



**BUAP**

# **BENEMÉRITA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE PUEBLA**

Facultad de Ingeniería

Secretaría de Investigación y Estudios de Posgrado

## ***“DISEÑO DE UN FILTRO ACTIVO DE ARMONICOS PARA INVERSOR FV CONECTADO AL SEP”***

### **TESINA**

Que para obtener el grado de

**MAESTRO EN INGENIERÍA  
CON OPCIÓN TERMINAL EN  
SISTEMAS ELÉCTRICOS DE POTENCIA**

Presenta:

**LEVISRAEL HERNÁNDEZ MOLINA**

Asesor de tesis:

Dr. Juan Carlos Escamilla Sánchez

Puebla, Pue.

JUNIO 2023



# **“DISEÑO DE UN FILTRO ACTIVO DE ARMONICOS PARA INVERSOR FV CONECTADO AL SEN”**

---

## **Agradecimientos**

**A Dios:** Por la compañía, protección y bendiciones con las que honra a mi familia y a mí.

**A mi familia:** Por todo su educación, amor, comprensión y apoyo brindado en cada uno de los pasos que doy.

**A Fanny:** Por todo tu cariño, animo, apoyo y siempre creer en mí.

**A mis Amigos:** Por su compañía a lo largo de la vida y por compartir buenos momento.

**A mi asesor:** Gracias por el apoyo y comprensión en el desarrollo de este proyecto.



# **“DISEÑO DE UN FILTRO ACTIVO DE ARMONICOS PARA INVERSOR FV CONECTADO AL SEN”**

## **Índice**

|                                                                                   |           |
|-----------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>Índice de gráficas.....</b>                                                    | <b>5</b>  |
| Gráficas capítulo III .....                                                       | 5         |
| Gráficas capítulo IV .....                                                        | 5         |
| Gráficas capítulo VI.....                                                         | 5         |
| <b>Índice de Tablas.....</b>                                                      | <b>7</b>  |
| Tablas capítulo II .....                                                          | 7         |
| Tablas capítulo IV .....                                                          | 7         |
| <b>Índice de figuras .....</b>                                                    | <b>8</b>  |
| Figuras capítulo III.....                                                         | 8         |
| Figuras capítulo IV .....                                                         | 8         |
| Figuras capítulo VI .....                                                         | 8         |
| ABSTRACT.....                                                                     | 9         |
| RESUMEN .....                                                                     | 10        |
| INTRODUCCIÓN .....                                                                | 11        |
| <b>    CAPÍTULO I .....</b>                                                       | <b>12</b> |
| <b>PROTOCOLO DE INVENTIGACIÓN.....</b>                                            | <b>12</b> |
| PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA .....                                                  | 12        |
| I.2 JUSTIFICACIÓN .....                                                           | 12        |
| I.3 OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN .....                                           | 13        |
| <b>    CAPÍTULO II.....</b>                                                       | <b>14</b> |
| <b>MARCO DE REFERENCIA.....</b>                                                   | <b>14</b> |
| II.1 MARCO HISTORICO.....                                                         | 14        |
| II.2 MARCO TEORICO .....                                                          | 15        |
| <b>    CAPÍTULO III .....</b>                                                     | <b>17</b> |
| <b>ENERGIA FOTOVOLTAICA.....</b>                                                  | <b>17</b> |
| III.1 ORIGEN .....                                                                | 17        |
| III.2 PRODUCCIÓN Y CONSUMO .....                                                  | 18        |
| III.3 PRINCIPIO DE FUNCIONAMIENTO.....                                            | 19        |
| III.4 Inversor fotovoltaico .....                                                 | 25        |
| III.5 Generación Distribuida .....                                                | 29        |
| <b>    CAPÍTULO IV.....</b>                                                       | <b>32</b> |
| <b>ARMÓNICOS ELECTRICOS.....</b>                                                  | <b>32</b> |
| IV.1 Armónicos.....                                                               | 32        |
| IV.2 Efecto provocados por armónicos en los distintos elementos del sistema ..... | 34        |
| IV.3 Secuencia de los armónicos .....                                             | 37        |
| IV.4 Impedancia en Función de la Frecuencia .....                                 | 39        |
| IV.5 Índices para la medición de armónicos .....                                  | 40        |
| IV.6 Armónicos y factor de potencia .....                                         | 43        |



