

**DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DEL FILTRO ACTIVO DE POTENCIA (APF)
HÍBRIDO EN EL SISTEMA DE DISTRIBUCIÓN ELÉCTRICA PARA
MEJORAR EL PERFIL DE TENSIÓN MODULADO POR VECTOR ESPACIAL
CON GENERACIÓN FOTOVOLTAICA**

**UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA
SEDE QUITO**

**CARRERA:
INGENIERÍA ELÉCTRICA**

**Trabajo de titulación previo a la obtención del título de
INGENIERO ELÉCTRICO**

**TEMA:
DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DEL FILTRO ACTIVO DE POTENCIA (APF)
HÍBRIDO EN EL SISTEMA DE DISTRIBUCIÓN ELÉCTRICA PARA
MEJORAR EL PERFIL DE TENSIÓN MODULADO POR VECTOR ESPACIAL
CON GENERACIÓN FOTOVOLTAICA**

**AUTOR:
WILLIAM ISRAEL LLUMITAXI ESPÍN**

**TUTOR:
Ing. Wilson David Pavón Vallejos**

Quito, febrero del 2022

Datos de Catalogación Bibliográfica

William Israel Llumitaxi Espín

DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DEL FILTRO ACTIVO DE POTENCIA (APF) HÍBRIDO EN EL SISTEMA DE DISTRIBUCIÓN ELÉCTRICA PARA MEJORAR EL PERFIL DE TENSIÓN MODULADO POR VECTOR ESPACIAL CON GENERACIÓN FOTOVOLTAICA

Universidad Politécnica Salesiana, Quito-Ecuador 2022

Ingeniería Eléctrica

Breve reseña histórica e información de contacto:



William Israel Llumitaxi Espín (Y'1989). Realizó sus estudios de nivel secundario en el Colegio Instituto Tecnológico Superior Guaranda. Egresado de Ingeniería Eléctrica de la Universidad Politécnica Salesiana. Su trabajo está basado en el diseño e implementación de un acondicionador llamado filtro activo híbrido para mejorar la calidad de la energía, este permite corregir armónicos generados por la integración de generación fotovoltaica en el sistema de distribución eléctrico. wllumitaxi@est.ups.edu.ec

Dirigido por:



Wilson David Pavón Vallejos (Y'1989). Actualmente es docente a tiempo completo de la Universidad Politécnica Salesiana. Obtuvo su título de tercer nivel en la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE como Ingeniero Electrónico en Automatización y Control. Obtuvo su título de cuarto nivel en la Universidad de Newcastle upon Tyne como Magister en Automatización y Control. Doctor por la Universidad de Ferrara – Italia. wpavon@ups.edu.ec

Todos los derechos reservados:

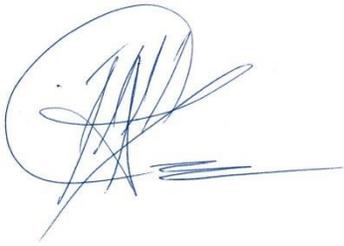
Queda prohibida, salvo excepción prevista en la ley, cualquier forma de reproducción, distribución, comunicación pública y transformación de esta obra para fines comerciales, sin contar con la autorización de los titulares de propiedad intelectual. La infracción de los derechos mencionados puede ser constitutiva de delito contra la propiedad intelectual. Se permite la libre difusión de este texto con fines académicos o investigativos por cualquier medio, con la debida notificación a los autores.

DERECHOS RESERVADOS
©2022 Universidad Politécnica Salesiana
QUITO - ECUADOR

DECLARATORIA DE COAUTORÍA DEL DOCENTE TUTOR

Yo, Wilson David Pavón Vallejos declaro que bajo mi dirección y asesoría fue desarrollado el trabajo de titulación *DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DEL FILTRO ACTIVO DE POTENCIA (APF) HÍBRIDO EN EL SISTEMA DE DISTRIBUCIÓN ELÉCTRICA PARA MEJORAR EL PERFIL DE TENSION MODULADO POR VECTOR ESPACIAL CON GENERACIÓN FOTOVOLTAICA* realizado por William Israel Llumitaxi Espín, obteniendo un producto que cumple con todos los requisitos estipulados por la Universidad Politécnica Salesiana para ser considerados como trabajo final de titulación.

Quito D.M., febrero del 2022



.....

Wilson David Pavón Vallejos

C.I: 171922431-1

CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR

Yo, William Israel Llunitaxi Espín, con documento de identificación N° 0202072666, manifiesto mi voluntad y cedo a la Universidad Politécnica Salesiana la titularidad sobre los derechos patrimoniales en virtud de que soy autor del trabajo de grado/titulación intitulado: *DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DEL FILTRO ACTIVO DE POTENCIA (APF) HÍBRIDO EN EL SISTEMA DE DISTRIBUCIÓN ELÉCTRICA PARA MEJORAR EL PERFIL DE TENSIÓN MODULADO POR VECTOR ESPACIAL CON GENERACIÓN FOTOVOLTAICA*, mismo que 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 aplicación a lo determinado en la Ley de Propiedad Intelectual, en mi condición de autor me reservo los derechos morales de la obra antes citada. En concordancia, suscribo este documento en el momento que hago entrega del trabajo final en formato digital a la Biblioteca de la Universidad Politécnica Salesiana.

Quito, D.M., febrero de 2022



.....
William Israel Llunitaxi Espín

C.C.: 0202072666

ÍNDICE GENERAL

1	Introducción	2
2	Marco teórico	4
2.1	Red de distribución de energía eléctrica.....	4
2.2	Calidad de la energía debido a la GD fotovoltaica.....	7
2.3	Compensación de Armónicos en el Sistema de Distribución.....	8
3	Modelamiento matemático para el diseño.....	11
3.1	Sistema Fotovoltaico	11
3.2	Convertidor DC-DC	13
3.3	Convertidor DC-AC	15
3.4	Filtro Activo de Potencia - APF.....	15
4	Diseño e implementación del modelado	19
4.1	Sistema de Distribución IEEE de 13 barras	19
4.2	Diseño y simulación del Sistema Fotovoltaico	20
4.3	Diseño y simulación del Inversor.....	21
4.4	Diseño y simulación del APF.....	21
5	Análisis de resultados.....	22
5.1	Comportamiento del Arreglo Fotovoltaico	22
5.2	Comportamiento del Convertidor Elevador	23
5.3	Comportamiento del Inversor.....	24
5.4	Comportamiento del APF.....	25
5.5	Comparativa entre el Escenario 1 y el Escenario 2.....	25
6	Conclusiones	27
6.1	Trabajos futuros.....	28
7	Referencias	28
7.1	Matriz de Estado del Arte.....	33
7.2	Resumen de Indicadores.....	39

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Esquema de la Generación distribuida incluyendo el APF híbrido	4
Figura 2. Topología del sistema de distribución con GD	5
Figura 3. Configuración típica del filtro pasivo	8
Figura 4. Configuración típica del filtro activo de potencia.	9
Figura 5. Diagrama unifilar de la célula fotovoltaica	11
Figura 6. Diagrama unifilar del convertidor elevador DC-DC.	13
Figura 7. Diagrama unifilar del APF.....	16
Figura 8. Estructura de control del APF.....	17
Figura 9. Sistema de distribución modificado IEEE 13 barras	20
Figura 10. Diseño para implementación de convertidor dc-dc	21
Figura 11. Esc 1 – Conexión de generación FV a sistema de distribución sin APF	22
Figura 12. Esc 2–Conexión de generación FV a sistema de distribución con AP	22
Figura 13. Curva I-V del arreglo fotovoltaico	22
Figura 14. Curva P-V del arreglo fotovoltaico.....	23
Figura 15. Voltaje a la salida del arreglo fotovoltaico	23
Figura 16. Corriente a la salida del arreglo fotovoltaico.....	23
Figura 17. Potencia a la salida del arreglo fotovoltaico.....	23
Figura 18. Voltaje a la salida del convertidor elevador	24
Figura 19. Ciclo de trabajo del convertidor elevador.....	24
Figura 20. Voltaje en el nodo 634 del sistema de 13 barras IEEE con generación FV. ..	24
Figura 21. Corriente a inyectada por el inversor abc	25
Figura 22. Voltaje medido en los capacitores del APF.....	25
Figura 23. Corriente de compensación inyectada por al APF hacia el sistema.	25
Figura 24. Comparativa de voltaje en nodo 634 con y sin APF para la fase a	26
Figura 25. Comparativa de voltaje en nodo 634 con y sin APF para la fase b	26
Figura 26. Comparativa de voltaje en nodo 634 con y sin APF para la fase c	26
Figura 27. Índice de Distorsión Amónica Total – Voltaje en nodo 634 sin APF.	26
Figura 28. Índice de Distorsión Amónica Total – Voltaje en nodo 634 con APF.	27
Figura 29. Resumen e indicador de la temática - Estado del arte.	39
Figura 30. Indicador de formulación del problema - Estado del arte.....	40
Figura 31. Indicador de solución - Estado del arte.....	40

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Algoritmo Seguidor de Máximo Punto de Potencia – MPPT.....	14
Tabla 2. Datos del sistema de distribución de 13 barras de la IEEE.....	20
Tabla 3. Parámetros de diseño del arreglo fotovoltaico.....	20
Tabla 4. Parámetros de diseño del convertidor elevador	21
Tabla 5. Parámetros de diseño del inversor	21
Tabla 6. Parámetros de diseño del APF.	21
Tabla 7. Comparativa del THD para el Escenario 1 y el Escenario 2.....	26
Tabla 8. Matriz de estado del arte	33

DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DEL FILTRO ACTIVO DE POTENCIA (APF) HÍBRIDO EN EL SISTEMA DE DISTRIBUCIÓN ELÉCTRICA PARA MEJORAR EL PERFIL DE TENSIÓN MODULADO POR VECTOR ESPACIAL CON GENERACIÓN FOTOVOLTAICA

Resumen

En la presente investigación se desarrolla el diseño e implementación digital del filtro activo de potencia híbrido para corregir el perfil de voltaje que se ve afectado cuando se integra la generación fotovoltaica en el sistema de distribución eléctrico.

Para lograr lo indicado, se ha usado el control de modulación de vector espacial, el cual conlleva a que los armónicos de voltaje y de corriente de salida se reduzcan a fin de obtener la mejora en términos de calidad de la energía entregada a la red.

A fin de obtener el diseño e implementación, se procederá a utilizar el sistema IEEE de 13 barras y la implementación del diseño se mostrará a través de los bloques de simulink que serán simulados en MATLAB. Resultado de la simulación y al analizar las variables, se establecen los potenciales beneficios de incorporar los filtros APF para la integración de los sistemas fotovoltaicos, determinando a su vez las correcciones significativas en el perfil de voltaje reduciendo las perturbaciones en la carga, mejorando la compensación de los armónicos de corriente y voltaje.

Palabras Clave: Filtros, Calidad, Microrredes, Armónicos, Sistemas fotovoltaicos, Sistema eléctrico de potencia.

Abstract

This research develops the design and digital implementation of the hybrid active power filter to correct the voltage profile that is affected when photovoltaic generation is integrated into the electrical distribution system.

To achieve the above, spatial vector modulation control has been used, which leads to the voltage and output current harmonics being reduced in order to obtain the improvement in terms of quality of the energy delivered to the network.

In order to obtain the design and implementation, the 13-bar IEEE system will be used and the implementation of the design will be displayed through the simulink blocks that will be simulated in MATLAB. Result of the simulation and when analyzing the variables, the potential benefits of incorporating APF filters for the integration of photovoltaic systems are established, in turn determining significant corrections in the voltage profile by reducing disturbances in the load, improving the compensation of current and voltage harmonics.

Keywords: Filters, Quality, Microgrids, Harmonics, Photovoltaic systems, Electrical power system.

1 Introducción

La demanda de electricidad en el mundo actual está aumentando rápidamente, desde los servicios domésticos hasta las industrias comerciales, todo esto asociado a la innovación tecnológica en estas etapas; atado con este crecimiento de la demanda, se ha implementado de forma paralela la integración de recursos energéticos distribuidos (RED).

Entre los principales sistemas distribuidos se pueden citar sistemas solares fotovoltaicos (FV), sistema de conversión de energía eólica (WECS), pilas de combustible, sistemas de generación de energía distribuida (GD), y dispositivos de almacenamiento, elementos que han mejorado la confiabilidad y la calidad de la energía eléctrica al mismo tiempo que disminuye el desabastecimiento de la carga ubicada en las redes de distribución o transmisión de energía.

Dado la evolución tecnológica, se puede señalar que la electricidad proveniente de las centrales de generación que usan energía fotovoltaica y eólica han incrementado su uso permitiendo reducir la carga continua sobre la red eléctrica a nivel de potencia difiriendo inversiones y ganado un plus importante en la reducción de emisiones al ambiente, aspecto valorado a nivel mundial [1].

Por otro lado, en la etapa de consumo, llámese esta industrial, comercial o residencial, actualmente se permite la introducción un sin número de nuevos dispositivos asociados a la producción de energía mediante el uso de energía renovable, así como cargas lineales y no lineales; estos dispositivos incluyen el rectificador no lineal y el compensador de VAR estático (SVC), que afectan la calidad de la energía [2].

Los sistemas integrados de generación asociados a la utilización de energía

renovable, en particular la fotovoltaica, producen ciertos armónicos, calor y otros problemas de calidad de la energía, lo que afecta el espectro de forma de onda sinusoidal de corriente y voltaje de suministro [3].

Los efectos que comúnmente se producen son: sobrecalentamiento de los transformadores, mal funcionamiento de los motores, aumento de las pérdidas de potencia, necesidad de dispositivos de protección y la vida útil limitada de los módulos solares fotovoltaicos [4].

Complementario a lo descrito, es necesario indicar que la potencia de salida es estocástica en función del recurso energético es intermitente, por lo tanto, se requieren métodos adecuados de mitigación que garanticen un nivel de calidad de la energía y la reducción de los armónicos actuales, todo esto para mejorar la confiabilidad del sistema.

Se han propuesto varias soluciones para resolver los problemas de calidad de la energía, por ejemplo en [5] y [6] se presenta una modelación de sistemas desequilibrados, técnicas de equilibrio de carga, análisis de armónicos inyectados, evaluación de la corriente neutra excesiva, modelación de la carga de potencia reactiva e interferencia de red en sistemas eléctricos. Para el caso que nos compete, se enfocará el análisis en los filtros como elementos que mitigarán armónicos dañinos al sistema, lo cual impactará de manera indirecta en la mejora de factores de potencia, reducción de pérdidas de potencia, minimización de calentamiento en conductores, sobrecalentamiento en transformadores, entre otros.

Así mismo de la literatura, se puede indicar que en [7] y [8] los filtros se utilizan tradicionalmente en sistemas integrados en la red en combinación con filtros pasivos (PF) a fin de contrarrestar armónicos en serie. Como tal, los PF

tienen un uso limitado debido a problemas, que incluyen filtrado limitado, rangos de carga específicos, compensación fija, tamaños más grandes, resonancia negativa en paralelo y en serie entre rejillas e impedancia del filtro, estos problemas provocan el rápido deterioro de los componentes pasivos.

Según [9] y [10] se señala que los sistemas integrados en la red como inversores fotovoltaicos y sistemas de generación basados en energías renovables, conllevan a problemas de calidad de la energía.

Dichos problemas son solucionados mediante el uso de tecnologías de filtrado más avanzadas, como son: el uso de compensador síncrono estático, implementación de filtro de potencia activa (APF), regulador de voltaje dinámico, inversor multinivel, sistema de monitoreo de energía y acondicionador de calidad de energía unificado (UPQC).

Sin embargo, en [11] el shunt APF (SAPF) se establece como la solución más dominante y liberal frente a problemas de calidad de la energía, con compensación de potencia reactiva y armónicos de corriente, concluyendo que, el rendimiento del filtro depende de los parámetros del inversor, los esquemas de control y las técnicas de detección de la corriente de referencia. En [11] también se indica que la señal de corriente de referencia se extrae mediante técnicas de detección de carga armónica, como la teoría de potencia instantánea (teoría $p - q$), métodos de secuencia positiva fundamental y detección sincrónica, para un control eficaz de los APF.

Por otra parte, en [12] se indica que dos estándares internacionales, IEEE-519 e IEC 61000-3-2, establecen los límites para todas las empresas de servicios de distribución de energía eléctrica en el diseño y operación de sus sistemas los cuales son aplicables más aún con la

creciente demanda de carga, es así que en [13] se señala que la implementación de los APF es una solución que permite cumplir con los estándares antes descritos pero también se señala que la mejora de calidad del voltaje depende de la capacidad del filtro lo que a su vez impacta el costo del sistema acumulativo.

Por lo señalado y dado el costo que se involucra en los filtros descritos, en [14]. Se concluye que, como solución, se utilizan APF híbridos (HAPF) para configurar el PF con SAPF, de esta forma, en la Figura 1 se esquematiza de forma general el esquema para aplicar los HAPF al sistema de generación y su interconexión con la red. En la operación HAPF, ambos filtros están controlados, de manera que los armónicos de orden bajo son eliminados por la operación SAPF, mientras que los armónicos de frecuencia más alta son cancelados por PF.

