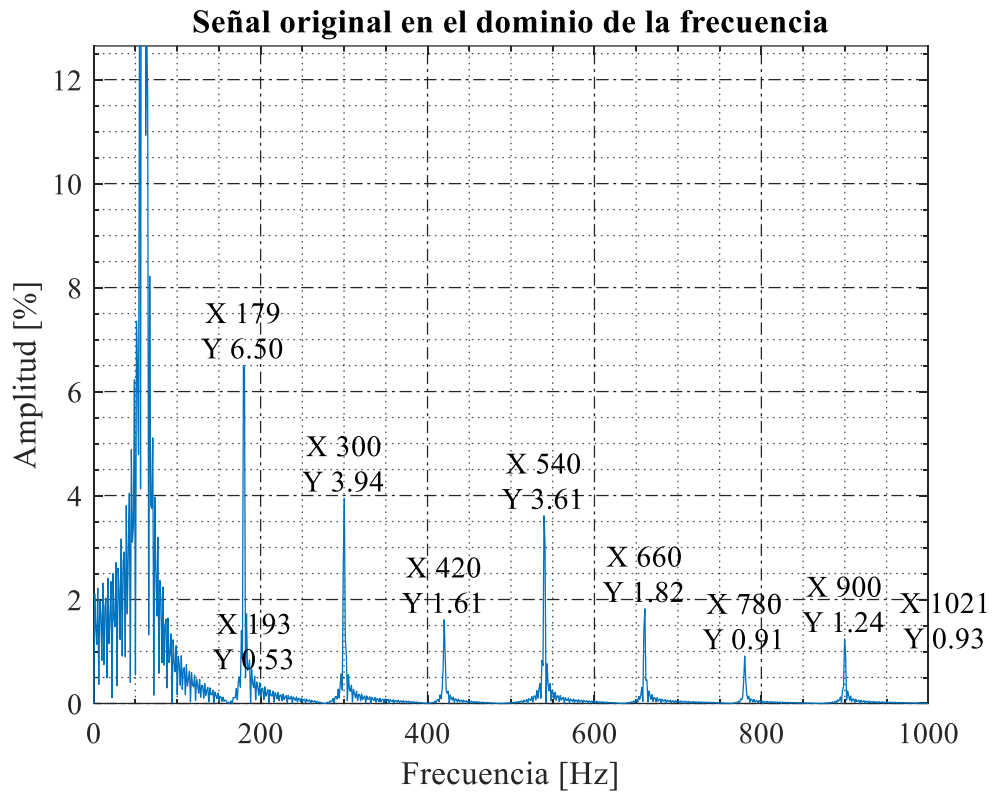


Figura 80. Señal original en el dominio de la frecuencia.