# **“DISEÑO DE UN FILTRO ACTIVO DE ARMONICOS PARA INVERSOR FV CONECTADO AL SEN”**

---

|                                                                        |           |
|------------------------------------------------------------------------|-----------|
| IV.7 Niveles de armónicas permitidos por las normas.....               | 44        |
| IV.8 Armónicos eléctricos en generación fotovoltaica distribuida ..... | 49        |
| <b>CAPÍTULO V .....</b>                                                | <b>62</b> |
| <b>Soluciones para disminuir el efecto de los armónicos .....</b>      | <b>62</b> |
| V.1 Introducción .....                                                 | 62        |
| V.2 Sobredimensionamiento .....                                        | 62        |
| V.2 Transformadores .....                                              | 63        |
| V.3 Dispositivos diferenciales .....                                   | 64        |
| V.4 Interruptor termomagnético.....                                    | 65        |
| V.5 Filtros Pasivos .....                                              | 66        |
| V.6 Filtros Activos .....                                              | 68        |
| <b>CAPÍTULO VI.....</b>                                                | <b>69</b> |
| <b>Diseños de filtros activos para generación fotovoltaica.....</b>    | <b>69</b> |
| VI.1 Introducción .....                                                | 69        |
| VI.2 Caso 1 .....                                                      | 69        |
| VI.3 caso 2 .....                                                      | 76        |
| <b>CAPÍTULO VII .....</b>                                              | <b>82</b> |
| <b>Conclusiones.....</b>                                               | <b>82</b> |
| <b>Bibliografía.....</b>                                               | <b>83</b> |



# “DISEÑO DE UN FILTRO ACTIVO DE ARMONICOS PARA INVERSOR FV CONECTADO AL SEN”

## Índice de gráficas

### Gráficas capítulo III

|                                                                                                                                  |    |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Gráfica III. 1 Evolución Estimada de la Capacidad Instalada Acumulada de Generación Distribuida Fotovoltaica 2016-2036 (MG)..... | 18 |
| Gráfica III. 2 Onda Modificada.....                                                                                              | 28 |
| Gráfica III. 3 Onda Pura .....                                                                                                   | 29 |
| Gráfica III. 4 Capacidad instalada acumulada por tipo de Tecnología al 2019.....                                                 | 30 |
| Gráfica III. 5 Capacidad instalada acumulada (MW) en sistemas fotovoltaicos 2007-2019.....                                       | 31 |
| Gráfica III. 6 Estimación de la capacidad instalada acumulada de generación distribuida 2016-2034.....                           | 31 |

### Gráficas capítulo IV

|                                                                                                                     |    |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Gráfica IV. 1 Onda sin contenido armónico.....                                                                      | 32 |
| Gráfica IV. 2 Onda con contenido armónico.....                                                                      | 33 |
| Gráfica IV. 3 Relación de fase en Circuitos Resistivos, capacitivos e inductivos .....                              | 34 |
| Gráfica IV. 4 potencia de salida del inversor StecaGrid 300.....                                                    | 52 |
| Gráfica IV. 5 potencia de salida inversor SunnyBoy 1100.....                                                        | 52 |
| Gráfica IV. 6 THDi, THDv y FP frente al tiempo (SB 1100).....                                                       | 53 |
| Gráfica IV. 7 Modificación de la irradiancia durante el tiempo (SB 1100).....                                       | 53 |
| Gráfica IV. 8 Comparación de irradiancia y THDi (SB 1100).....                                                      | 54 |
| Gráfica IV. 9 Amplitud de los armónicos de corriente de orden 1°, 2° y 3° respecto a la irradiancia (SB 1100) ..... | 55 |
| Gráfica IV. 10 Armónicos 1°, 3° y 5° frente a la irradiancia (SB 1100).....                                         | 55 |
| Gráfica IV. 11 THDi respecto a la potencia de salida (SB 1100) .....                                                | 56 |
| Gráfica IV. 12 Gráfica IV.14 1 THDi y THDv respecto a la potencia CA normalizada .....                              | 56 |
| Gráfica IV. 13 THDi frente a la potencia de salida (SG 300) .....                                                   | 57 |
| Gráfica IV. 14 THDi frente a la potencia de salida con una cantidad mayor de datos (SG 300) .....                   | 57 |
| Gráfica IV. 15 Espectro armónico para valor máximo de irradiancia (SB 1100) .....                                   | 58 |
| Gráfica IV. 16 Aspecto armónico cuando la irradiancia es mínima (SB 100) .....                                      | 59 |
| Gráfica IV. 17 corriente continua frente a la potencia AC (SB 1100).....                                            | 60 |
| Gráfica IV. 18 corriente continua frente a la potencia AC (SG 300) .....                                            | 61 |