Recientemente y según lo descrito en [15], varias topologías HAPF utilizan transformadores y un número excesivo de componentes pasivos como herramientas clave para gestionar la mejora y adecuación del tamaño, el costo y el peso del filtro. Sin embargo, las topologías sin transformador logran una mayor eficiencia y seguridad del sistema, un tamaño volumétrico más pequeño, un costo más económico y estructuras más compactas en comparación con las topologías más antiguas basadas en transformadores.

Así mismo en [16] se indica que, las diferentes combinaciones de convertidores de potencia desviadas en el punto de acoplamiento común funcionan como una interfaz entre la empresa de servicios públicos y la fuente de energía renovable, según la estructura de la topología y el esquema de modulación. A pesar de lo mencionado, el voltaje de modo común fluctuante y la ausencia de

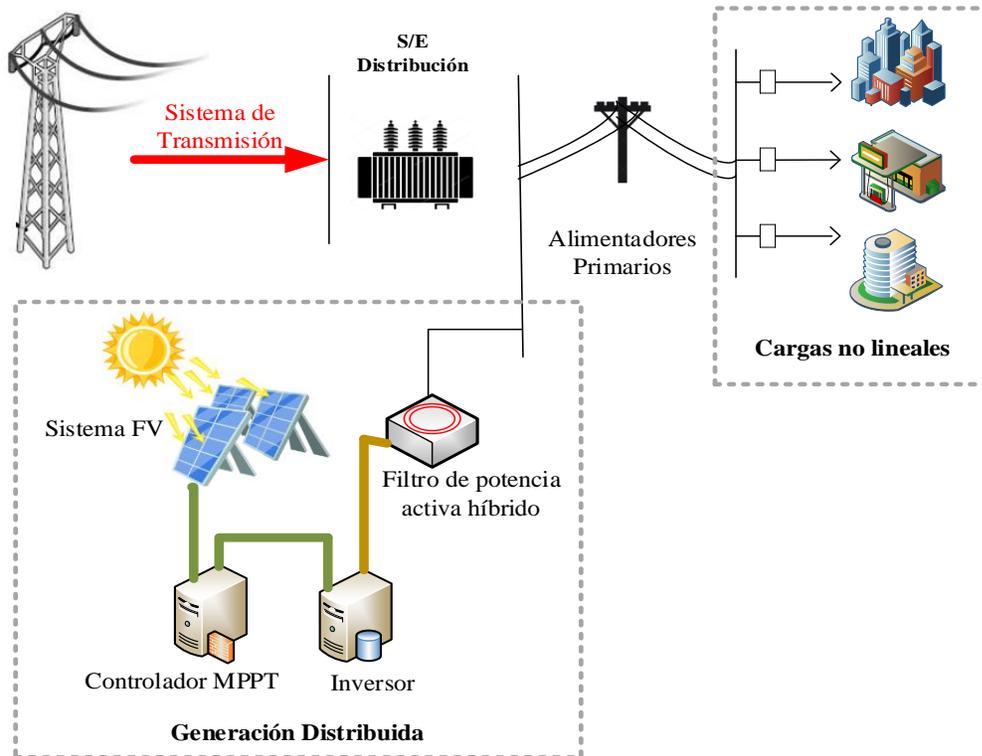


Figura 1. Esquema de la Generación distribuida incluyendo el APF híbrido [autor]

corriente de fuga en el sistema fotovoltaico conectado a la red contribuyen a la mejora del voltaje y la frecuencia del sistema en comparación con las topologías tradicionales.

Bajo las premisas expuestas, el trabajo propuesto pretende desarrollar el diseño y la implementación digital del filtro activo de potencia híbrido para corregir el perfil de voltaje que se ve afectado cuando se integra la generación fotovoltaica en el sistema de distribución eléctrico. El control de modulación de vector espacial conllevará a que los armónicos de voltaje y de corriente de salida se reduzcan a fin de obtener la mejora en términos de calidad de la energía entregada a la red. El documento se encuentra estructurado de la siguiente manera: i) Sección 2 muestra el marco teórico asociado a la problemática expuesta; ii) La Sección 3 detalla el diseño del modelado; iii) La Sección 4 muestra la aplicación del diseño; iv) La Sección 5 establece los

resultados y su análisis; y, en su parte final se puntualizan las conclusiones y trabajos futuros.

2 Marco teórico

2.1 Red de distribución de energía eléctrica

Esta fase es una de las más importantes del sistema eléctrico debido a su correspondencia directa con los consumidores y constituye la parte final del sistema eléctrico de potencia.

El sistema de distribución típicamente está constituido por subestaciones que reciben la energía de la subtransmisión y la conducen a los circuitos primarios para abastecer a ciertos sectores como son los grandes consumidores y seguidamente se traslada la energía hacia los transformadores de distribución para conectarse al circuito secundario y finalmente llegar a los usuarios finales.

La Figura 2 ilustra cómo se estructura la distribución en el sistema eléctrico de

potencia y se resalta la incorporación de la innovadora generación distribuida [17].

La actividad de distribución es un proceso evolutivo motivado por la expansión de la demanda, el cambio de la tecnología de los equipos, surgimiento de nuevas industrias, nuevos medios de generación, entre otros factores que la afectan y que constituyen una base para fijar aspectos en el diseño del sistema, implementación y la operación.

Los sistemas de distribución modernos actualmente incluyen cambios en función de políticas y estrategias dirigidas al cuidado ambiental, al bienestar social o al económico, que vuelven atractivo al mercado eléctrico con nuevos medios de generación pero al nivel de distribución, como lo es la generación distribuida cuya conexión es directa a la red, y son tecnologías acogidas por la planificación para ayudar o aliviar los cambios que se producen en la demanda [18].

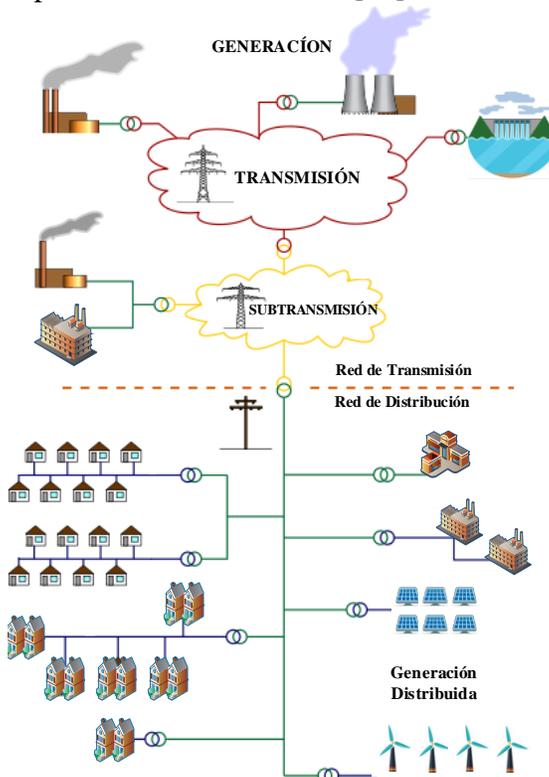


Figura 2. Topología del sistema de distribución con GD [18].

2.1.1 Recursos Energéticos Distribuidos y su impacto

En los últimos años el modelo tradicional del sistema eléctrico de potencia ha ido variando con el surgimiento de tecnologías alternativas para la generación, estas se encuentran en la cercanía de los consumidores y su propiedad puede ser privada como de las empresas de distribución, la misma es llamada Generación Distribuida GD [19].

Mediante la generación distribuida se ha incentivado un futuro energético comprometido con el cuidado ambiental con la inclusión de energías limpias a pesar de que aún se incluyen a fuentes tradicionales que usan combustibles fósiles. Las fuentes de GD renovable no solo reducen el impacto ambiental, sino que comprimen la inversión en mantenimiento, también aplazan el capital y mejoran las variables eléctricas en los alimentadores. Pero como se mencionó anteriormente los estudios que permitan la conexión para la penetración, localización, selección de tecnología, modelamiento y caracterización del alimentador deben ser cuidadosos y rigurosos porque el diseño pasado de las redes no incluye a estas tecnologías y pueden verse influenciadas con sobrevoltajes, en los niveles de calidad de energía, pueden deteriorar la confiabilidad, seguridad y eficiencia.

A continuación, se detalla cómo afectan los recursos energéticos distribuidos a la red de distribución [20]:

a) Impacto en las pérdidas de potencia

Esta es la principal influencia de la GD en la distribución y está relacionada con las pérdidas en los alimentadores, su relación es directa debido al análisis que se realiza para la ubicación de la misma y cuyo objetivo es reducir las pérdidas e incrementar la confiabilidad de la red.

Esto quiere decir que si la ubicación es elaborada óptimamente se lograría reducir dichas pérdidas, su función es similar a la de los condensadores en la red, pero con la diferencia que los bancos de condensadores solo inyectan potencia reactiva mientras que la generación distribuida contribuye tanto de potencia activa como de reactiva. La mejora del alimentador de distribución con respecto a la disminución de pérdidas es incremental de acuerdo al nivel de penetración de la GD y además se mejora el factor de potencia y el perfil de voltaje.

b) Influencia en la regulación de voltaje

Tradicionalmente la regulación de voltaje se ha solventado con la operación de transformadores con TAP y también con bancos de capacitores en los alimentadores, pero la integración de GD cambia la configuración de las redes.

La GD afecta los niveles de voltaje y los flujos de potencia de forma positiva si los estudios de flujos, estabilidad y cortocircuito son adecuados caso contrario el impacto es negativo todo depende de las redes y características de la o las unidades de generación distribuida.

c) Influencia en los niveles de cortocircuito

La inclusión de generación distribuida incrementa la probabilidad de cortocircuitos en la red por la incidencia fallas que pueden producirse en las unidades.

Los niveles de cortocircuito se ven afectados por el aumento de corriente de falla y pueden causar la pérdida de coordinación de protecciones, la gravedad aumenta en función de la cantidad de unidades de GD incorporadas, el distanciamiento, capacidad y tecnología con respecto a donde se presente la

ocurrencia de la falla, esto afecta evidentemente la confiabilidad y seguridad del sistema de distribución.

Según la normativa [21] establece que la generación distribuida debe tener un porcentaje menor al 10% con respecto a la potencia de cortocircuito mínimo.

d) Impacto por distorsión armónica

Los armónicos son deformaciones de onda en el voltaje y corriente producidos a lo largo del sistema de potencia hasta la demanda, por lo que su presencia es inevitable. Estos se originan por cargas no lineales externas al sistema como: la iluminación fluorescente, hornos de arco, equipos conmutados, convertidores de corriente alterna a continua, variadores de velocidad, entre otros.

En el mismo sistema también se produce la no linealidad en los dispositivos que usan electrónica de potencia como los transformadores con la impedancia de excitación, en los generadores sincrónicos e inversores; y adicionalmente la generación distribuida en su ingreso causa armónicos [22].

2.1.2 Generadores Fotovoltaicos Distribuidos

Las distribuidoras han implementado estudios de ingeniería que les permiten conocer el impacto sobre la seguridad del sistema, en la calidad de la energía y la operación de los alimentadores primarios y secundarios de distribución con la inserción de los nuevos recursos de generación distribuidos, que se motiva por el crecimiento dinámico de la demanda y a la amplia solicitud de conexión con la GD [20].

Nuevos estudios, se esfuerzan por presentar una investigación profunda sobre el impacto de la interconexión cuando se integra la generación fotovoltaica en el sistema de distribución

eléctrico, porque se considera que los sistemas solares fotovoltaicos los que mayor crecimiento han tenido y el mayor margen de aplicación tienen en cuanto a la capacidad de instalación.

Estos sistemas permiten cogenerar electricidad y también entregar energía para el consumo propio o para el despacho del sistema, adicionalmente aportan con beneficios significativos al sistema de distribución en función de las condiciones de la instalación y del sistema, como son [23]:

- Alivio de carga con la generación fotovoltaica distribuida.
- La generación distribuida fotovoltaica está incluida en el beneficio de reducir las pérdidas en la distribución de energía.
- Modulación de los equipos del sistema de distribución.
- A los alimentadores de distribución brinda soporte de voltaje y compensación de potencia reactiva.

Como se ha descrito anteriormente, el sistema fotovoltaico tiene beneficios importantes, pero también desventajas cabe mencionar algunas [24]:

- Empezando desde su eficiencia que es muy baja en la producción de energía eléctrica con el recurso solar.
- Los costos de inversión son altos.
- Requiere de una ubicación geográfica extensa.
- El recurso solar es intermitente e impredecible.
- En la integración a la red de distribución la afecta con armónicos lo que perjudica la calidad de energía.
- Aumenta la probabilidad de falla, entre otras.

Es necesario resaltar el ingreso de los sistemas fotovoltaicos en la red de distribución debido a que sobre este efecto la presente investigación busca encontrar la mejor acción, ya que dicha interconexión cambia los perfiles de voltaje, afecta a los flujos de potencia activa y reactiva en magnitud y dirección, produce pérdidas y aporta a la corriente de cortocircuito.

2.2 Calidad de la energía debido a la GD fotovoltaica

En la etapa de la distribución se dispone globalmente de normativas que rigen la operación de las distribuidoras en la entrega del suministro de energía eléctrica al consumidor. Por lo tanto, en esta etapa es donde corresponde analizar los impactos de sobrevoltaje, caídas de voltaje, flicker o desequilibrios que la generación distribuida produce en las redes.

Los eventos que causan perturbaciones se originan de la conexión y desconexión de las unidades de GD, esto produce fluctuaciones y distorsión armónica que comúnmente se presentan en los sistemas fotovoltaicos y eólicos, y son de mayor impacto porque se conectan en el área de mayor debilidad del sistema eléctrico de potencia [25].

En referencia a la generación distribuida con sistemas solares fotovoltaicos producen gran preocupación por la afectación que ocasiona en la distribución con la disminución de la regulación y desbalances en el voltaje y principalmente los armónicos, este último nos enfocamos debido a su relevancia; los armónicos son la distorsión de la onda de frecuencia y puede llegar a ser muy complicado de pronosticar y como se mencionó causa en el sistema de distribución perjuicios en su operación y directamente afecta al

consumidor final en la calidad del suministro [26]. Sin dudas en el momento de integrar energías renovables en la distribución debe controlarse con estudios, análisis y finalmente plantear estrategias para que la calidad de la energía entregada no se vea afectada.

En vista de esta problemática con respecto a los armónicos ocasionados por la generación fotovoltaica distribuida y su contribución negativa a la calidad de la energía se desarrolla este estudio que ve más allá de los tradicionales estudios de flujo de potencia y de voltajes, y pretende evidenciar el potencial impacto sobre los voltajes y corrientes cuando se integra la generación distribuida fotovoltaica que intrínsecamente afecta con armónicos a la red, motivo por el que se presenta el diseño e implementación de un acondicionador para mejorar la calidad de la energía con la compensación de armónicos corrigiendo los voltajes y corrientes de salida con un filtro activo de potencia híbrido que se describirá posteriormente.

2.3 Compensación de Armónicos en el Sistema de Distribución

Conforme se ha ido desarrollando la tecnología cada elemento que compone al sistema de potencia ha ido mejorando sus características para brindar mayor eficiencia al sistema, pero también la electrónica de potencia ha evolucionado de la mano de las nuevas cargas no lineales que se incorporan a la demanda comercial e industrial de energía y afectan al sistema de transmisión y principalmente a la distribución ya que es el área a que se conecta directamente perjudicando su operación. Es por este motivo de desde la década de los setenta se han ido buscando estrategias que cumplan acciones de compensación de potencia y las investigaciones han desembocado en el desarrollo de los

filtros de potencia [27]. Se debe conocer que existen dos tipos de cargas no lineales, las que se pueden identificar como los convertidores estáticos (inversores, rectificadores, etc.) que son ubicados intencionalmente y se puede identificar su inyección de armónicos, mientras que las cargas que no se pueden identificar son de baja potencia y no se identifica, pero en cantidad causan grandes perturbaciones en la operación del sistema de distribución [28].

Por los efectos negativos de los armónicos a la distribución y las cargas no lineales existentes es necesario un control con los filtros de potencia que han venido desarrollando como técnicas de compensación de armónicos, estos corresponden a los filtros activos de potencia y los filtros pasivos.

2.3.1 Filtros Pasivos de Potencia

Esta técnica tiene la misión de minimizar la contaminación armónica y está compuesta por componentes tradicionales como: capacitores, inductores y transformadores. En la Figura 3 se visualiza básicamente el funcionamiento de un filtro pasivo que representa una trampa para los armónicos y es más eficiente si su uso es masivo, está compuesto por circuito LC que absorbe armónicos. La corriente no se puede controlar, ni modificar posteriormente, es deficiente frente a la resonancia, impedancias y rangos de funcionamiento.

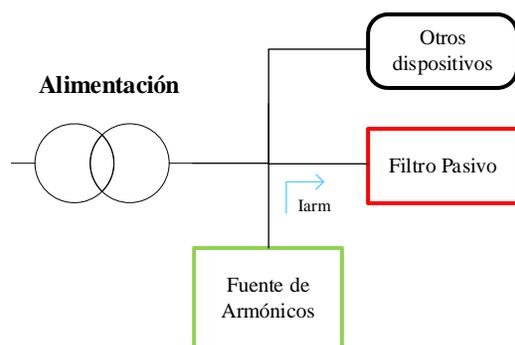


Figura 3. Configuración típica del filtro pasivo [29].