Fuente: Autor

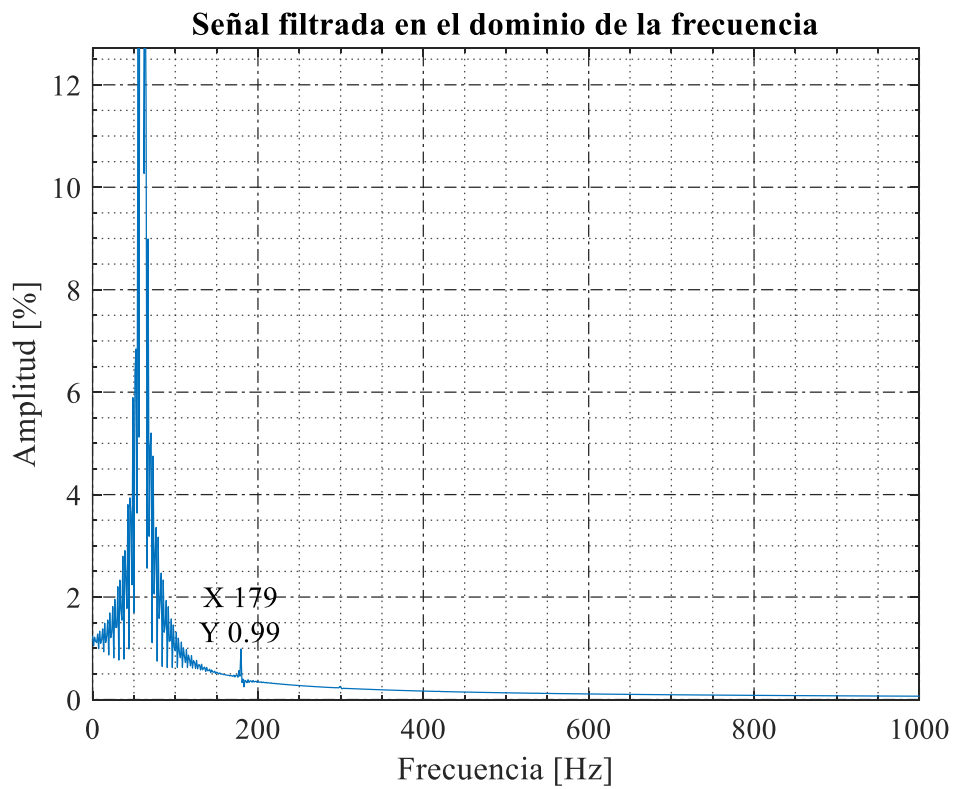


Figura 81. Señal filtrada en el dominio de la frecuencia.

Fuente: Autor

En la Figura 82, expresa el THD inicial con un valor de 8.91 % de THD, reflejado en la Tabla 21. Con la aplicación del filtro El THD disminuye a un porcentaje de 1.41 % el cual se encuentra en los parámetros establecidos por la norma IEEE STD 519-2014.

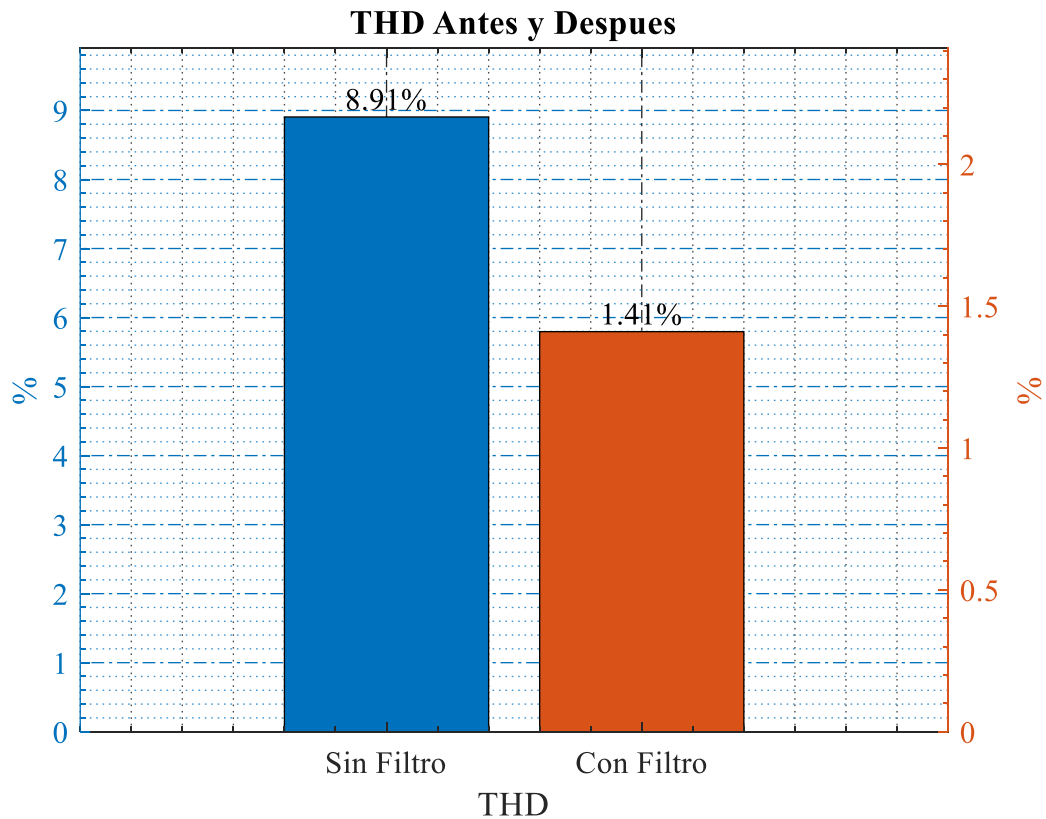


Figura 82. THD Antes y Después.

Fuente: Autor

4.3. Comparativa de resultados obtenidos

Ahora se procede a comparar los resultados obtenidos de THD, en donde se observa la reducción de armónicos en base a la Metodología P-Q obteniendo resultados que oscilan en los límites permisibles por la normativa IEEE STD 519-2014.

Según los resultados obtenidos en la Tabla 85, Para Luminarias HPS en las pruebas de 10 y 15 luminarias, Tanto para los nodos MTA_S_299878, MTA_S_331576 y MTA_S_61155, el THD resultante está en los rangos de 1.3 % a 1.36 %, estos no sobrepasan los límites permisibles por la normativa IEEE STD 519-2014.

Tabla 24. Comparación Metodología P-Q, Luminarias HPS

Antes de la compensación		
ID DE NODO	THD (%)	
	10 LUMINARIAS HPS	15 LUMINARIAS HPS
2 MTA_S_299878	9.17	9.48
3 MTA_S_331576	9.54	9.48
4 MTA_S_61155	9.54	9.76
Después de la compensación		
2 MTA_S_299878	1.33	1.51
3 MTA_S_331576	1.34	1.51
4 MTA_S_61155	1.34	1.53

Fuente: Autor

Según los resultados obtenidos en la Tabla 86, Para Luminarias LED en las pruebas de 10 y 15 luminarias, Tanto para los nodos MTA_S_331576, MTA_S_61155 y MTA_S_87877, el THD resultante está en los rangos de 1.2 % a 1.28 %, estos no sobrepasan los límites permisibles por la normativa IEEE STD 519-2014.

Tabla 25. Comparación Metodología P-Q, Luminarias LED.

Antes de la compensación		
ID DE NODO	THD (%)	
	10 LUMINARIAS LED	15 LUMINARIAS LED
3 MTA_S_331576	5.75	8.91
4 MTA_S_61155	5.96	8.91
5 MTA_S_87877	5.87	8.91
Después de la compensación		
3 MTA_S_331576	1.28	1.41
4 MTA_S_61155	1.28	1.41
5 MTA_S_87877	1.28	1.41

Fuente: Autor

5. CONCLUSIONES

En el presente proyecto realizado utilizando el software CYME, se analizó el estudio de la red de distribución del alimentador 1500080T03, el cual se corroboró que luminarias viajes equipadas con tecnología de Sodio de Alta Presión (HPS) representaban el principal origen de pérdidas de energía y distorsión armónica. La implementación y estudio de luminarias LED se propuso como una solución efectiva para mitigar esos problemas, mejorando significativamente la eficiencia energética del sistema de distribución eléctrica evaluado.

Las áreas seleccionadas para la implementación de las pruebas con luminarias HPS y LED fueron específicamente aquellas con alta densidad poblacional, lo cual permitió un análisis exhaustivo de las pérdidas de energía y otros factores relevantes. Sin embargo, algunas zonas no fueron consideradas para el estudio debido a la falta de densidad poblacional, lo cual habría limitado la relevancia y la competencia del análisis realizado.

Con base en las pruebas de implementación de 5, 10 y 15 luminarias en distintos puntos del sistema de distribución, se observa un aumento significativo en las pérdidas de energía y la generación de armónicos cuando se instalan 10 o más luminaria. Esto sugiere que ciertos ramales del sistema de distribución actúan como puntos críticos donde la presencia de múltiples luminarias intensifica tanto la distorsión armónica como las pérdidas de energía, se confirma que, a mayor cantidad de luminarias conectadas, mayor es la incidencia de armónicos y pérdidas de energía en el sistema evaluado.

Según los criterios establecidos por la normativa IEEE STD 519-2014, los límites permisibles de armónicos para luminarias viales se sitúan el 5%. Al comprar las luminarias LED con las de Sodio de Alta Presión (HPS), se verifica que las mejoras económicas y para la población son significativas al optar por luminarias LED. Esto se debe a que las luminarias LED emplean tecnologías avanzadas que contribuyen a reducir tanto las pérdidas de energía como la generación de armónicos. Por lo tanto, las luminarias LED no solo cumplen con los estándares de armónicos establecidos, sino que también ofrecen beneficios adicionales en términos de eficiencia energética y calidad de alumbrado urbano.

Implementando la metodología P-Q, se realiza cálculos de potencia activa y reactiva que se descomponen en componentes AC y DC mediante filtros. Estos componentes, especialmente el DC, son fundamentales en este proyecto, ya que se utiliza como corriente de compensación para reducir o eliminar el Total Harmonic Distortion (THD). En resumen, la metodología P-Q se enfoca en eliminar la componente DC reactiva generada por la conexión de cargas no lineales.