Un filtro pasivo es una combinación de capacitores e inductores que están sintonizados para resonar en una sola frecuencia, o a través de una banda de frecuencias. En los sistemas de energía, los filtros pasivos se utilizan para suprimir las corrientes armónicas y disminuir la distorsión de voltaje que aparece en las partes sensibles del sistema [29].

Los filtros pasivos funcionan mostrando diferentes valores de impedancia en la frecuencia resonante. Un filtro conectado en serie debe presentar alta impedancia a la frecuencia armónica que necesita ser bloqueada. Aunque es posible una configuración en serie, es más común conectar filtros en paralelo. Esta configuración de derivación desvía las corrientes armónicas a tierra y, al mismo tiempo, proporciona potencia reactiva, que puede utilizarse para corregir el factor de potencia. Como tales, los filtros de derivación pasivos están diseñados para ser capacitivos a la frecuencia fundamental. El filtro pasivo se puede ajustar al armónico de corriente de carga y se puede diseñar para corregir el factor de potencia de desplazamiento de carga.

Para cargas industriales conectadas a un suministro constante, es difícil diseñar filtros pasivos que puedan absorber una parte significativa de la corriente armónica de carga y, por lo tanto, su efectividad se deteriora.

Especialmente, para la compensación de cargas del tipo rectificador de diodo, donde se requiere un pequeño filtro pasivo de kilovoltio-amperio, es difícil lograr la sintonización requerida para absorber un porcentaje significativo de las corrientes armónicas de carga.

Para este tipo de aplicación, el filtro pasivo no se puede sintonizar exactamente a las frecuencias armónicas porque pueden sobrecargarse debido a la

distorsión del voltaje del sistema y/o a los armónicos de la corriente del sistema.

Este evento puede extrapolarse cuando se trata de generadores de tipo fotovoltaico conectados a la red de distribución, porque su capacidad de potencia es importante y su interacción con la red es mediante inversores, debido a estos aspectos este tipo de filtro puede tener inconvenientes y resulta beneficiosa la búsqueda de otros tipos de filtros como los activos o activos híbridos [30].

2.3.2 Filtros Activos de Potencia (APF)

Es una técnica para la eliminación de armónicos, es considerada como una fuente de voltaje o corriente que se conecta de forma directa o por un transformador y se puede controlar. Este filtro llega hasta anular los armónicos producidos en la corriente o en el voltaje con la inyección de voltaje o corriente adecuada con componentes armónicas de igual magnitud que la de la carga para garantizar la entrega de una señal senoidal. Un APF como se visualiza en la Figura 3 está compuesta por una zona de minimización de armónicos que compensa todas las órdenes armónicas en un periodo instantáneo y la potencia compensación es definida al rango único de compensación [31], [32].

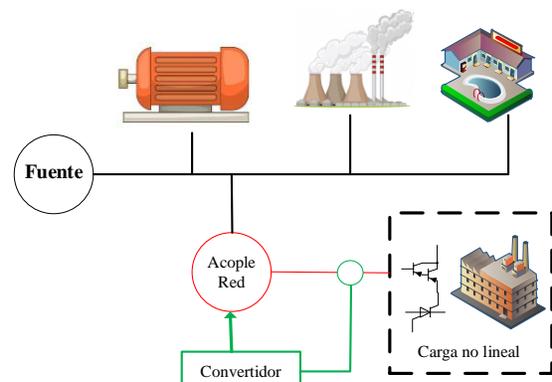


Figura 4. Configuración típica del filtro activo de potencia [32].

Este tipo de filtro se ajusta a los armónicos, no tiene influencia con la impedancia ni con el factor de potencia, esto lo convierte en un medio satisfactorio porque no depende de la potencia reactiva esto quiere decir que su funcionamiento es poco exigente. Las funciones de este filtro son [33]:

- Disminución de armónicos de la red, entre el APF y la generación.
- Reducción de la corriente por cero.
- Los armónicos de voltaje se reducen en los puntos de conexión con las cargas.
- Corrección del factor de potencia.
- Equilibrio de la corriente en las fases.
- Equilibrio de del voltaje en todas las fases.
- Minimización del parpadeo o flicker.
- Regulación de voltaje.

Los filtros activos se clasifican en tres según la función que realizan:

- 1) El primer filtro es el paralelo que procura eliminar armónicos de corriente, con la generación de corriente elimina los armónicos de corriente, pero de la carga, las suma y forma con el filtro una onda sinusoidal [34].
- 2) El segundo filtro activo es el de serie que al igual que la de paralelo genera una onda de voltaje que la suma con la armónica de la carga e igualmente forma una onda sinusoidal [35].
- 3) Y el tercer filtro es el híbrido que corresponde a la combinación serie (para distorsión de voltaje) y paralelo (para distorsión de corriente).

Para este último tipo de filtro el mixto, que es el filtro usado en este estudio para

contrarrestar los armónicos ocasionados por la integración de GD fotovoltaica, requiere de técnicas que determinen que el filtro se active coordinadamente por los semiconductores, a estos filtros especiales se los llama filtros activos de potencia híbridos y seguidamente se detalla [36].

2.3.3 Filtros Activos Híbridos de Potencia

Los filtros de potencia activa son dispositivos electrónicos de potencia dedicados a mejorar la calidad de la energía eléctrica, éstos muestran distintas ventajas a comparación de la compensación que se realiza de forma tradicional, dado que su mecanismo de control permite que se adapte a los cambios que se produzcan en la carga, facilitando la reducción de la posibilidad de aparición de resonancias y además para el caso de cargas desbalanceadas se puede equilibrar las corrientes de línea [37].

De forma generalizada se puede señalar que este tipo de filtro está constituido por tres componentes necesarios. El componente inicial corresponde al módulo de potencia constituido por un inversor trifásico de voltaje, un capacitor localizado en el sitio de corriente continua del inversor que sirve para el intercambio de potencia reactiva con la red y una bobina ubicada en el sitio de corriente alterna del inversor para acoplar el inversor con la red de alimentación. El segundo componente determinará las componentes armónicas de cada una de las corrientes de línea de la carga trifásica no lineal, para ser luego inyectadas en contrafase al sistema de alimentación por el filtro activo, el cálculo de las corrientes de compensación puede ser determinado usando algunos algoritmos, como la teoría pq o a partir de la transformada de Park [38].

Finalmente, el tercer componente permite determinar el tiempo de activación de los semiconductores de potencia del inversor, para que el filtro sintetice e inyecte al sistema de alimentación las corrientes de compensación. En este contexto, se han desarrollado varias técnicas para determinar los tiempos de conmutación, entre las principales se señala las siguientes [39]:

- a) Modulación por banda de histéresis de corriente HCC.
- b) Modulación por ancho de pulso sinusoidal SPWM.
- c) Modulación por vector espacial SVPWM.

Para el presente caso de estudio se consideró la técnica de la modulación por ancho de pulso de vectores espaciales, esta es una técnica que funciona sobre el inversor como unidad y se fundamenta en que un único vector tiene la capacidad de representar las tres fases del sistema de potencia trifásico, este vector se origina a partir de los periodos tiempos de trabajo de las fases de conmutación del inversor [28].

La modulación por vectores espaciales es la técnica modelada en este artículo se lo incluye en este trabajo para diseñar e implementar un acondicionador para mejorar la calidad de la energía, el filtro activo de potencia híbrido permite corregir el perfil de voltaje que se ve afectado cuando se integra la generación fotovoltaica en el sistema de distribución eléctrico, esta corrección se la realiza utilizando el filtro activo de potencia y el control de modulación de vector espacial que presenta menos armónicos de voltaje de salida, menos armónicos de corriente de salida.

3 Modelamiento matemático para el diseño

Previo a la implementación de las simulaciones, es necesario plantear los modelos matemáticos y estructuras de cada uno de los componentes del sistema, los mismos que serán descritos a continuación.

3.1 Sistema Fotovoltaico

El circuito equivalente de la Figura 5 representa una aproximación de la célula fotovoltaica. Este circuito está compuesto por una fuente de corriente I_{FV} que es generada directamente por las propiedades de la célula fotovoltaica. Esta fuente de corriente está conectada en paralelo con un diodo. Adicionalmente se observan dos componentes adicionales, concretamente dos resistencias R_{pl} y R_s , las cuales representan a las pérdidas de corriente y pérdidas en los terminales de la célula fotovoltaica respectivamente [40], [41].

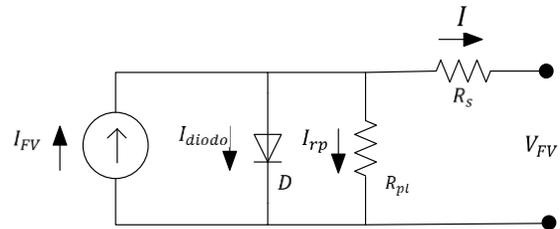


Figura 5. Diagrama unifilar de la célula fotovoltaica [40].

En el circuito equivalente de la célula fotovoltaica se representa además la corriente de salida I y el voltaje de salida V_{FV} . El modelo matemático queda descrito de la siguiente manera:

$$I_{FV} = I_{diodo} + I_{rp} + I \quad (1)$$

Despejando la corriente de salida de la célula fotovoltaica se tiene:

$$I = I_{FV} - I_{diodo} - I_{rp} \quad (2)$$

Las ecuaciones que definen a las corrientes I_{diodo} y I_{rp} , quedan descritas en (x) y (x):

$$I_{diodo} = I_{st} \left[\exp \left(\frac{q[I.R_s + V_{FV}]}{AkTemp} \right) - 1 \right] \quad (3)$$

$$I_{rp} = \frac{V_{FV} + I.R_s}{R_{pl}} \quad (4)$$

Considerando las dos ecuaciones descritas anteriormente, se puede finalmente definir la ecuación de corriente de salida de la célula fotovoltaica como se indica en (5):

$$I = I_{FV} - I_{st} \left[\exp \left(\frac{q[I.R_s + V_{FV}]}{AkTemp} \right) - 1 \right] - \frac{V_{FV} + I.R_s}{R_{pl}} \quad (5)$$

Considerando un arreglo fotovoltaico con un número definido de paneles en serie N_{ps} y paneles en paralelo N_{pp} , las ecuaciones de corriente, voltaje y potencia a la salida del arreglo fotovoltaico quedan descritas en (6), (8) y (9).

$$I = N_{pp}.I_{FV} - N_{pp}.I_o \left[\exp \left(\frac{q[I.R_s + V_{FV}]}{AkTempN_{ps}} \right) - 1 \right] - \frac{V_{FV} + I.R_s}{R_{pl}} \quad (6)$$

En donde I_o se describe en (7):

$$I_o = I_{or} \left(\frac{Temp}{T_{SCT}} \right)^3 \left[\exp \left(\frac{qE_{go}}{Ak} \left[\frac{1}{T_{SCT}} - \frac{1}{Temp} \right] \right) \right] \quad (7)$$

$$V_{FV} = \left[\frac{N_{ps}AkTemp}{q} \right] \ln \left[\frac{N_{pp}I_{FV} - I + N_{pp}I_o}{I_o} \right] - IR_s \quad (8)$$

$$P_{FV} = V_{FV}N_{pp}I_{FV} - V_{FV}N_{pp}I_o \left[\exp \left(\frac{q[I.R_s + V_{FV}]}{AkTempN_{ps}} \right) - 1 \right] \quad (9)$$

A continuación, se describen cada una de las variables que forman parte de la modelación matemática de la célula fotovoltaica:

I	Corriente a la salida de célula o arreglo fotovoltaico.
V_{FV}	Voltaje a la salida de célula o arreglo fotovoltaico.
P_{FV}	Potencia a la salida de célula o arreglo fotovoltaico.
I_{FV}	Corriente producida por la característica de la célula fotovoltaica.
I_{diodo}	Corriente que circula a través del diodo en el circuito equivalente de la célula fotovoltaica.
I_{rp}	Corriente que circula por la resistencia en paralelo del circuito equivalente de la célula fotovoltaica.
D	Diodo que integra el circuito equivalente de la célula fotovoltaica.
R_{pl}	Resistencia en paralelo: representa a las pérdidas de corriente de la célula o arreglo fotovoltaico.
R_s	Resistencia en serie: representa a las pérdidas de los terminales de la célula o arreglo fotovoltaico.
I_{st}	Corriente de saturación.
q	Carga del electrón.
A	Factor de dualidad.
k	Constante de Boltzmann.
$Temp$	Temperatura de la célula fotovoltaica en grados Kelvin.

T_{SCR}	Temperatura de referencia.
N_{pp}	Número de paneles en paralelo del arreglo fotovoltaico.
N_{ps}	Número de paneles en serie del arreglo fotovoltaico.
I_o	Corriente de saturación de la célula fotovoltaica.
I_{or}	Corriente de saturación de la célula fotovoltaica a temperatura de referencia.
E_{go}	Margen de banda para el material de la célula fotovoltaica (Silicio).

3.2 Convertidor DC-DC

Analizado el recurso solar y conociendo la corriente, voltaje y potencia que será capaz de generar el arreglo fotovoltaico, es de suma importancia garantizar que los paneles fotovoltaicos entreguen siempre la máxima potencia disponible. Para ello se implementa un convertidor DC-DC [42].

Considerando que los valores de voltaje que maneja el sistema de distribución de 13 barras de la IEEE serán mayores que el voltaje de salida del arreglo fotovoltaico, se incluye un convertidor elevador. En la Figura 6 se ilustra el circuito equivalente del convertidor elevador, en donde sus componentes de diseño son: Inductor L_{boost} y capacitor C_{boost} [43].

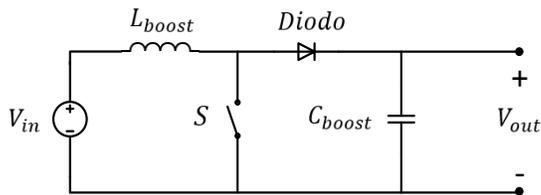


Figura 6. Diagrama unifilar del convertidor elevador DC-DC [43].

Las ecuaciones para el cálculo del inductor L_{boost} y el capacitor C_{boost} se expresan en (10) y (11) respectivamente.

$$L_{boost} = \frac{V_{in}(V_{out} - V_{in})}{\Delta I f_{SW} V_{out}} \quad (10)$$

$$C_{boost} = \frac{I_{out}(V_{out} - V_{in})}{\Delta V f_{SW} V_{out}} \quad (11)$$

La implementación del convertidor elevador ha sido considerada, como ya se mencionó anteriormente, con el propósito de garantizar que el arreglo fotovoltaico proporcione la máxima potencia disponible. Para ello se aplica una modulación PWM, en la cual los ciclos de trabajo son definidos por un algoritmo MPPT.

La ecuación que define el ciclo de trabajo del convertidor elevador se define en (12):

$$duty = 1 - \frac{V_{in}}{V_{out}} \quad (12)$$

El algoritmo MPPT se basa en el método de Perturbación y Observación, concretamente se perturba el valor del voltaje de los paneles fotovoltaicos y se observa lo que sucede con la potencia entregada por los mismos, de esta manera se puede conocer si el punto de operación en un determinado instante de tiempo se acerca o se aleja del punto de operación de máxima potencia. El algoritmo se ejecuta mediante un proceso iterativo, en el cual toma decisiones sobre el voltaje dependiendo de lo que sucede con el valor de la potencia. Es decir, si la potencia de la iteración $i+1$ es mayor a la potencia de la iteración i , significa que la dirección en la cual se perturba el voltaje (aumentar o disminuir) es la correcta [24][44]. El algoritmo MPPT se lo describe en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.:**

Tabla 1. Algoritmo Seguidor de Máximo Punto de Potencia – MPPT [autor].

Algoritmo: MPPT – Seguidor de Máximo Punto de Potencia.

Paso 1: Inicio.

Paso 2: Medición del voltaje y corriente de salida del panel o arreglo fotovoltaico.

Paso 3: Cálculos y Desarrollo:

- Asignación e inicialización de Variables:
 $V_{panel}, I_{panel}, P_{panel}, duty, dutyAnt$
 $pAnt, vAnt, \Delta duty, \Delta V, \Delta P$.
- Cálculo de Potencia de los paneles fotovoltaicos:
 $P_{panel} = V_{panel} \cdot I_{panel}$
- Cálculo de variación de la potencia y voltaje de los paneles:
 $\Delta P = P_{panel} - pAnt$
 $\Delta V = V_{panel} - vAnt$
- Condicionales
Si $\Delta P > 0$ Entonces
Si $\Delta V > 0$ Entonces
 $duty = dutyAnt - \Delta duty$
Si no Entonces
 $duty = dutyAnt + \Delta duty$
Si no Entonces
Si $\Delta V > 0$ Entonces,
 $duty = dutyAnt + \Delta duty$
Si no Entonces
 $duty = dutyAnt - \Delta duty$
- Actualización de Variables:
 $dutyAnt = duty$
 $vAnt = P_{panel}$
 $pAnt = V_{panel}$
- Variable de salida del Algoritmo:
duty

Paso 4: Análisis del voltaje, corriente y potencia a la salida del convertidor.

Paso 6: Fin

A continuación, se describen las variables consideradas para el diseño de los parámetros y estructura del convertidor elevador y el algoritmo MPPT.

V_{in}	Voltaje a la entrada del convertidor elevador.
V_{out}	Voltaje a la salida del convertidor elevador.

I_{out}	Corriente a la salida del convertidor elevador.
L_{boost}	Inductancia del convertidor elevador.
C_{boost}	Capacitancia del convertidor elevador.
<i>Diodo</i>	Impide la circulación de corrientes parásitas desde la salida hacia la entrada del convertidor.
f_{sw}	Frecuencia de conmutación del elemento semiconductor.
ΔV	Máximo rizado de voltaje de salida permitido (1%).
ΔI	Máximo rizado de corriente de salida permitida (5%).
S	Elemento de conmutación.
V_{panel}	Voltaje medido a la salida del panel o arreglo fotovoltaico en el instante de tiempo i .
I_{panel}	Corriente medida a la salida del panel o arreglo fotovoltaico en el instante de tiempo i .
P_{panel}	Potencia calculada a la salida del panel o arreglo fotovoltaico en el instante de tiempo i .
$duty$	Ciclo de trabajo del convertidor elevador en el instante de tiempo i .
$dutyAnt$	Ciclo de trabajo del convertidor elevador en el instante de tiempo $i-1$.
$vAnt$	Voltaje medido a la salida del panel o arreglo fotovoltaico en el instante de tiempo $i-1$.
$pAnt$	Potencia calculada a la salida del panel o arreglo fotovoltaico en el instante de tiempo $i-1$.
$\Delta duty$	Diferencia entre el ciclo de trabajo del convertidor elevador en el instante i menos el ciclo de trabajo en el instante $i-1$.
ΔV	Diferencia entre el voltaje del panel o arreglo fotovoltaico en el instante i

menos el voltaje en el instante $i-1$.

ΔP Diferencia entre la potencia del panel o arreglo fotovoltaico en el instante i menos la potencia en el instante $i-1$.

3.3 Convertidor DC-AC

Luego de obtener a la salida del convertidor DC-DC, un máximo aprovechamiento de la potencia que es capaz de generar el arreglo fotovoltaico [45] y considerando que la generación fotovoltaica será inyectada a la red eléctrica, se hace necesario la implementación de un convertidor DC-AC o Inversor [46].

El control del inversor será realizado mediante una Modulación por Ancho de Pulso Sinusoidal (SPWM), en el cual serán comparadas tres señales de referencia para las fases a, b y c con una señal portadora triangular [47]. El inversor estará conectado a la red eléctrica, por lo tanto, para estimar dichas señales de referencia para cada una de las fases, y garantizar que se encuentren en fase con la red eléctrica se implementará un lazo de fijación de fase (PLL, por sus siglas en inglés).

El cálculo de las señales de referencia de las fases a, b y c quedan definidas en las siguientes ecuaciones:

$$a = ma \cdot \sin \omega t \quad (13)$$

$$b = ma \left(\sin \omega t - \frac{2\pi}{3} \right) \quad (14)$$

$$c = ma \left(\sin \omega t + \frac{2\pi}{3} \right) \quad (15)$$

Posteriormente, para poder inyectar el flujo de potencia de la generación fotovoltaica hacia la red, se necesita dimensionar un filtro de red, el cual no es

más que una impedancia de conexión entre el inversor y la red eléctrica. El filtro RL se puede calcular mediante las ecuaciones (16) y (17) respectivamente.

$$R = \frac{0.0015 V_{out}^2}{P} \quad (16)$$

$$L = \frac{0.15 \frac{V_{out}^2}{P}}{2\pi f_{red}} \quad (17)$$

Las variables que intervienen en el diseño del inversor son descritas a continuación:

a	Señal de referencia para la fase a.
b	Señal de referencia para la fase b.
c	Señal de referencia para la fase c.
ωt	Seguimiento de fase de la red eléctrica – PLL.
ma	Amplitud de modulación
V_{out}	Voltaje de salida del inversor.
P	Potencia entregada por el inversor.
f_{red}	Frecuencia de la red eléctrica.
R	Resistencia del filtro de red.
L	Inductancia del filtro de red.

3.4 Filtro Activo de Potencia - APF

En este apartado se describe la modelación matemática y el control del APF, el mismo que será conectado en paralelo al sistema, con el objetivo de disminuir los componentes armónicos provocados por la inyección de generación fotovoltaica en el sistema de distribución.

En la Figura 7 se ilustra la estructura del APF, el cual está conformado principalmente por un capacitor o banco

de capacitores, un convertidor de fuente de voltaje y una inductancia de enlace necesaria para la conexión en paralelo con la red eléctrica [48].

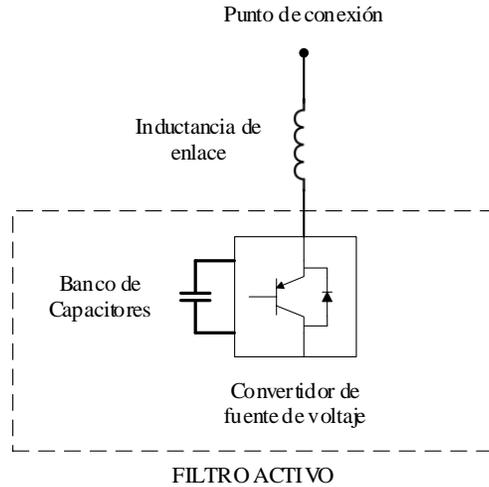


Figura 7. Diagrama unifilar del APF [48].

En primer lugar, se determina el valor del voltaje DC sobre el banco de capacitores. Es importante considerar que este valor de voltaje debe proveer los picos de voltaje provocados por la conmutación del convertidor. En la ecuación (18) se define el cálculo del mismo.

$$V_{DC}(APF) = \frac{2}{m\alpha} \hat{V}_s \quad (18)$$

Luego es necesario calcular el valor de la inductancia de enlace, la cual permitirá la inyección de la corriente de compensación hacia el sistema, por parte del APF, haciendo posible un intercambio de energía. Para este cálculo se considera como factor de diseño el máximo rizado de corriente DC permitido. La inductancia de enlace sigue la ecuación expresada en (19).

$$L_f(APF) = \frac{V_s}{6\sqrt{2} f_{SW} i_{rz}} \quad (19)$$

Finalmente se determina el valor del capacitor del APF. Para este cálculo se considera como factor de diseño el máximo rizado de voltaje DC permitido [49]. El valor del capacitor se calcula mediante la ecuación (20):

$$C(APF) = \frac{P_{out}}{V_s \cdot \sqrt{6} \cdot f_{SW} \cdot v_{rz}} \quad (20)$$

Una vez dimensionado el filtro activo de potencia que será conectado en paralelo con el sistema, se procede a definir su estrategia de control. Se propone realizar el control del APF, basándose en el cálculo de la corriente de referencia de compensación. Es decir, se trata de calcular los valores instantáneos de las corrientes no activas que circulan por el sistema. Por lo tanto, dentro de la simulación se genera un bloque de control, el cual estará encargado de determinar la corriente de referencia que el APF deberá inyectar a la red para compensar los armónicos.

El bloque de control del APF, se conforma por dos lazos principales, un lazo principal de corriente y un lazo secundario de control del voltaje DC del convertidor del APF [50]. Para el lazo principal, se necesita separar las componentes activa y no activa de la corriente. Por ello se utiliza un controlador de Marco de Referencia Síncrono (SRF, por sus siglas en inglés). Con este controlador se dispondrá de un marco de referencia que gira en el plano complejo, y está sincronizado con la tensión de la red en el punto de conexión.

Para llevar las componentes trifásicas a,b,c al marco de referencia SRF mencionado, se utilizan las transformadas de Clarke y Park, siendo necesario también calcular la fase del sistema en el punto de conexión mediante un Lazo de Fijación de Fase – PLL.

Es importante mencionar que la transformada de Clarke se utiliza para convertir el sistema trifásico de componentes a,b,c en un marco de referencia estacionario ortogonal de componentes α,β . Por su parte, la transformada de Park convierte estas componentes α,β en un marco de referencia rotatorio ortogonal, de componentes d,q.

Las ecuaciones que modelan a la transformada de Clarke, se describen a continuación:

$$\begin{bmatrix} \alpha \\ \beta \\ 0 \end{bmatrix} = [T_{\alpha,\beta,0}] \cdot \begin{bmatrix} a \\ b \\ c \end{bmatrix} \quad (21)$$

$$[T_{\alpha,\beta,0}] = \sqrt{\frac{2}{3}} \cdot \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad (22)$$

$$\begin{bmatrix} \alpha \\ \beta \\ 0 \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \cdot \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} a \\ b \\ c \end{bmatrix} \quad (23)$$

Las ecuaciones que modelan a la transformada de Park, se describen a continuación:

$$\begin{bmatrix} d \\ q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \omega t & \sen \omega t \\ -\sen \omega t & \cos \omega t \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \alpha \\ \beta \end{bmatrix} \quad (24)$$

De esta forma, se representa en (25), la ecuación para transformar el sistema trifásico a, b, c en un marco de referencia rotatorio ortogonal d, q, 0.

$$\begin{bmatrix} d \\ q \\ 0 \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \cdot \begin{bmatrix} \cos \theta & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ -\sen \theta & -\sen(\theta - \frac{2\pi}{3}) & -\sen(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} a \\ b \\ c \end{bmatrix} \quad (25)$$

Una vez definida la modelación para separar las componentes activa y no activa de la corriente, mediante la transformación al marco de referencia síncrono, en la Figura 8, se ilustra la estructura del bloque de control del APF. En donde se destaca que las señales de referencia útiles para establecer la modulación del inversor son V_d y V_q .

Con las señales de referencia determinadas, se procede a plantear la estrategia de modulación del inversor del APF.

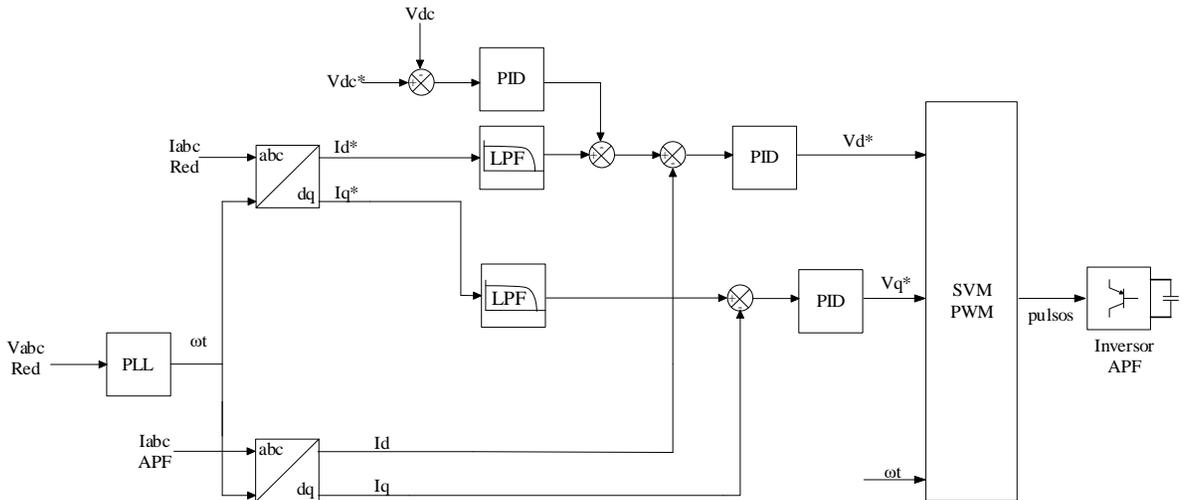


Figura 8. Estructura de control del APF [autor].

En este trabajo se aplicará la modulación vectorial o de vector espacial (SVM, por sus siglas en inglés).

La referencia de voltaje obtenida con el controlador modelado anteriormente, se encuentra en componentes dq, por ello, en primer lugar se debe transformar dicha referencia en componentes $\alpha\beta$ [48] mediante las ecuaciones (26) y (27).

$$V_\alpha = V_d \cos \theta - V_q \sin \theta \quad (26)$$

$$V_\beta = V_d \sin \theta + V_q \cos \theta \quad (27)$$

Luego se calcula el vector de referencia mediante la ecuación (28):

$$V_r = \sqrt{V_\alpha^2 + V_\beta^2} \quad (28)$$

Luego se determina el sector y se calcula los tiempos en los que se aplican los vectores espaciales, a través de las ecuaciones (29), (30) y (31).

$$t_0 = \Delta t - t_1 - t_2 \quad (29)$$

$$t_1 = \frac{V_r}{V_{DC}} \cdot T_s \cdot \sin\left(\frac{\pi}{3} - \theta_r\right) \quad (30)$$

$$t_2 = \frac{V_r}{V_{DC}} \cdot T_s \cdot \sin(\theta_r) \quad (31)$$

Finalmente se calculan los tiempos de accionamientos de cada uno de los transistores S1, S2 y S3, dependiendo del sector en el que se encuentra el vector de referencia [51], tal y como se muestra a continuación:

Sector 1:

$$\begin{aligned} S1 &= t_1 + t_2 + \frac{t_0}{2} \\ S2 &= t_2 + \frac{t_0}{2} \\ S3 &= \frac{t_0}{2} \end{aligned} \quad (32)$$

Sector 2:

$$\begin{aligned} S1 &= t_1 + \frac{t_0}{2} \\ S2 &= t_1 + t_2 + \frac{t_0}{2} \\ S3 &= \frac{t_0}{2} \end{aligned} \quad (33)$$

Sector 3:

$$\begin{aligned} S1 &= \frac{t_0}{2} \\ S2 &= t_1 + t_2 + \frac{t_0}{2} \\ S3 &= t_2 + \frac{t_0}{2} \end{aligned} \quad (34)$$

Sector 4:

$$\begin{aligned} S1 &= \frac{t_0}{2} \\ S2 &= t_1 + \frac{t_0}{2} \\ S3 &= t_1 + t_2 + \frac{t_0}{2} \end{aligned} \quad (35)$$

Sector 5:

$$\begin{aligned} S1 &= t_2 + \frac{t_0}{2} \\ S2 &= \frac{t_0}{2} \\ S3 &= t_1 + t_2 + \frac{t_0}{2} \end{aligned} \quad (36)$$

Sector 6:

$$\begin{aligned} S1 &= t_1 + t_2 + \frac{t_0}{2} \\ S2 &= \frac{t_0}{2} \\ S3 &= t_1 + \frac{t_0}{2} \end{aligned} \quad (37)$$

A continuación, se describen las variables utilizadas para la modelación del APF.

$V_{DC}(APF)$	Voltaje en los capacitores de APF.
ma	Amplitud de modulación.
V_s	Voltaje del sistema L-L RMS.
$L_f(APF)$	Inductancia de inyección del APF.
f_{sw}	Frecuencia de conmutación del inversor del APF.
i_{rz}	Rizado de corriente.
$C(APF)$	Capacitores del APF.
P_{out}	Potencia de salida del APF.
v_{rz}	Rizado de voltaje.
a, b, c	Sistema de coordenadas trifásico.
$\alpha, \beta, 0$	Marco de referencia estacionario ortogonal.
$T_{\alpha, \beta, 0}$	Contante de transformación de un sistema trifásico a,b,c a un marco de referencia ortogonal $\alpha, \beta, 0$.
$d, q, 0$	Marco de referencia rotatorio ortogonal.

ωt	Seguimiento de fase.
V_r	Vector de referencia en modulación SVM.
θ_r	Ángulo del Vector de referencia en modulación SVM.
S1	Tiempo de conmutación del transistor S1
S2	Tiempo de conmutación del transistor S2
S3	Tiempo de conmutación del transistor S3

4 Diseño e implementación del modelado

El presente trabajo tiene como objetivo implementar un APF para mejorar la calidad de energía, la cual se ve afectada cuando se integra generación fotovoltaica a los sistemas de distribución.

Para analizar los efectos de la implementación del APF en la red eléctrica, se realizará una simulación en MATLAB/SIMULINK, la cual se basa en las ecuaciones y algoritmos descritos en la sección 3.

A continuación, se exponen los parámetros diseñados para cada uno de los componentes pertenecientes al sistema, así como su implementación en MATLAB/SIMULINK:

4.1 Sistema de Distribución IEEE de 13 barras

El Sistema de Distribución IEEE 13 barras ha sido modificado para incluir solamente cargas monofásicas. Y se considera al nodo 634 como el punto de conexión de la generación fotovoltaica.

Dicho sistema se ilustra en la

Figura 9.

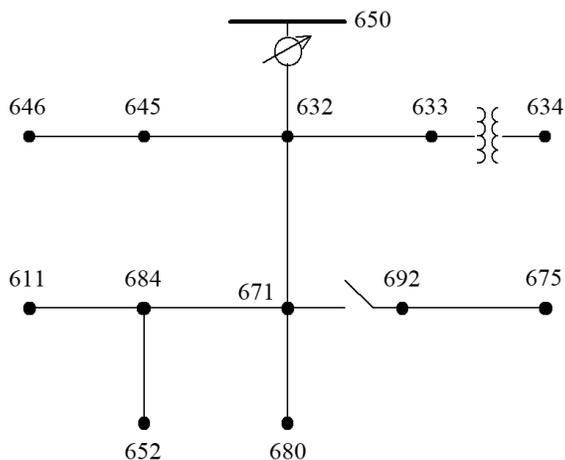


Figura 9. Sistema de distribución modificado IEEE 13 barras [autor].