Finalmente, este trabajo se centró en el estudio de la reducción de armónicos utilizando la metodología P-Q, específicamente a través de un Filtro Activo. Los resultados obtenidos confirman que esta metodología es efectiva para cumplir con las normas establecidas por la IEEE STD 519-2014 en términos de reducción de armónicos. Se destaca que las luminarias LED superan a las HPS en este aspecto, siendo la opción preferida para minimizar las pérdidas de energía y reducir los armónicos en una red de distribución.

6. RECOMENDACIONES

El proyecto realizado ha analizado las luminarias LED y HPS, pero también se puede considerar la implementación de otros tipos y características de luminarias que puedan mejorar aún más el rendimiento energético y la reducción de armónicos en la red de distribución eléctrica.

En instituciones como la Empresa Eléctrica de Riobamba (EERSA), los problemas relacionados con armónicos en el sistema de distribución son frecuentes. Este proyecto se ha mostrado como una opción viable para buscar soluciones. Sin embargo, se propone la implementación de más estudios adicionales para obtener datos más precisos y efectivos, buscando mejorar la red de distribución y reducir las pérdidas de energía.

Los objetivos propuestos en el estudio pueden ser empleados y mejorados mediante la realización de más estudios e informes que compartan el mismo objetivo de buscar mejoras en la red de distribución, así como analizar y reducir las pérdidas energéticas y armónicos. Estos estudios pueden proporcionar soluciones a diversas instituciones que enfrentan problemas similares relacionados con las pérdidas o cambios en la energía en sus sistemas de distribución.

Para concluir, se propone la participación activa de la Universidad en la implementación de capacitaciones sobre el Software como CYME. Estas capacitaciones están orientadas a mejorar la gestión de problemas como las pérdidas de energía y la reducción de armónicos. De esta manera, los estudiantes podrán desarrollar nuevos proyectos con el objetivo de encontrar soluciones efectivas para estos desafíos emergentes en el ámbito de la distribución eléctrica.

7. BIBLIOGRAFIA

- [1] T. Halder, “An Impact of Current & Voltage Harmonics in the Power Quality Issues,” in *2019 Devices for Integrated Circuit (DevIC)*, IEEE, Mar. 2019, pp. 418–423. doi: 10.1109/DEVIC.2019.8783579.
- [2] H. Farzin, M. Monadi, M. Fotuhi-Firuzabad, and M. Savaghebi, “A reliability model for overcurrent relays considering harmonic-related malfunctions,” *Int. J. Electr. Power Energy Syst.*, vol. 131, p. 107093, Oct. 2021, doi: 10.1016/j.ijepes.2021.107093.
- [3] Z. Shen, Z. Zheng, Y. Fu, and Z. Yin, “Analysis of the Influence of Harmonics on Energy Efficiency of Typical Equipment in Distribution Network,” *J. Phys. Conf. Ser.*, vol. 2495, no. 1, p. 012026, May 2023, doi: 10.1088/1742-6596/2495/1/012026.
- [4] N. Berisha, “Power quality analysis. Case study for induction motor and 110/35kV substation,” *PRZEGLĄD ELEKTROTECHNICZNY*, vol. 1, no. 8, pp. 122–126, Aug. 2023, doi: 10.15199/48.2023.08.21.
- [5] Q. Lv, F. Zhao, Z. Guo, and X. Zong, “A Review of Research on Power System Harmonic Detection and Its Suppression Methods,” in *2020 IEEE 4th Information Technology, Networking, Electronic and Automation Control Conference (ITNEC)*, IEEE, Jun. 2020, pp. 1495–1500. doi: 10.1109/ITNEC48623.2020.9084832.
- [6] A. El Maghraoui, Y. Ledmaoui, O. Laayati, H. El Hadraoui, and A. Chebak, “Effect of Large-scale PV Integration onto Existing Electrical Grid on Harmonic Generation and Mitigation Techniques,” in *2023 5th Global Power, Energy and Communication Conference (GPECOM)*, IEEE, Jun. 2023, pp. 294–299. doi: 10.1109/GPECOM58364.2023.10175736.
- [7] INEC, “Estadísticas Vitales,” 2020.
- [8] E. Mudaheranwa *et al.*, “Reduction of harmonics using Active Power Filters in Electric Power System,” in *2021 IEEE Southern Power Electronics Conference (SPEC)*, IEEE, Dec. 2021, pp. 1–6. doi: 10.1109/SPEC52827.2021.9709462.
- [9] A. J. Atuchukwu, I. U. Uju, and M. Ugwu, Efoke, “Reduction of Harmonics in Power Lines Using Finite Impulse Response Filter,” *J. Eng. Res. Reports*, pp. 18–28, Dec. 2021, doi: 10.9734/jerr/2021/v21i1217508.
- [10] E. Guest, K. H. Jensen, and T. W. Rasmussen, “Mitigation of Harmonic Voltage Amplification in Offshore Wind Power Plants by Wind Turbines With Embedded Active Filters,” *IEEE Trans. Sustain. Energy*, vol. 11, no. 2, pp. 785–794, Apr. 2020, doi: 10.1109/TSTE.2019.2906797.
- [11] V. Zeleničić, M. Miletić, K. R. Raguž, D. Sumina, and I. Erceg, “Reduction of Current Harmonics in Data Center Power System using Single-Phase Shunt Active Power Filter,” in *2023 46th MIPRO ICT and Electronics Convention (MIPRO)*, IEEE, May 2023, pp. 265–270. doi: 10.23919/MIPRO57284.2023.10159912.
- [12] E. CAZACU, G. IOANA, M. STĂNCULESCU, and L. PETRESCU, “Active Power Filter Solution to the Harmonic Issues Caused by a Nonlinear Industrial Load,” in *2023 10th International Conference on Modern Power Systems (MPS)*, IEEE, Jun. 2023, pp. 01–06. doi: 10.1109/MPS58874.2023.10187576.
- [13] M.-D. Constantinescu, M. Linca, and G.-E. Subtirelu, “On the Influence of the DC-voltage on the Performance of the Active Power Filter,” in *2022 22nd International Symposium on Electrical Apparatus and Technologies (SIELA)*,