Los datos del sistema de distribución IEEE de 13 barras se detallan en la siguiente tabla:

Tabla 2. Datos del sistema de distribución de 13 barras de la IEEE.

NODO	P (KW)	Q (KVAR)	NIVEL DE VOLTAJE L-L (RMS) (V)
650	-	-	4160
646	B: 170 C:125	B: 170 C:125	4160
645	A:170	A:125	4160
632	A: 8.5 B: 33 C:58.5	A:5 B:19 C:34	4160
633	-	-	4160
634	A: 120 B: 120 C:160	A: 90 B: 90 C:110	480
611	C:170	C:80	4160
684	A: 128	A: 86	4160
671	-	-	4160
692	-	-	4160
675	A: 485 B: 68 C:290	A: 190 B: 60 C:212	4160
652	-	-	4160
680	-	-	4160

4.2 Diseño y simulación del Sistema Fotovoltaico

Para el diseño del arreglo fotovoltaico, se consideró, en primer lugar, una potencia pico de 100 kW de acuerdo a las cargas planteadas para el sistema eléctrico descrito en la sección 4.1.

En base a lo descrito, se definió el panel a simular y el número de módulos fotovoltaicos serie y paralelo necesarios para poder proporcionar dicha potencia.

En la Tabla 3, se muestran los parámetros diseñados del arreglo fotovoltaico.

Tabla 3. Parámetros de diseño del arreglo fotovoltaico.

Modelo de módulo fotovoltaico	SunPower SPR-305E-WHT-D
# de módulos en serie	6
# de ramas en paralelo	55
Potencia pico (kW)	100.73
Voltaje de circuito abierto (V)	385.20
Corriente de cortocircuito (A)	327.8
Voltaje en máximo punto de potencia (V)	328.20
Corriente en máximo punto de potencia (A)	306.90

Para poder controlar la potencia que suministra el arreglo fotovoltaico, se consideró necesaria la implementación de un convertidor dc-dc, el cual fue diseñado en base a las ecuaciones (10), (11) y (12).

En la Tabla 4, se detallan los parámetros diseñados del convertidor dc-dc.

Tabla 4. Parámetros de diseño del convertidor elevador

V_{in} (V)	300
V_{out} (V)	600
P_{out} (kW)	100
f_{sw} (Hz)	5000
ΔV	1%
ΔI	5%
L (H)	$1.8e-3$
C (F)	$2777e-6$

La implementación y simulación del convertidor dc-dc, puede ser observada en la Figura 10.

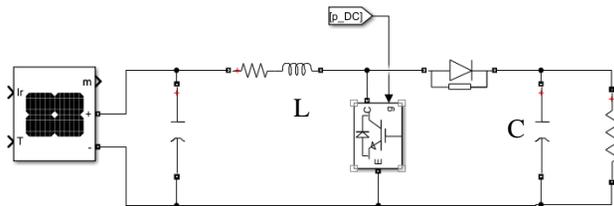


Figura 10. Diseño para implementación de convertidor dc-dc [autor].

Luego se diseñó una estrategia de control basada en el algoritmo MPPT descrito en la sección 3.2, con el propósito de generar un tren de pulsos del ciclo de trabajo, con el que se pueda controlar la conmutación del convertidor dc-dc.

4.3 Diseño y simulación del Inversor

Para integrar la generación fotovoltaica con la red eléctrica, es necesario transformar la energía eléctrica de corriente continua en corriente alterna, por lo que se implementó un inversor.

En este punto es importante mencionar que se planteó conectar la generación fotovoltaica en el nodo 634 del sistema IEEE, el cual tiene un nivel de voltaje de 480V.

Cabe recalcar que para hacer posible la integración de la generación fotovoltaica, es necesario un filtro RL, el cual fue

diseñado en base a las ecuaciones (16) y (17).

En la Tabla 5, se exponen los parámetros diseñados del Inversor.

Tabla 5. Parámetros de diseño del inversor

V_{in} (V)	600
V_{out} (V)	480
f_{sw} (Hz)	5000
f (Hz)	60
R_L (Ω)	$3.5e-3$
L (H)	$1430e-6$

Para el control del inversor se aplicó una modulación SPWM, utilizando controladores PID sintonizados automáticamente en MATLAB/SIMULINK. Las señales de referencia fueron calculadas a partir de las ecuaciones (13), (14) y (15).

4.4 Diseño y simulación del APF

El diseño del APF consiste básicamente en calcular el valor de la inductancia L_f APF y el valor del capacitor C APF. Dichos cálculos se realizaron en base a las ecuaciones (18), (19) y (20).

En la Tabla 6, se observan los parámetros diseñados del APF.

Tabla 6. Parámetros de diseño del APF.

V_S (V) – LL RMS	480
V_{DC} (V)	400
f_{sw} (Hz)	5000
P_{out} (kW)	100
v_{rz} (V)	2
i_{rz} (A)	1
L_f APF (H)	$11.3e-3$
C APF (F)	$1500e-6$

El control del APF se realizó en base a las ecuaciones y figura descritas en la sección 3.4.

En la Figura 8 planteada anteriormente se muestra la implementación de la estrategia de control del APF.

5 Análisis de resultados

El caso de estudio contempla dos escenarios, los cuales se describen a continuación:

- 1) La estructura de los componentes para el **Escenario 1** es: *Arreglo Fotovoltaico – Convertidor Elevador (DC-DC) – Inversor (DC-AC) – Conexión a Sistema de Distribución IEEE 13 barras.*

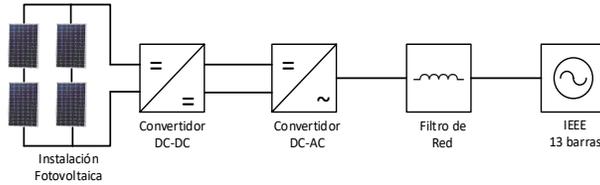


Figura 11. Esc 1 – Conexión de generación FV a sistema de distribución sin APF [autor].

- 2) Mientras que la estructura de los componentes para el **Escenario 2** es: *Arreglo Fotovoltaico – Convertidor Elevador (DC-DC) – Inversor (DC-AC) – Conexión a Sistema de Distribución IEEE 13 barras incluyendo Filtro Activo de Potencia (APF).*

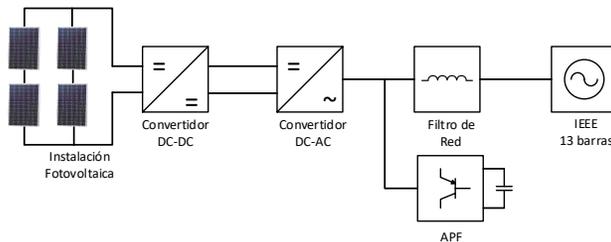


Figura 12. Esc 2 – Conexión de generación FV a sistema de distribución con APF [autor].

A continuación, se presentan los resultados obtenidos en las simulaciones del sistema propuesto. En primer lugar, se presenta un análisis del comportamiento de cada uno de los componentes del sistema, estos son: Arreglo Fotovoltaico, Convertidor Elevador, Inversor, APF.

Luego se concluye con una comparativa entre la simulación del Escenario 1 (sistema sin APF) y el Escenario 2 (sistema con APF).

Cabe destacar, como ya se mencionó en secciones anteriores, que la generación fotovoltaica se conectará al sistema de distribución en el nodo 634.

5.1 Comportamiento del Arreglo Fotovoltaico

El arreglo fotovoltaico diseñado considera la implementación de 55 ramales en paralelo de 6 módulos fotovoltaicos conectados en serie.

En la Figura 13, se muestra la curva I-V característica de los paneles fotovoltaicos, la cual representa el comportamiento del voltaje y corriente del arreglo fotovoltaico a una temperatura de 25 °C y una irradiancia de 1000 W/m². Esta curva está marcada por dos puntos importantes, el voltaje de circuito abierto que es aproximadamente 385.20 V y la corriente de cortocircuito que es aproximadamente 327.8 A. También se marca el punto de voltaje y corriente en donde se tiene la máxima potencia PMP.

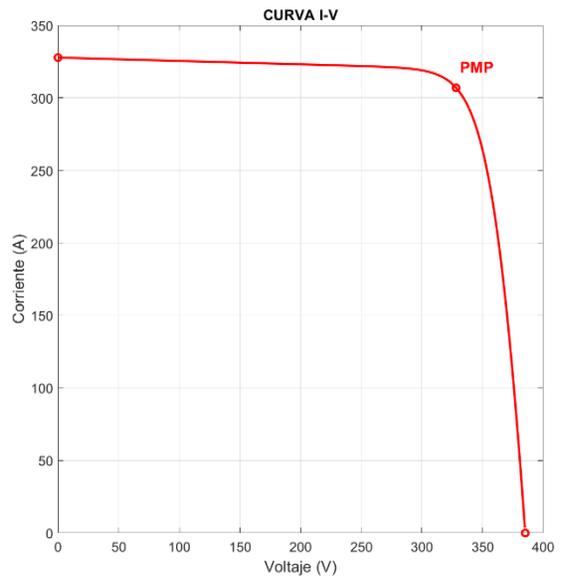


Figura 13. Curva I-V del arreglo fotovoltaico [autor].

En la Figura 14 se ilustra la curva P-V del arreglo fotovoltaico, la cual representa el comportamiento del voltaje y la potencia del arreglo fotovoltaico a una temperatura de 25 °C y una irradiancia de 1000 W/m². En esta curva destaca el punto de máxima potencia (PMP), en los que se tiene una potencia pico de 100 kW y un voltaje de 328.20 V.

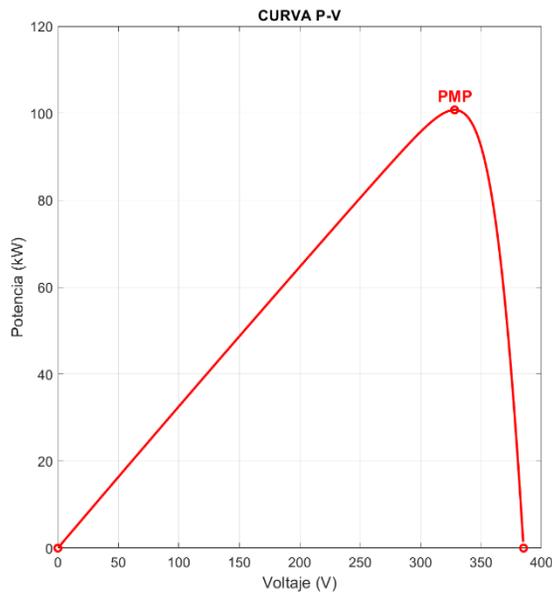


Figura 14. Curva P-V del arreglo fotovoltaico [autor].

5.2 Comportamiento del Convertidor Elevador

En este apartado se presenta el comportamiento del convertidor elevador. Se analizan las variables a la entrada y a la salida del mismo. En las Figura 15, Figura 16 y Figura 17 se muestra el voltaje, la corriente y la potencia proporcionada por los paneles fotovoltaicos respectivamente, las cuales son variables a la entrada del convertidor elevador. Se puede observar claramente la efectividad del algoritmo MPPT implementado, ya que cada una de estas variables alcanza rápidamente los valores deseados, correspondientes al punto de máxima potencia PMP.

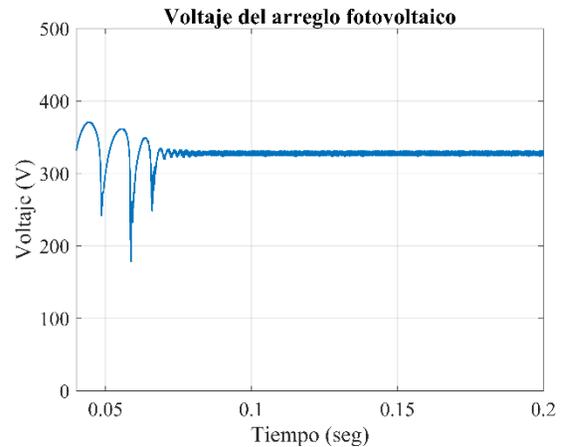


Figura 15. Voltaje a la salida del arreglo fotovoltaico [autor].

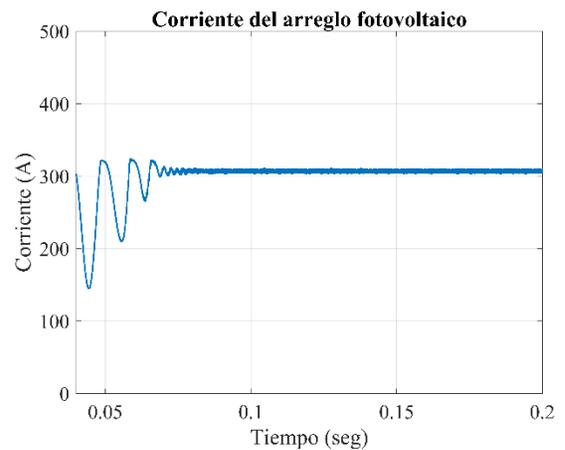


Figura 16. Corriente a la salida del arreglo fotovoltaico [autor].

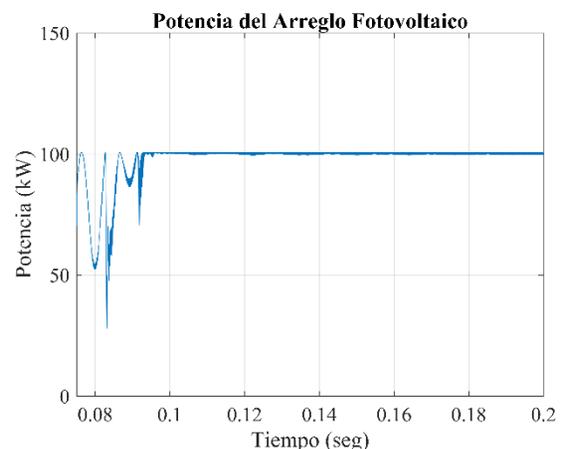


Figura 17. Potencia a la salida del arreglo fotovoltaico [autor].

En la Figura 18 se ilustra el voltaje que se tiene a la salida del convertidor, el cual

fue diseñado en 600 V. El voltaje a la salida del convertidor, como se puede observar presenta una buena respuesta transitoria, y rápida estabilización.

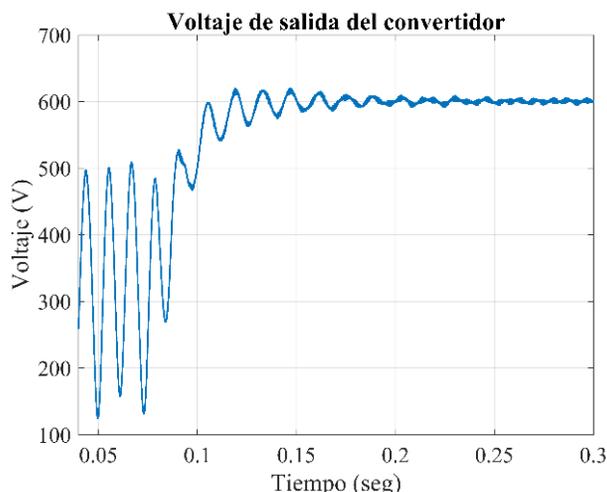


Figura 18. Voltaje a la salida del convertidor elevador [autor].

Mientras que en la Figura 19, se muestra el ciclo de trabajo del convertidor, con el que se obtiene un voltaje de salida de 600 V y se trabaja continuamente en el punto de máxima potencia. De igual manera presenta una buena respuesta transitoria, y se estabiliza rápidamente.

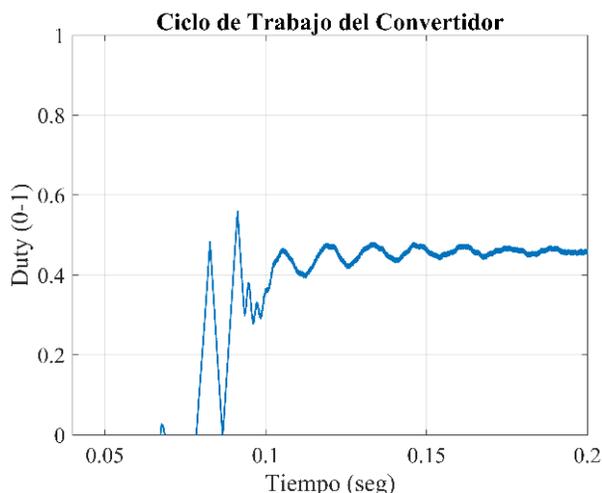


Figura 19. Ciclo de trabajo del convertidor elevador [autor].

5.3 Comportamiento del Inversor

Una vez comprobado el correcto funcionamiento de las etapas anteriores, se procede con la etapa de conversión de corriente continua a corriente alterna, mediante la implementación del inversor.

Se logra el voltaje deseado a la salida del inversor, que fue diseñado para tener un valor de 480 V L-L RMS, de tal manera que se disponga del mismo valor de voltaje que el nodo 634 del sistema de distribución de 13 barras de la IEEE, el cual fue considerado como punto de conexión entre la generación fotovoltaica y el sistema de distribución. En la Figura 20 se ilustra el voltaje en el nodo 634 del sistema IEEE de 13 barras en el que se observa que las distorsiones armónicas son mínimas (rizado) las cuales han sido provocadas por las conmutaciones de los elementos de la generación fotovoltaica.