- IEEE, Jun. 2022, pp. 1–4. doi: 10.1109/SIELA54794.2022.9845791.
- [14] T. Madhubabu, A. Anireddy, N. Sahithi, K. S. Krishna Suman, S. Vikas, and K. Chenchireddy, “Reduction of Harmonics to Improve Power Quality in Distribution Lines using a Series Active Power Filter,” in *2023 7th International Conference on Trends in Electronics and Informatics (ICOEI)*, IEEE, Apr. 2023, pp. 123–128. doi: 10.1109/ICOEI56765.2023.10126006.
- [15] P. Tupiza, W. Pavón, D. Jaramillo, J. Muñoz, C. Barrera-Singaña, and M. Tipan, “Strategy for Reducing Total Current Harmonics Distortion using an Unified Active Power Filter (UAPF) with Photovoltaic generation,” in *2023 IEEE IAS Global Conference on Renewable Energy and Hydrogen Technologies (GlobConHT)*, IEEE, Mar. 2023, pp. 1–5. doi: 10.1109/GlobConHT56829.2023.10087658.
- [16] J. Kaiwart, “Power Quality Improvement by Reduction of Harmonic using Shunt Active Power Filter,” *Int. J. Res. Publ. Rev.*, vol. 04, no. 01, pp. 1232–1236, 2023, doi: 10.55248/gengpi.2023.4137.
- [17] M. Waheed, A. J. Sultan, A. A. Abdullah al Bakry, and F. N. Saeed, “Harmonic reduction in IEEE-3-bus using hybrid power filters,” *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.*, vol. 1105, no. 1, p. 012012, Jun. 2021, doi: 10.1088/1757-899X/1105/1/012012.
- [18] J. R. Sawant and R. Jain, “Quantifying the Protectability of Power Systems for Restoration Applications,” in *2023 IEEE Power & Energy Society General Meeting (PESGM)*, IEEE, Jul. 2023, pp. 1–5. doi: 10.1109/PESGM52003.2023.10253142.
- [19] R. Senthil Kumar *et al.*, “Optimization Technique for Renewable Energy Storage Systems for Power Quality Analysis with Connected Grid,” *Int. Trans. Electr. Energy Syst.*, vol. 2023, pp. 1–7, May 2023, doi: 10.1155/2023/4675421.
- [20] J. Viswanatha Rao and G. Lakshminarayana, “Estimation and Moderation of Harmonics in Distribution Systems,” 2020, pp. 353–360. doi: 10.1007/978-981-15-1616-0_34.
- [21] J. Sun, G. Wang, X. Du, and H. Wang, “A Theory for Harmonics Created by Resonance in Converter-Grid Systems,” *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 34, no. 4, pp. 3025–3029, Apr. 2019, doi: 10.1109/TPEL.2018.2869781.
- [22] A. H. Charty, “Digital Commons @ Ryerson Harmonics in commercial building power systems,” 2021, doi: <https://doi.org/10.32920/ryerson.14650086.v1>.
- [23] L. I. Kovernikova, “Resonance Modes at Harmonics Frequencies in Electrical Networks,” *E3S Web Conf.*, vol. 209, p. 07006, Nov. 2020, doi: 10.1051/e3sconf/202020907006.
- [24] S. Kockanat, “Electrical harmonics estimation in power systems using bat algorithm,” in *Nature-Inspired Computation and Swarm Intelligence*, Elsevier, 2020, pp. 303–321. doi: 10.1016/B978-0-12-819714-1.00027-0.
- [25] A. B. YILDIZ and B. SABUNCU, “Harmonics in Power Systems and Filter Applications,” *Black Sea J. Eng. Sci.*, vol. 2, no. 4, pp. 117–122, Oct. 2019, doi: 10.34248/bsengineering.565411.
- [26] K. Gençol, “A New Optimization-Based Algorithm for the Estimation of Harmonics Under Power System Frequency Deviations,” in *2023 31st Signal Processing and Communications Applications Conference (SIU)*, IEEE, Jul. 2023, pp. 1–4. doi: 10.1109/SIU59756.2023.10223989.
- [27] S. Younis and O. M. Alyousif, “Electrical Power System Harmonics Elimination Using ETAP,” *Al-Rafidain Eng. J.*, vol. 27, no. 1, pp. 99–109, Mar. 2022, doi: 10.33899/rengj.2022.132721.1155.