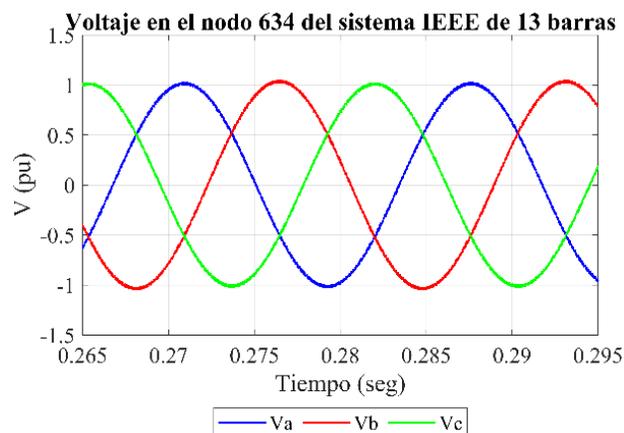


Figura 20. Voltaje en el nodo 634 del sistema de 13 barras IEEE con generación FV [autor].

En la Figura 21 se ilustra la corriente inyectada por el inversor en el sistema de distribución en el nodo 634. Se puede observar a priori que no existe un grado elevado de distorsión armónica, presuntamente porque ha sido filtrado por la inductancia de inyección a red.

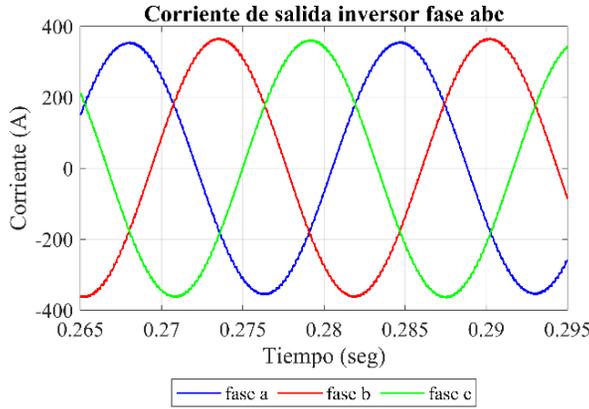


Figura 21. Corriente a inyectada por el inversor abc [autor].

5.4 Comportamiento del APF

Para garantizar la correcta operación del APF, se esperan dos situaciones. La primera es que el bloque de control sea capaz de seguir el voltaje DC establecido en los capacitores. La segunda situación implica que se haga un correcto filtrado de los armónicos de las componentes d y q de la corriente de inyección al sistema de distribución, de tal manera que la corriente que inyecte el APF sea capaz de compensar dichos armónicos.

En la Figura 22, se ilustra el voltaje en los capacitores del APF. Se observa que presenta una buena estabilidad transitoria y una respuesta rápida, lo cual implica que el bloque de control del APF tiene un comportamiento adecuado.

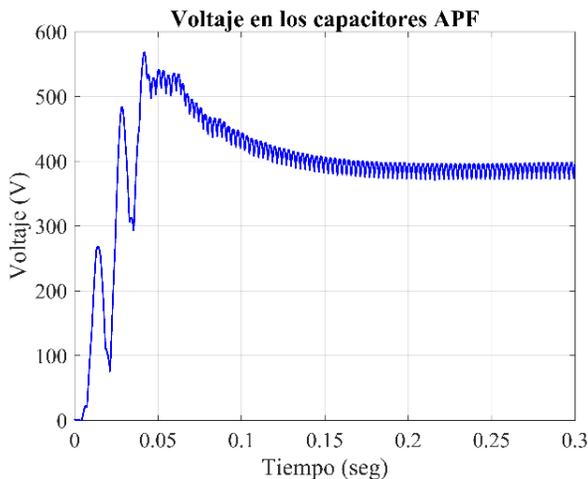


Figura 22. Voltaje medido en los capacitores del APF [autor].

En la Figura 23 se ilustra la corriente de compensación inyectada por el APF, para eliminar la componente armónica en la corriente inyectada hacia el sistema de distribución.

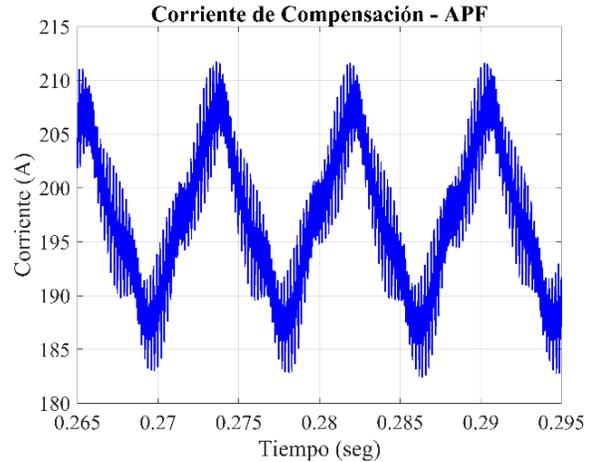


Figura 23. Corriente de compensación inyectada por al APF hacia el sistema [autor].

5.5 Comparativa entre el Escenario 1 y el Escenario 2

Mediante la comparativa de los resultados obtenidos en los Escenarios 1 y 2, se pretende determinar los beneficios de la implementación del APF, referente a la atenuación o eliminación de armónicos. Para ello se analiza lo que sucede en el voltaje del nodo 634 (punto de conexión) en el Escenario 1 (sin APF) y Escenario 2 (con APF)

En la Figura 24, Figura 25 y Figura 26 se ilustra una comparativa entre el voltaje tomado del nodo 634 del sistema de distribución de 13 barras de la IEEE, para el Escenario 1 y 2, de las fases a, b y c respectivamente.

Como se puede observar en cada una de estas figuras, con la implementación del APF, se tiene una reducción del contenido armónico en la onda de voltaje.

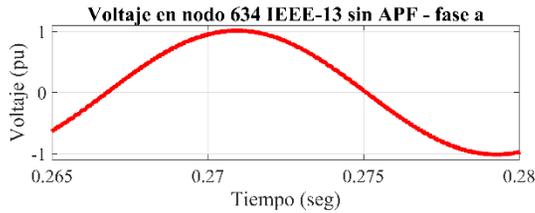
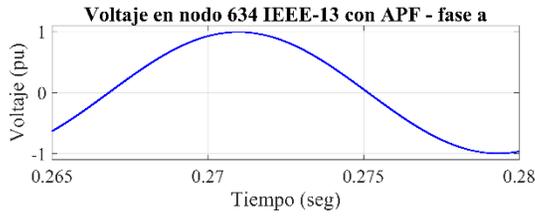


Figura 24. Comparativa de voltaje en nodo 634 con y sin APF para la fase a [autor].

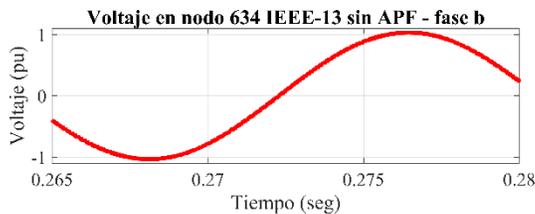
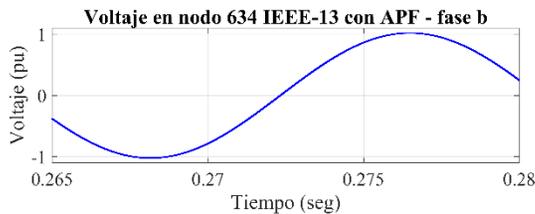


Figura 25. Comparativa de voltaje en nodo 634 con y sin APF para la fase b [autor].

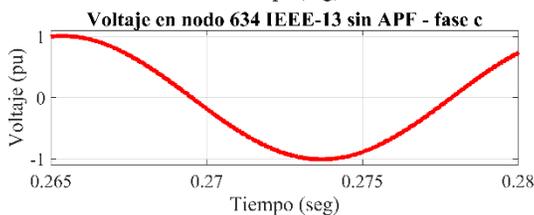
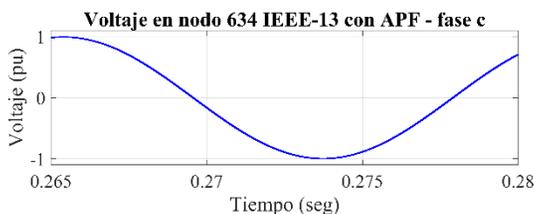


Figura 26. Comparativa de voltaje en nodo 634 con y sin APF para la fase c [autor].

La reducción del contenido armónico con la implementación del filtro también pudo ser observada en el cálculo del contenido armónico THD, tal cual como se ilustra en la Tabla 7 y en la Figura 27 y Figura 28. Tomado de la onda de voltaje del nodo 634 del sistema de distribución de 13 barras de la IEEE.

Tabla 7. Comparativa del THD para el Escenario 1 y el Escenario 2.

FASE	%THD SIN APF	%THD CON APF
a	7.23%	1.42%
b	5.62%	0.65%
c	4.85%	0.44%

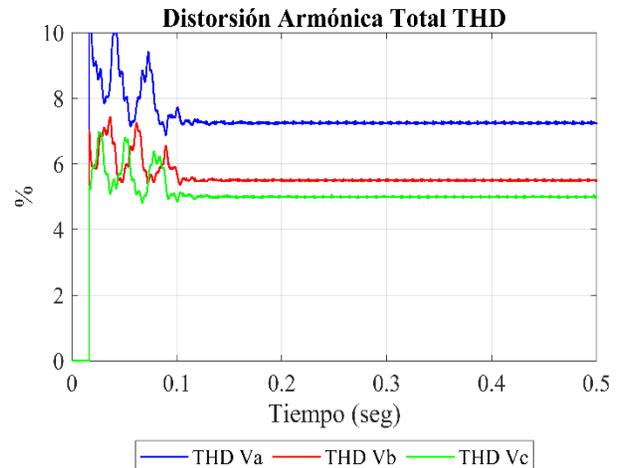


Figura 27. Índice de Distorsión Armónica Total – Voltaje en nodo 634 sin APF [autor].

La Figura 27 muestra la distorsión armónica del voltaje, en este contexto, durante un periodo de tiempo de aproximadamente 0.1 segundo se muestra oscilaciones de los THD en cada fase, lo cual se debe a que, durante este período de tiempo, el sistema en su conjunto debe estabilizarse, es decir que son producidos por el estado no estabilizado de operación del sistema, sean estos el convertidor e inversor del panel solar. Una vez estabilizado el sistema, se determinan los porcentajes de armónicos de forma clara como se ilustra en la figura antes citada.

La implementación del APF conlleva a que la distorsión armónica se atenúe significativamente, sin embargo, durante un período leve de tiempo de aproximadamente 0.2 segundos, se muestran oscilaciones de armónicos que son resultado del estado no estabilizado de operación del sistema, el cual es más significativo que el presentado en la Figura 27.

Este efecto se genera dado que, el sistema en su totalidad se ha incrementado ya que se ha incluido, a más del convertidor e inversor del panel solar, el inversor del filtro, el cual a su vez causa más armónicos y tarda un delta de tiempo adicional en estabilizarse, lo citado se muestra en la Figura 28.

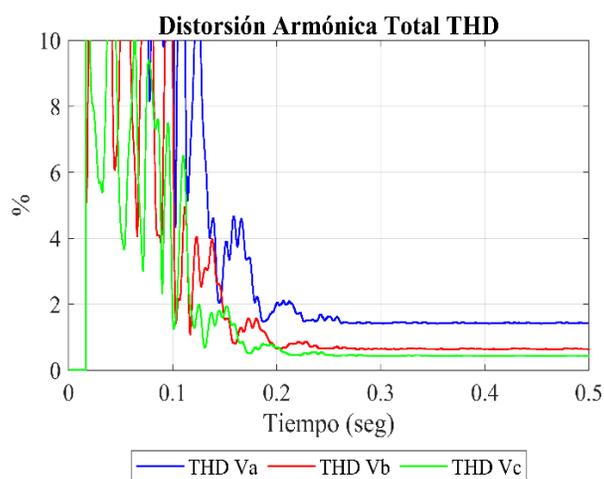


Figura 28. Índice de Distorsión Armónica Total – Voltaje en nodo 634 **con APF** [autor].

Finalmente, los periodos de tiempo donde existen oscilaciones de los armónicos con la implementación o no de APF, tiene relación directa con la carga de los capacitores y las resistencias del sistema.

Por tanto, en el caso de decidir reducir el período de oscilación inicial, conllevará a un diseño más detallado pero innecesario, dado que los deltas de tiempo, resultantes del diseño original,

son ínfimos con respecto a la operación del sistema en estado estable.

6 Conclusiones

Según lo expuesto y analizado en el presente documento, se exponen las siguientes conclusiones:

- En el presente trabajo se consideró utilizar una frecuencia de conmutación de 5 kHz lo cual ha brindado los resultados esperados. Como criterio de diseño y para implementaciones físicas, se sugiere utilizar frecuencias de conmutación superiores, con el fin de reducir el tamaño de los componentes y los dispositivos semiconductores.
- De las simulaciones realizadas se demostró el adecuado comportamiento del algoritmo MPPT implementado, el cual hace posible que el arreglo fotovoltaico opere siempre en el punto de máxima potencia, aportando al sistema de distribución una potencia de aproximadamente 100 kW.
- Las variables de entrada y salida del convertidor DC-DC presentaron un excelente comportamiento, estabilizándose de una manera rápida, alcanzando los valores establecidos en el diseño, los cuales son: voltaje del arreglo fotovoltaico – 328V, corriente del arreglo fotovoltaico – 307A, potencia del arreglo fotovoltaico – 100kW, voltaje DC a la salida del convertidor – 600V.
- De los resultados obtenidos, se concluye que el control del inversor es adecuado, ya que las variables de este alcanzaran los niveles establecidos de una manera rápida. Se obtuvo a la salida el voltaje en corriente alterna diseñado, el cual fue de 480V (L-L RMS).

- La implementación del APF, reduce efectivamente los armónicos provocados por la conmutación de los dispositivos semiconductores componentes de la generación fotovoltaica. Concretamente se obtuvo una reducción del índice de distorsión armónica THD, el cual para la fase a paso de 7.23% a 1.42%, para la fase b de 5.62% a 0.65% y finalmente para la fase c de 4.85% a 0.44%.
- Finalmente, se evidenció que, la inductancia de conexión a la red eléctrica, actúa también como un filtro de armónicos. Por este motivo en el punto de conexión (nodo 634 del sistema de distribución) incluso sin la implementación del APF presentaba un índice de distorsión armónica de voltaje no tan elevado.

6.1 Trabajos futuros

Dado lo descrito en el presente documento, se proponen como temáticas a ser desarrolladas a nivel investigativo, las siguientes:

- Implementación de filtro de potencia activa (APF) para mitigar los problemas de calidad de la energía en la integración de la red del sistema de conversión de energía eólica offshore.
- Determinación de topologías de inversores conectados a red multifuncionales multinivel y estrategias de control aplicables a sistemas fotovoltaicos.
- Definición de técnicas de control para inversores de fuente de voltaje trifásicos en microrredes autónomas.
- Diseño de convertidor multinivel de puente en H en cascada para generadores fotovoltaicos conectados a la red con seguimiento independiente del punto de máxima potencia de cada panel solar.

- Dimensionamiento y diseño de topologías de convertidores CC-CC aplicables para sistemas de energía con pila de combustible y supercondensadores.
- Optimización multiobjetivo y efecto de los factores económicos en el diseño del sistema híbrido de microrred.

7 Referencias

- [1] A. K. Basu, S. P. Chowdhury, S. Chowdhury, and S. Paul, “Microgrids: Energy management by strategic deployment of DERs—A comprehensive survey,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 15, no. 9, pp. 4348–4356, Dec. 2012, doi: 10.1016/J.RSER.2011.07.116.
- [2] M. Suresh, S. S. Patnaik, Y. Suresh, and A. K. Panda, “Comparison of two compensation control strategies for shunt active power filter in three-phase four-wire system,” in *ISGT 2013*, 2011, pp. 1–6, doi: 10.1109/ISGT.2011.5759126.
- [3] F. G. Montoya, A. García-Cruz, M. G. Montoya, and F. Manzano-Agugliaro, “Power quality techniques research worldwide: A review,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 54, pp. 846–856, Feb. 2016, doi: 10.1016/J.RSER.2015.10.091.
- [4] A. M. Omer, “Energy, environment and sustainable development,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 12, no. 9, pp. 2265–2300, Dec. 2011.
- [5] S. Lineykin, M. Averbukh, and A. Kuperman, “An improved approach to extract the single-diode equivalent circuit parameters of a photovoltaic cell/panel,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol.