- [28] S. Rönnerberg, E. Gutiérrez-Ballesteros, A. Gil-de-Castro, M. Westman, and M. Brodin, "Long-term power quality measurements in medium voltage networks," *25th Int. Conf. Electr. Distrib. (CIRED), Pap. n° 652*, no. June, pp. 1–5, 2019.
- [29] M. Shen, T. Wang, S. Zhou, and G. Su, "Review of voltage quality management in China and abroad," in *2020 International Conference on Electrical Engineering and Control Technologies (CEECT)*, IEEE, Dec. 2020, pp. 1–6. doi: 10.1109/CEECT50755.2020.9298627.
- [30] I. A. V. Locana Diwy, A. Rahardjo, A. N. Widyanto, F. Husnayain, and R. Setiabudy, "Lockdown Impact due to Corona Pandemic on Electric Power Quality and Its Alternative Solutions for a University Office Building," *ELKHA*, vol. 14, no. 2, p. 110, Oct. 2022, doi: 10.26418/elkha.v14i2.56226.
- [31] S. Deshmukh, R. Dhasade, M. Gaikwad, A. Rahangdale, and M. S, "ELECTRIC POWER QUALITY MEASUREMENT," *Int. J. Recent TRENDS Eng. Res.*, vol. 05, no. 04, pp. 124–130, Apr. 2019, doi: 10.23883/IJRTER.2019.5048.OWGAN.
- [32] A. Arranz-Gimon, A. Zorita-Lamadrid, D. Morinigo-Sotelo, and O. Duque-Perez, "A Review of Total Harmonic Distortion Factors for the Measurement of Harmonic and Interharmonic Pollution in Modern Power Systems," *Energies*, vol. 14, no. 20, p. 6467, Oct. 2021, doi: 10.3390/en14206467.
- [33] ARCERNNR, "Resolución Nro. ARCERNNR-003/2023," vol. 20, p. 35, 2023, [Online]. Available: www.controlrecursosyenergia.gob.ec
- [34] A. Denisova and O. Semenova, "Study of the Performance of Electrical Equipment of Electric Power Complexes and Systems Under the Influence of Higher Harmonics of Voltage and Current," in *2023 International Ural Conference on Electrical Power Engineering (UralCon)*, IEEE, Sep. 2023, pp. 753–757. doi: 10.1109/UralCon59258.2023.10291100.
- [35] B. Djokic and H. Parks, "Calibration of Electrical Instruments Under Nonsinusoidal Conditions at NRC Canada," *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, vol. 70, pp. 1–6, 2021, doi: 10.1109/TIM.2020.3045797.
- [36] M. Faifer, C. Laurano, R. Ottoboni, S. Toscani, and M. Zanoni, "Harmonic Distortion Compensation in Voltage Transformers for Improved Power Quality Measurements," *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, vol. 68, no. 10, pp. 3823–3830, Oct. 2019, doi: 10.1109/TIM.2019.2906990.
- [37] F. P. Monteiro, S. A. Monteiro, M. E. Tostes, and U. H. Bezerra, "Using True RMS Current Measurements to Estimate Harmonic Impacts of Multiple Nonlinear Loads in Electric Distribution Grids," *Energies*, vol. 12, no. 21, p. 4132, Oct. 2019, doi: 10.3390/en12214132.
- [38] X. Wang and F. Blaabjerg, "Harmonic Stability in Power Electronic-Based Power Systems: Concept, Modeling, and Analysis," *IEEE Trans. Smart Grid*, vol. 10, no. 3, pp. 2858–2870, May 2019, doi: 10.1109/TSG.2018.2812712.
- [39] D. Shuhua and Z. Yanyu, "Shunt active power filter control," *J. Adv. Oxid. Technol.*, vol. 21, no. 2, 2018, doi: 10.26802/jaots.2018.02121.
- [40] M. Y. Artemenko, L. M. Batrak, and S. Y. Polishchuk, "Current Filtering in Three-Phase Three-Wire Power System at Asymmetric Sinusoidal Voltages," *2018 IEEE 38th Int. Conf. Electron. Nanotechnology, ELNANO 2018 - Proc.*, pp. 611–616, 2018, doi: 10.1109/ELNANO.2018.8477580.
- [41] L. Alhafadhi, C. M. Lai, J. Teh, and M. Salem, "Predictive adaptive filter for reducing total harmonics distortion in PV systems," *Energies*, vol. 13, no. 12, 2020, doi: 10.3390/en13123286.
- [42] A. Baliyan, M. Jamil, M. Rizwan, I. Alsaidan, and M. Alaraj, "An Intelligent PI Controller-Based Hybrid Series Active Power Filter for Power Quality