- 30, pp. 282–289, Feb. 2014, doi: 10.1016/J.RSER.2013.10.015.
- [6] A. Bouhouta, S. Moulahoum, N. Kabache, and A. Benyamina, “Design and Real Time Implementation of Three Phase Shunt Active Power Filter Using Indirect Current Control Technique,” 2019, doi: 10.1109/ICAEE47123.2019.9015096.
- [7] X. Shen *et al.*, “Improvement of power quality in EAST power supply system based on hybrid active filter,” *Fusion Eng. Des.*, vol. 161, p. 112076, Dec. 2020, doi: 10.1016/J.FUSENGDES.2020.112076.
- [8] Hang Yu and Songyan Niu, “A scalable and reconfigurable hybrid AC/DC microgrid clustering architecture with decentralized control for coordinated operation - ScienceDirect,” 2021. <https://bibliotecas.ups.edu.ec:2230/science/article/pii/S0142061521007158> (accessed Dec. 22, 2021).
- [9] K. Ishaque and Z. Salam, “A review of maximum power point tracking techniques of PV system for uniform insolation and partial shading condition,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 19, pp. 475–488, Mar. 2013, doi: 10.1016/J.RSER.2012.11.032.
- [10] S. Echalih, A. Abouloifa, I. Lachkar, J. M. Guerrero, Z. Hekss, and F. Giri, “Hybrid automaton-fuzzy control of single phase dual buck half bridge shunt active power filter for shoot through elimination and power quality improvement,” *Int. J. Electr. Power Energy Syst.*, vol. 131, p. 106986, Oct. 2021, doi: 10.1016/J.IJEPES.2021.106986.
- [11] F. D. Bianchi, J. L. Domínguez-García, and O. Gomis-Bellmunt, “Control of multi-terminal HVDC networks towards wind power integration: A review,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 55, pp. 1055–1068, Mar. 2016, doi: 10.1016/J.RSER.2015.11.024.
- [12] R. Ortega, E. Figueres, G. Garcerá, C. L. Trujillo, and D. Velasco, “Control techniques for reduction of the total harmonic distortion in voltage applied to a single-phase inverter with nonlinear loads: Review,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 16, no. 3, pp. 1754–1761, Apr. 2012, doi: 10.1016/J.RSER.2011.11.027.
- [13] O. Palizban, K. Kauhaniemi, and J. M. Guerrero, “Microgrids in active network management – part II: System operation, power quality and protection,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 36, pp. 440–451, Aug. 2014, doi: 10.1016/J.RSER.2014.04.048.
- [14] Z. Hekss *et al.*, “Hybrid Automaton Control of Three Phase Reduced Switch Shunt Active Power Filter Connected Photovoltaic System,” *IFAC-PapersOnLine*, vol. 53, no. 2, pp. 12847–12852, Jan. 2020, doi: 10.1016/J.IFACOL.2020.12.1986.
- [15] K. Ravinder and H. O. Bansal, “Investigations on shunt active power filter in a PV-wind-FC based hybrid renewable energy system to improve power quality using hardware-in-the-loop testing platform,” *Electr. Power Syst. Res.*, vol. 177, p. 105957, Dec. 2019, doi: 10.1016/J.EPSR.2019.105957.
- [16] J. Yu, S. Ding, Y. Wang, W. Wu, and M. Dong, “The engineering design and optimization of main

- circuit for hybrid active power filter,” *Int. J. Electr. Power Energy Syst.*, vol. 46, no. 1, pp. 40–48, Mar. 2013, doi: 10.1016/J.IJEPES.2012.10.037.
- [17] E. Andrade, J. Granjal, J. P. Vilela, and C. Arantes, “A Security Gateway for power distribution systems in open networks,” *Comput. Secur.*, vol. 111, p. 102492, 2021, doi: 10.1016/j.cose.2021.102492.
- [18] S. Bai, “Analysis of the Influence of Distributed Generation Access On the Operation and Management of Distribution Network,” *Proc. 2018 IEEE 4th Inf. Technol. Mechatronics Eng. Conf. ITOEC 2018*, pp. 1477–1480, 2018, doi: 10.1109/ITOEC.2018.8740522.
- [19] K. Prakash, F. R. Islam, K. A. Mamun, and S. Ali, “Optimal generators placement techniques in distribution networks: A review,” *2017 Australas. Univ. Power Eng. Conf. AUPEC 2017*, vol. 2017-Novem, no. 1, pp. 1–6, 2018, doi: 10.1109/AUPEC.2017.8282381.
- [20] S. Vargas and W. Pavón, *Óptimo Dimensionamiento y Ubicación de Generación Fotovoltaica en una Microred Georeferenciada Utilizando Generación de Columnas*, vol. 17, no. 1. 2020.
- [21] ARCONEL, *Regulación Nro. ARCONEL 001/20 - Distribución y comercialización de energía eléctrica*. 2020, pp. 1–58.
- [22] F. Vaca and D. Jaramillo, “Minimización de thd en redes de distribución eléctrica mediante implementación de control en espacio vectorial en inversores de potencia,” pp. 2–5, 2021.
- [23] N. Rashid and A. Laphorn, “Evaluation and Optimization of Network Capacity Utilization for Electric Distribution,” *IEEE Trans. Power Syst.*, 2016.
- [24] S. Messalti, A. G. Harrag, and A. E. Loukriz, “A new neural networks MPPT controller for PV systems,” May 2015, doi: 10.1109/IREC.2015.7110907.
- [25] K. E. Lonergan and G. Sansavini, “Business structure of electricity distribution system operator and effect on solar photovoltaic uptake : An empirical case study for Switzerland,” *Energy Policy*, vol. 160, p. 112683, 2022, doi: 10.1016/j.enpol.2021.112683.
- [26] L. Álvarez, L. Neves, J. López, and S. Zambrano, “Impacto de la generación distribuida en la red de distribución,” *J. Electr. Comput. Eng.*, pp. 259–271, 2017.
- [27] M. Arabahmadi, M. Banejad, and A. Dastfan, “Hybrid compensation method for traction power quality compensators in electrified railway power supply system,” *Glob. Energy Interconnect.*, vol. 4, no. 2, pp. 158–168, 2021, doi: 10.1016/j.gloei.2021.05.008.
- [28] A. Seguel, “Diseño e Implementación de un Filtro Híbrido para la Atenuación de Sub e Inter Armónicas en Cicloconvertidores,” *Tesis*, p. 108, 2018.
- [29] M. Bajaj and A. K. Singh, “Optimal design of passive power filter for enhancing the harmonic-constrained hosting capacity of renewable DG systems,” *Comput. Electr. Eng.*, vol. 97, no. December 2020, p. 107646, 2022, doi: 10.1016/j.compeleceng.2021.107646.
- [30] H. M. J. De Silva and M. Shafieipour, “An improved passivity enforcement algorithm for transmission line models using

- passive filters,” *Electr. Power Syst. Res.*, vol. 196, no. February, p. 107255, 2021, doi: 10.1016/j.epsr.2021.107255.
- [31] F. C. Veliz, S. L. Varricchio, and C. D. O. Costa, “International Journal of Electrical Power and Energy Systems Determination of harmonic contributions using active filter: Theoretical and experimental results,” *Int. J. Electr. Power Energy Syst.*, vol. 137, no. July 2021, p. 107664, 2022, doi: 10.1016/j.ijepes.2021.107664.
- [32] J. Morales and W. Pavón, “Comparación de metodologías cruz y pq para el control de filtro activo, para disminuir armónicos en un sistema de distribución eléctrico ante un escenario de carga no lineal desbalanceada,” 2021.
- [33] M. Büyük, A. Tan, and M. Tümay, “Resonance suppression of LCL filter for shunt active power filter via active damper,” *Int. J. Electr. Power Energy Syst.*, vol. 134, no. July 2021, p. 107389, 2022, doi: 10.1016/j.ijepes.2021.107389.
- [34] A. Tamer, L. Zellouma, and M. Toufik, “Adaptive linear neuron control of three-phase shunt active power filter with anti-windup PI controller optimized by particle swarm optimization,” *Comput. Electr. Eng.*, vol. 96, no. PA, p. 107471, 2021, doi: 10.1016/j.compeleceng.2021.107471.
- [35] M. Golla, K. Chandrasekaran, and S. P. Simon, “Energy for Sustainable Development PV integrated universal active power filter for power quality enhancement and effective power management,” *Energy Sustain. Dev.*, vol. 61, pp. 104–117, 2021, doi: 10.1016/j.esd.2021.01.005.
- [36] M. P. Kazmierkowski and L. Malesani, “Current control techniques for three-phase voltage-source PWM converters: A survey,” *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 45, no. 5, pp. 691–703, 2013.
- [37] X. Song, Y. Wang, Z. Zhang, C. Shen, and F. Peña-mora, “Economic-environmental equilibrium-based bi-level dispatch strategy towards integrated electricity and natural gas systems,” *Appl. Energy*, vol. 281, no. October 2020, p. 116142, 2021, doi: 10.1016/j.apenergy.2020.116142.
- [38] A. M. Trzynadlowski, R. L. Kirlin, and S. F. Legowski, “Space vector PWM technique with minimum switching losses and a variable pulse rate,” *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 48, no. 4, pp. 173–181, 2017.
- [39] B. Sahoo, S. Keshari, and P. Kumar, “Repetitive control and cascaded multilevel inverter with integrated hybrid active filter capability for wind energy conversion system,” *Eng. Sci. Technol. an Int. J.*, vol. 22, no. 3, pp. 811–826, 2019, doi: 10.1016/j.jestch.2019.01.001.
- [40] A. Zielińska, M. Skowron, and A. Bień, “Modelling of photovoltaic cells in variable conditions of temperature and intensity of solar insolation as a method of mapping the operation of the installation in real conditions,” in *2018 International Interdisciplinary PhD Workshop, IIPHDW 2018*, Jun. 2018, pp. 200–204, doi: 10.1109/IIPHDW.2018.8388357.
- [41] R. Godina, E. M. G. Rodrigues, E. Pouresmaeil, and J. P. S. Catalão,

- “Simulation study of a photovoltaic cell with increasing levels of model complexity,” Jul. 2017, doi: 10.1109/EEEIC.2017.7977768.
- [42] P. Sahu, D. Verma, and S. Nema, “Physical design and modelling of boost converter for maximum power point tracking in solar PV systems,” in *International Conference on Electrical Power and Energy Systems, ICEPES 2016*, May 2017, pp. 10–15, doi: 10.1109/ICEPES.2016.7915898.
- [43] IEEE-Tunisia, *SSD 2017: 2017 14th International Multi-Conference on Systems, Signals & Devices (SSD)*. 2017.
- [44] A. Singh and S. S.L, *MATLAB / SIMULINK Simulation of PV System based on MPPT in Variable Irradiance with EV Battery as Load*. 2017.
- [45] L. Yang *et al.*, “A new theory of reactive power control of grid connected PV inverter,” in *Proceedings - 2015 International Conference on Intelligent Transportation, Big Data and Smart City, ICITBS 2015*, Jan. 2016, pp. 35–38, doi: 10.1109/ICITBS.2015.15.
- [46] Y. Chen, J. Liu, J. Zhou, and J. Li, “Research on the control strategy of PV grid-connected inverter upon grid fault,” in *2013 International Conference on Electrical Machines and Systems, ICEMS 2013*, 2013, pp. 2163–2167, doi: 10.1109/ICEMS.2013.6713201.
- [47] D. Atkar, P. S. Udakhe, S. Chiriki, and V. B. Borghate, “Control of seven level cascaded H-bridge inverter by hybrid SPWM technique,” in *IEEE International Conference on Power Electronics, Drives and Energy Systems, PEDES 2016*, Apr. 2017, vol. 2016-January, pp. 1–6, doi: 10.1109/PEDES.2016.7914435.
- [48] M. Marcu, F. G. Popescu, T. Niculescu, L. Pana, and A. D. Handra, “Simulation of power active filter using instantaneous reactive power theory,” in *Proceedings of International Conference on Harmonics and Quality of Power, ICHQP, 2014*, pp. 581–585, doi: 10.1109/ICHQP.2014.6842783.
- [49] H. Yuan and X. Jiang, “A simple active damping method for Active Power Filters,” in *Conference Proceedings - IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition - APEC*, May 2016, vol. 2016-May, pp. 907–912, doi: 10.1109/APEC.2016.7467979.
- [50] B. Kedra, “Comparison of an active and hybrid power filter devices,” in *Proceedings of International Conference on Harmonics and Quality of Power, ICHQP, 2014*, pp. 556–560, doi: 10.1109/ICHQP.2014.6842771.
- [51] A. Panda, G. Dyanamina, and R. K. Singh, “MATLAB Simulation of Space Vector Pulse Width Modulation for 3-level NPC Inverter and 2-level Inverter,” Jan. 2021, doi: 10.1109/SeFet48154.2021.9375668.

7.1 Matriz de Estado del Arte

Tabla 8. Matriz de estado del arte

DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DEL FILTRO ACTIVO DE POTENCIA (APF) HÍBRIDO EN EL SISTEMA DE DISTRIBUCIÓN ELÉCTRICA PARA MEJORAR EL PERFIL DE TENSIÓN MODULADO POR VECTOR ESPACIAL CON GENERACIÓN FOTOVOLTAICA																								
ITEM	AÑO	TÍTULO DEL ARTÍCULO	CITAS	TEMÁTICA				FORMULACION DEL PROBLEMA				RESTRICCIONES DEL PROBLEMA			ALGORITMO DE RESOLUCIÓN			SOLUCIÓN PROPUESTA						
				Implementación de filtros activos de potencia híbridos	Modulación del perfil de voltaje	Calidad de Energía	Modelación y simulación de sistemas desbalanceado	Instalación fotovoltaica	Convertidores AC/DC o DC/DC	Filtro activo de potencia	Aplicación de la modulación de voltaje mediante la técnica del vector espacial	Simulación de modelo	Evaluación de la operación en relación a la calidad de energía	Arreglo fotovoltaico	Convertidor elevador	Inversor	Registro de medidas de parámetros eléctricos voltaje y corriente a la salida del arreglo	Cálculo de los parámetros ajustados	Validación de los parámetros de diseño	Análisis de resultados de las variables de salida del convertidor	Diseño e implementación del filtro activo de potencia híbrido	Validación de los parámetros asociados a la calidad de energía	Determinación del arreglo fotovoltaico	Diseño e implementación del inversor
1	2012	Microgrids: Energy management by strategic deployment of DERs—A comprehensive survey	203			☒																		
2	2013	Comparison of two compensation control strategies for shunt active power filter in three-phase four-wire system	57	☒				☒		☒											☒		☒	
3	2016	Power quality techniques research worldwide: A review	56										☒										☒	
4	2011	Energy, environment and sustainable development	1633										☒											
5	2014	An improved approach to extract the single-diode equivalent circuit parameters of a photovoltaic cell/panel	144	☒		☒		☒		☒					☒	☒							☒	
6	2019	Design and Real Time Implementation of Three Phase Shunt Active Power Filter Using Indirect Current Control Technique	2		☒							☒										☒		
7	2020	Improvement of power quality in EAST power supply system based on hybrid active filter	4						☒				☒									☒		
8	2022	A scalable and reconfigurable hybrid AC/DC microgrid clustering architecture with decentralized control for coordinated operation	0										☒									☒		☒

DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DEL FILTRO ACTIVO DE POTENCIA (APF) HÍBRIDO EN EL SISTEMA DE DISTRIBUCIÓN ELÉCTRICA PARA MEJORAR EL PERFIL DE TENSIÓN MODULADO POR VECTOR ESPACIAL CON GENERACIÓN FOTOVOLTAICA

ITEM	AÑO	TÍTULO DEL ARTÍCULO	CITAS	TEMÁTICA					FORMULACION DEL PROBLEMA			RESTRICCIONES DEL PROBLEMA			ALGORITMO DE RESOLUCIÓN			SOLUCIÓN PROPUESTA					
				Implementación de filtros activos de potencia híbridos	Modulación del perfil de voltaje	Calidad de Energía	Modulación y simulación de sistemas desbalanceado	Instalación fotovoltaica	Convertidores AC/DC o DC/DC	Filtro activo de potencia	Aplicación de la modulación de voltaje mediante la técnica del vector espacial	Simulación de modelo	Evaluación de la operación en relación a la calidad de energía	Arreglo fotovoltaico	Convertidor elevador	Inversor	Registro de medidas de parámetros eléctricos voltaje y corriente a la salida del arreglo	Cálculo de los parámetros ajustados	Validación de los parámetros de diseño	Análisis de resultados de las variables de salida del convertidor	Diseño e implementación del filtro activo de potencia híbrido	Validación de los parámetros asociados a la calidad de energía	Determinación del arreglo fotovoltaico
10	2021	Hybrid automaton-fuzzy control of single phase dual buck half bridge shunt active power filter for shoot through elimination and power quality improvement	3	☒		☒				☒				☒					☒				☒
11	2016	Control of multi-terminal HVDC networks towards wind power integration: A review	65	☒	☒					☒	☒					☒							
12	2012	Control techniques for reduction of the total harmonic distortion in voltage applied to a single-phase inverter with nonlinear loads: Review	40										☒			☒							☒
13	2014	Microgrids in active network management – part II: System operation, power quality and protection	115		☒			☒			☒								☒				
14	2020	Hybrid Automaton Control of Three Phase Reduced Switch Shunt Active Power Filter Connected Photovoltaic System	2	☒			☒			☒			☒			☒				☒			
15	2019	Investigations on shunt active power filter in a PV-wind-FC based hybrid renewable energy system to improve power quality using hardware-in-the-loop testing platform	24	☒	☒					☒			☒									☒	
16	2013	The engineering design and optimization of main circuit for hybrid active power filter	8	☒				☒		☒	☒					☒				☒			
17	2021	A Security Gateway for power distribution systems in open networks	0									☒											
18	2016	Analysis of the Influence of Distributed Generation Access On the Operation and Management of Distribution Network	10																				

DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DEL FILTRO ACTIVO DE POTENCIA (APF) HÍBRIDO EN EL SISTEMA DE DISTRIBUCIÓN ELÉCTRICA PARA MEJORAR EL PERFIL DE TENSIÓN MODULADO POR VECTOR ESPACIAL CON GENERACIÓN FOTOVOLTAICA

ITEM	AÑO	TÍTULO DEL ARTÍCULO	CITAS	TEMÁTICA				FORMULACION DEL PROBLEMA			RESTRICCIONES DEL PROBLEMA			ALGORITMO DE RESOLUCIÓN			SOLUCIÓN PROPUESTA						
				Implementación de filtros activos de potencia híbridos	Modulación del perfil de voltaje	Calidad de Energía	Modelación y simulación de sistemas desbalanceado	Instalación fotovoltaica	Convertidores AC/DC o DC/DC	Filtro activo de potencia	Aplicación de la modulación de voltaje mediante la técnica del vector espacial	Simulación de modelo	Evaluación de la operación en relación a la calidad de energía	Arreglo fotovoltaico	Convertidor elevador	Inversor	Registro de medidas de parámetros eléctricos voltaje y corriente a la salida del arreglo	Cálculo de los parámetros ajustados	Validación de los parámetros de diseño	Análisis de resultados de las variables de salida del convertidor	Diseño e implementación del filtro activo de potencia híbrido	Validación de los parámetros asociados a la calidad de energía	Determinación del arreglo fotovoltaico
19	2017	Optimal generators placement techniques in distribution networks: A review	7		☒			☒															
20	2020	Óptimo Dimensionamiento y Ubicación de Generación Fotovoltaica en una Microred Georeferenciada Utilizando Generación de Columnas	2								☒				☒		☒						
21	2021	Minimización de thd en redes de distribución eléctrica mediante implementación de control en espacio vectorial en inversores de potencia	0	☒		☒			☒	☒									☒	☒		☒	
22	2016	Evaluation and Optimization of Network Capacity Utilization for Electric Distribution	158										☒										
23	2015	A new neural networks MPPT controller for PV systems," May 2015, doi:	104					☒						☒								☒	
24	2020	Business structure of electricity distribution system operator and effect on solar photovoltaic uptake : An empirical case study for Switzerland	0		☒																		
25	2017	Impacto de la generación distribuida en la red de distribución	3			☒		☒					☒										☒
26	2021	Hybrid compensation method for traction power quality compensators in electrified railway power supply system	0				☒										☒		☒		☒		
27	2018	Diseño e Implementación de un Filtro Híbrido para la Atenuación de Sub e Inter Armónicas en Cicloconvertidores	0	☒						☒				☒					☒				

DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DEL FILTRO ACTIVO DE POTENCIA (APF) HÍBRIDO EN EL SISTEMA DE DISTRIBUCIÓN ELÉCTRICA PARA MEJORAR EL PERFIL DE TENSIÓN MODULADO POR VECTOR ESPACIAL CON GENERACIÓN FOTOVOLTAICA

ITEM	AÑO	TÍTULO DEL ARTÍCULO	CITAS	TEMÁTICA				FORMULACION DEL PROBLEMA			RESTRICCIONES DEL PROBLEMA			ALGORITMO DE RESOLUCIÓN			SOLUCIÓN PROPUESTA						
				Implementación de filtros activos de potencia híbridos	Modulación del perfil de voltaje	Calidad de Energía	Modelación y simulación de sistemas desbalanceado	Instalación fotovoltaica	Convertidores AC/DC o DC/DC	Filtro activo de potencia	Aplicación de la modelación de voltaje mediante la técnica del vector espacial	Simulación de modelo	Evaluación de la operación en relación a la calidad de energía	Arreglo fotovoltaico	Convertidor elevador	Inversor	Registro de medidas de parámetros eléctricos voltaje y corriente a la salida del arreglo	Cálculo de los parámetros ajustados	Validación de los parámetros de diseño	Análisis de resultados de las variables de salida del convertidor	Diseño e implementación del filtro activo de potencia híbrido	Validación de los parámetros asociados a la calidad de energía	Determinación del arreglo fotovoltaico
28	2022	Optimal design of passive power filter for enhancing the harmonic-constrained hosting capacity of renewable DG systems	0	☒				☒		☒					☒			☒					
29	2021	An improved passivity enforcement algorithm for transmission line models using passive filters	0	☒	☒		☒			☒												☒	
30	2021	International Journal of Electrical Power and Energy Systems Determination of harmonic contributions using active filter : Theoretical and experimental results	2					☒	☒														
31	2021	Comparación de metodologías cruz y pq para el control de filtro activo, para disminuir armónicos en un sistema de distribución eléctrico ante un escenario de carga no lineal desbalanceada	0						☒			☒				☒			☒				
32	2021	Resonance suppression of LCL filter for shunt active power filter via active damper	0	☒						☒	☒		☒										
33	2021	Adaptive linear neuron control of three-phase shunt active power filter with anti-windup PI controller optimized by particle swarm optimization	0	☒			☒			☒				☒					☒				
34	2021	Energy for Sustainable Development PV integrated universal active power filter for power quality enhancement and effective power management	2	☒						☒			☒								☒		
35	2013	Current control techniques for three-phase voltage-source PWM converters: A survey	10																☒				☒
36	2021	Economic-environmental equilibrium-based bi-level dispatch strategy towards integrated electricity and natural gas systems	3								☒					☒							

DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DEL FILTRO ACTIVO DE POTENCIA (APF) HÍBRIDO EN EL SISTEMA DE DISTRIBUCIÓN ELÉCTRICA PARA MEJORAR EL PERFIL DE TENSIÓN MODULADO POR VECTOR ESPACIAL CON GENERACIÓN FOTOVOLTAICA

ITEM	AÑO	TÍTULO DEL ARTÍCULO	CITAS	TEMÁTICA				FORMULACION DEL PROBLEMA				RESTRICCIONES DEL PROBLEMA			ALGORITMO DE RESOLUCIÓN			SOLUCIÓN PROPUESTA					
				Implementación de filtros activos de potencia híbridos	Modulación del perfil de voltaje	Calidad de Energía	Modulación y simulación de sistemas desbalanceado	Instalación fotovoltaica	Convertidores AC/DC o DC/DC	Filtro activo de potencia	Aplicación de la modulación de voltaje mediante la técnica del vector espacial	Simulación de modelo	Evaluación de la operación en relación a la calidad de energía	Arreglo fotovoltaico	Convertidor elevador	Inversor	Registro de medidas de parámetros eléctricos voltaje y corriente a la salida del arreglo	Cálculo de los parámetros ajustados	Validación de los parámetros de diseño	Análisis de resultados de las variables de salida del convertidor	Diseño e implementación del filtro activo de potencia híbrido	Validación de los parámetros asociados a la calidad de energía	Determinación del arreglo fotovoltaico
37	2017	Space vector PWM technique with minimum switching losses and a variable pulse rate	122				☒							☒									
38	2019	Repetitive control and cascaded multilevel inverter with integrated hybrid active filter capability for wind energy conversion system	32	☒						☒			☒				☒		☒				☒
39	2018	Modelling of photovoltaic cells in variable conditions of temperature and intensity of solar insolation as a method of mapping the operation of the installation in real conditions	5													☒						☒	
40	2017	Simulation study of a photovoltaic cell with increasing levels of model complexity	4			☒						☒			☒	☒							
41	2016	Physical design and modelling of boost converter for maximum power point tracking in solar PV systems	35									☒										☒	
42	2017	SSD 2017 : 2017 14th International Multi-Conference on Systems, Signals & Devices (SSD)	3																		☒		
43	2017	MATLAB / SIMULINK Simulation of PV System based on MPPT in Variable Irradiance with EV Battery as Load	7														☒		☒			☒	
44	2015	A new theory of reactive power control of grid connected PV inverter	10							☒			☒								☒		☒
45	2013	Research on the control strategy of PV grid-connected inverter upon grid fault	18	☒		☒					☒			☒									
46	2016	Control of seven level cascaded H-bridge inverter by hybrid SPWM technique	12							☒		☒				☒	☒						☒

DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DEL FILTRO ACTIVO DE POTENCIA (APF) HÍBRIDO EN EL SISTEMA DE DISTRIBUCIÓN ELÉCTRICA PARA MEJORAR EL PERFIL DE TENSIÓN MODULADO POR VECTOR ESPACIAL CON GENERACIÓN FOTOVOLTAICA

ITEM	DATOS		TEMÁTICA				FORMULACION DEL PROBLEMA			RESTRICCIONES DEL PROBLEMA			ALGORITMO DE RESOLUCIÓN			SOLUCIÓN PROPUESTA									
	AÑO	TÍTULO DEL ARTÍCULO	CITAS	Implementación de filtros activos de potencia híbridos	Modulación del perfil de voltaje	Calidad de Energía	Modelación y simulación de sistemas desbalanceado	Instalación fotovoltaica	Convertidores AC/DC o DC/DC	Filtro activo de potencia	Aplicación de la modelación de voltaje mediante la técnica del vector espacial	Simulación de modelo	Evaluación de la operación en relación a la calidad de energía	Arreglo fotovoltaico	Convertidor elevador	Inversor	Registro de medidas de parámetros eléctricos voltaje y corriente a la salida del arreglo	Cálculo de los parámetros ajustados	Validación de los parámetros de diseño	Análisis de resultados de las variables de salida del convertidor	Diseño e implementación del filtro activo de potencia híbrido	Validación de los parámetros asociados a la calidad de energía	Determinación del arreglo fotovoltaico	Diseño e implementación del inversor	
47	2014	Simulation of power active filter using instantaneous reactive power theory	34		☒				☒						☒								☒		
48	2016	A simple active damping method for Active Power Filters	9	☒				☒		☒			☒										☒		☒
49	2014	Comparison of an active and hybrid power filter devices	13		☒										☒								☒		
50	2021	MATLAB Simulation of Space Vector Pulse Width Modulation for 3-level NPC Inverter and 2-level Inverter	1			☒		☒								☒		☒							☒
CANTIDAD:				17	9	8	6	11	7	17	7	9	7	6	10	11	4	6	7	2	15	8	12	11	

7.2 Resumen de Indicadores

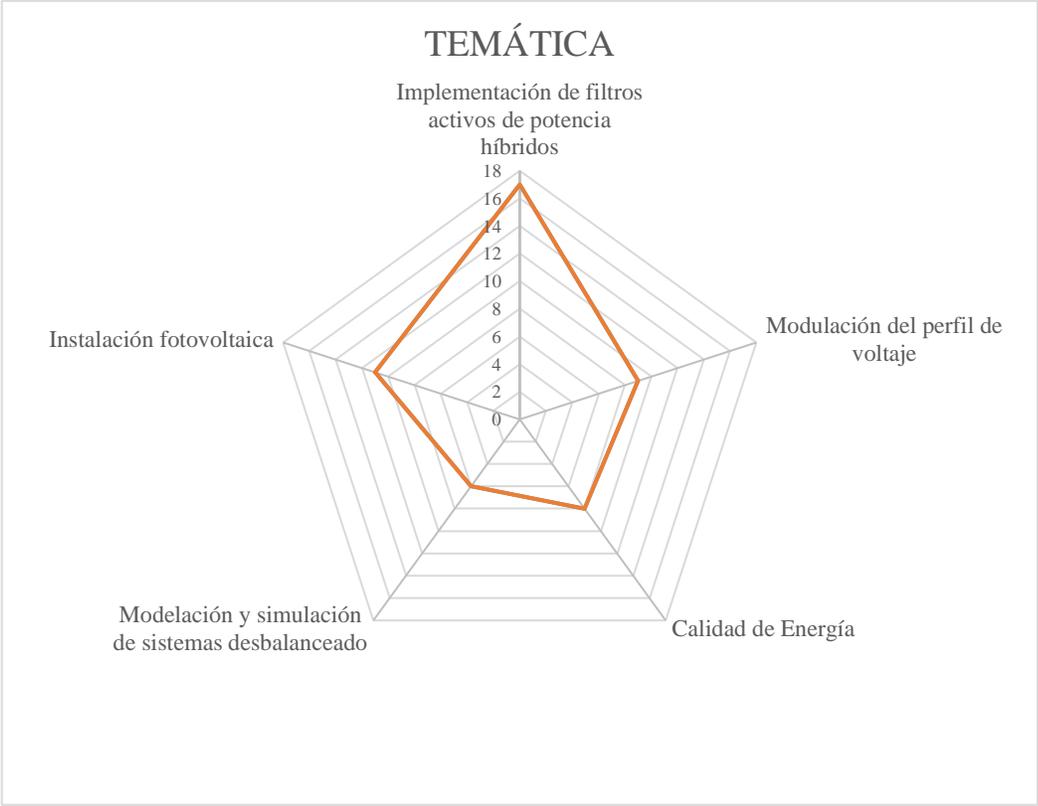


Figura 29. Resumen e indicador de la temática - Estado del arte.

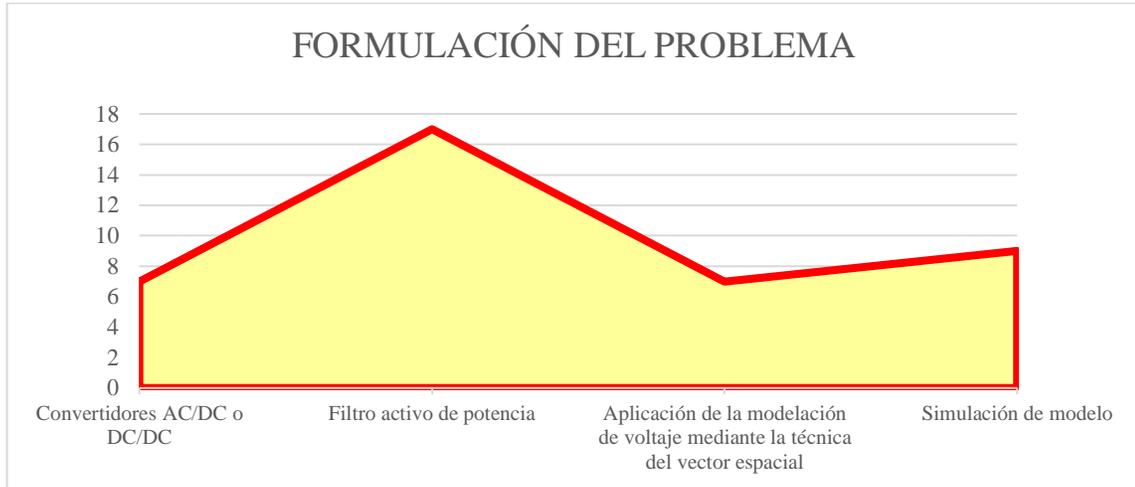


Figura 30. Indicador de formulación del problema - Estado del arte.

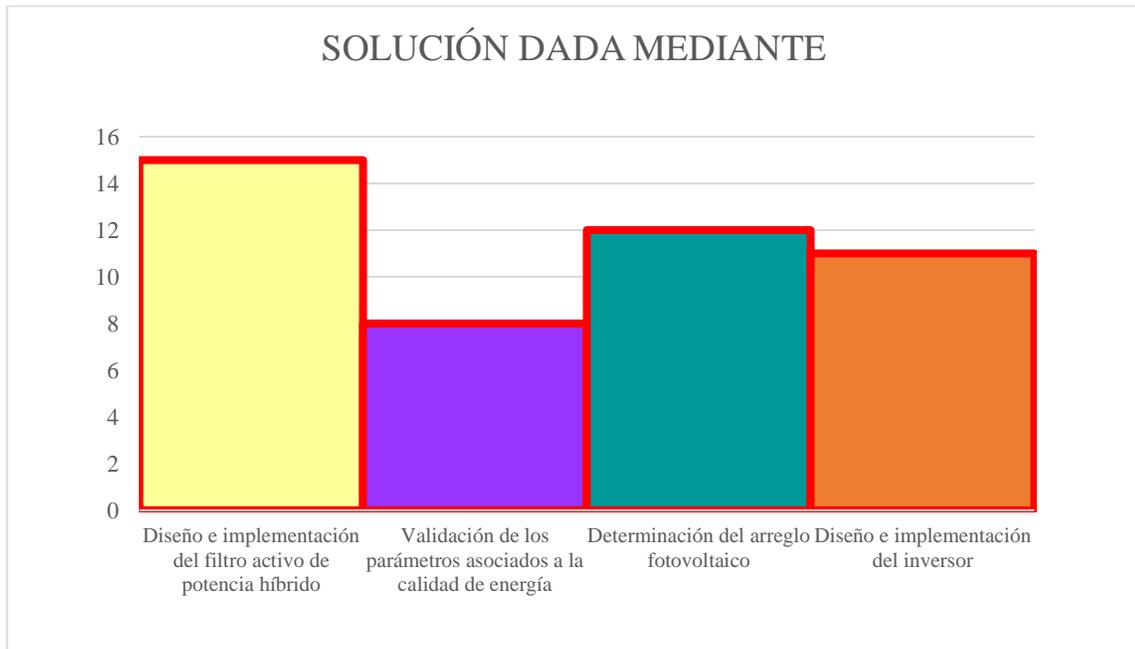


Figura 31. Indicador de solución - Estado del arte.