- Improvement,” *Math. Probl. Eng.*, vol. 2021, 2021, doi: 10.1155/2021/6565841.
- [43] D. Buła, D. Grabowski, M. Lewandowski, M. Maciażek, and A. Piwowar, “Software solution for modeling, sizing, and allocation of active power filters in distribution networks,” *Energies*, vol. 14, no. 1, 2021, doi: 10.3390/en14010133.
- [44] G. Xue *et al.*, “A novel hybrid active power filter with multi-coupled coils,” *Electron.*, vol. 10, no. 9, 2021, doi: 10.3390/electronics10090998.
- [45] M. Diab, M. El-Habrouk, T. H. Abdelhamid, and S. Deghedie, “Survey of Active Power Filters Configurations,” *2018 IEEE Int. Conf. Syst. Comput. Autom. Networking, ICSCA 2018*, pp. 1–14, 2018, doi: 10.1109/ICSCAN.2018.8541225.
- [46] R. Rajagopal, K. Palanisamy, and S. Paramasivam, “A technical review on control strategies for active power filters,” *2018 Int. Conf. Emerg. Trends Innov. Eng. Technol. Res. ICETIETR 2018*, pp. 1–6, 2018, doi: 10.1109/ICETIETR.2018.8529008.
- [47] A. Bielecka and D. Wojciechowski, “Stability analysis of shunt active power filter with predictive closed-loop control of supply current,” *Energies*, vol. 14, no. 8, pp. 24–26, 2021, doi: 10.3390/en14082208.
- [48] E. Sundaram, M. Gunasekaran, R. Krishnan, S. Padmanaban, S. Chenniappan, and A. H. Ertas, “Genetic algorithm based reference current control extraction based shunt active power filter,” *Int. Trans. Electr. Energy Syst.*, vol. 31, no. 1, pp. 1–22, 2021, doi: 10.1002/2050-7038.12623.
- [49] S. P. Samal, S. P. K. Kumar, and S. M. Chandra, “Energy Efficiency Policies and Market Transformation in Lighting Industry,” in *2023 IEEE Sustainable Smart Lighting World Conference & Expo (LS18)*, IEEE, Jun. 2023, pp. 1–5. doi: 10.1109/LS1858153.2023.10170135.
- [50] Z. Zhike, C. Suming, C. Shasha, S. Tingting, and L. Yuanhui, “Comparison of Life Testing Standards for LED Lighting Products,” in *2019 16th China International Forum on Solid State Lighting & 2019 International Forum on Wide Bandgap Semiconductors China (SSLChina: IFWS)*, IEEE, Nov. 2019, pp. 225–230. doi: 10.1109/SSLChinaIFWS49075.2019.9019768.
- [51] M. Listowski and R. Supronowicz, “Color quality consideration when switching from FL to LED,” *Photonics Lett. Pol.*, vol. 14, no. 3, p. 56, Sep. 2022, doi: 10.4302/plp.v14i3.1159.
- [52] A. Osagie-Bolaji and O. Asikhia, “Comparative Assessments of CFLs, Incandescent and LEDs Bulbs for Energy Efficient Lighting System in Building,” *J. Energy Technol. Policy*, Sep. 2020, doi: 10.7176/JETP/10-5-04.
- [53] P. Patel, “Instrument Systems’ Evolution and Adaptation in the Lighting Industry,” *Inf. Disp. (1975).*, vol. 39, no. 1, pp. 32–35, Jan. 2023, doi: 10.1002/msid.1367.
- [54] R. Lee, “Plenary speech,” in *2016 11th International Microsystems, Packaging, Assembly and Circuits Technology Conference (IMPACT)*, IEEE, Oct. 2016, pp. 13–37. doi: 10.1109/IMPACT.2016.7799970.
- [55] S. Roy and M. Krames, “Active Power Control of Retrofit LED Tube Lamps for Achieving Entitled Energy Savings in View of the EU Ban on Mercury,” *Sustainability*, vol. 14, no. 16, p. 10062, Aug. 2022, doi: 10.3390/su141610062.
- [56] A. Wilson, H. Renaudineau, F. Flores-Bahamonde, and A. Llor, “Partial Power Converter for DCX-based High-Power LED Drivers,” in *2021 22nd IEEE International Conference on Industrial Technology (ICIT)*, IEEE, Mar. 2021, pp. 464–469. doi: 10.1109/ICIT46573.2021.9453605.
- [57] C. Ciugudeanu, M. Buzdugan, D. Beu, A. Campianu, and C. D. Galatanu, “Sustainable Lighting-Retrofit Versus Dedicated Luminaires-Light Versus Power

- Quality,” *Sustainability*, vol. 11, no. 24, p. 7125, Dec. 2019, doi: 10.3390/su11247125.
- [58] A. Kumar, “Power Quality Issues and Harmonics Performance Analysis for Non-Linear Load in Power Distribution System,” in *2022 19th International Conference on Electrical Engineering, Computing Science and Automatic Control (CCE)*, IEEE, Nov. 2022, pp. 1–5. doi: 10.1109/CCE56709.2022.9975948.
- [59] O. Penangsang, M. Daffa Cahyonoputra, D. Fajar Uman Putra, M. Dzar Faraby, S. Sofyan, and A. Muchtar, “Determination of location and capacity of distributed generations with reconfiguration in distribution systems for power quality improvement,” *Int. J. Electr. Comput. Eng.*, vol. 13, no. 1, p. 28, Feb. 2023, doi: 10.11591/ijece.v13i1.pp28-38.
- [60] G. Benysek and M. Pasko, *Power Theories for Improved Power Quality*, vol. 1. 2012. doi: 10.1007/978-1-4471-2786-4.
- [61] L. V. Assiene Mouodo, J. G. Tamba, O. S. Mayi, and L. Bibaya, “H-Infinity Control of an Adaptive Hybrid Active Power Filter for Power Quality Compensation,” *Energy Power Eng.*, vol. 12, no. 11, pp. 603–640, 2020, doi: 10.4236/epe.2020.1211037.
- [62] H. Akagi, Y. Kanazawa, and A. Nabae, “Instantaneous Reactive Power Compensators Comprising Switching Devices without Energy Storage Components,” *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. IA-20, no. 3, pp. 625–630, 1984, doi: 10.1109/TIA.1984.4504460.
- [63] A. A. Imam, R. Sreerama Kumar, and Y. A. Al-Turki, “Modeling and simulation of a pi controlled shunt active power filter for power quality enhancement based on p-q theory,” *Electron.*, vol. 9, no. 4, 2020, doi: 10.3390/electronics9040637.