### Gráficas capítulo VI

|                                                                                                                                    |    |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Gráfica VI. 1 forma de onda de Voltaje Medida en el BUS PCC .....                                                                  | 71 |
| Gráfica VI. 2 Corriente de carga no lineal medida en el bus Load-bus.....                                                          | 72 |
| Gráfica VI. 3 Corrientes de compensación del filtro para compensar tanto la carga no lineal como las corrientes fotovoltaicas..... | 72 |
| Gráfica VI. 4 Forma de onda de la corriente en el bus PV-bus comparada con el espectro de armónicos.....                           | 73 |
| Gráfica VI. 5 forma de onda de corriente de salida en Bus PV-Bus y su análisis de espectro de armónicos.....                       | 74 |
| Gráfica VI. 6 Forma de onda de corriente de salida entregada en el bus Grid-Bus y su analisis de espectros asociado.....           | 74 |
| Gráfica VI. 7 Forma de onda de tensión medida en el GRID-BUS.....                                                                  | 75 |
| Gráfica VI. 8 Medición del factor de potencia usando formas de onda de voltaje y corriente .....                                   | 75 |



## **“DISEÑO DE UN FILTRO ACTIVO DE ARMONICOS PARA INVERSOR FV CONECTADO AL SEN”**

---

|                                                                                                                                                                         |    |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Gráfica VI. 9 Ondulación del Voltaje en el Bus 1 (de arriba para abajo: Voltaje, Corriente, potencia media y potencia instantánea).....                                 | 80 |
| Gráfica VI. 10 Ondulación del Voltaje en el Bus 1 con el filtro activo encendido (de arriba para abajo: Voltaje, Corriente, potencia media y potencia instantánea)..... | 80 |
| Gráfica VI. 11 Comportamiento de la corriente antes y después del filtro activo en CA.....                                                                              | 81 |



# **“DISEÑO DE UN FILTRO ACTIVO DE ARMONICOS PARA INVERSOR FV CONECTADO AL SEN”**

---

## **Índice de Tablas**

### **Tablas capítulo II**

|                                                                    |           |
|--------------------------------------------------------------------|-----------|
| <i>Tabla II. 1 Capacidad Instalada por tipo de Tecnología.....</i> | <i>14</i> |
|--------------------------------------------------------------------|-----------|

### **Tablas capítulo IV**

|                                                                                                            |           |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <i>Tabla IV. 1 Secuencia de las corrientes armónicas en sistemas balanceados.....</i>                      | <i>39</i> |
| <i>Tabla IV. 2 Límites de distorsión Armónica en Voltaje en % del voltaje nominal (CFE L0000-45).....</i>  | <i>45</i> |
| <i>Tabla IV. 3 límites de distorsión Armónica en Voltaje en % del voltaje nominal (IEEE 519-1992).....</i> | <i>46</i> |
| <i>Tabla IV. 4 límites de la distorsión armónica en corriente en la acometida (CFE L0000-45). ....</i>     | <i>47</i> |
| <i>Tabla IV. 5 1límites de la distorsión armónica en corriente en la acometida (IEE 519) .....</i>         | <i>48</i> |



# “DISEÑO DE UN FILTRO ACTIVO DE ARMONICOS PARA INVERSOR FV CONECTADO AL SEN”

## Índice de figuras

### Figuras capítulo III

|                                                                                                       |    |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura III. 1 Potencial Eléctrico Fotovoltaico en México.....                                         | 17 |
| Figura III. 2 Enlaces Covalentes del Silicio.....                                                     | 20 |
| Figura III. 3 Estructura cristalina del Si en la cual se ha introducido un átomo de impureza Sb ..... | 21 |
| Figura III. 4 Estructura cristalina del Si en la cual se le introdujo un átomo de impureza Al.....    | 22 |
| Figura III. 5 Unión del semiconductor P con el N .....                                                | 23 |
| Figura III. 6 Diferencia de potencial que existe en las zonas N y P.....                              | 23 |
| Figura III. 7 Efecto Fotovoltaico.....                                                                | 24 |
| Figura III. 8 Sistema OnGrid .....                                                                    | 26 |
| Figura III. 9 Microinversores.....                                                                    | 27 |
| Figura III. 10 Inversor OffGrid .....                                                                 | 28 |

### Figuras capítulo IV

|                                                                                        |    |
|----------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura IV. 1 A) circuito resonancia en paralelo y B) circuito resonancia en serie..... | 36 |
| Figura IV. 2 Secuencia de las corrientes armónicas en sistemas balanceados.....        | 38 |
| Figura IV. 3 Factor de potencia en presencia de armónicos.....                         | 44 |

### Figuras capítulo VI

|                                                                                                                                              |    |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura VI. 1 Sistema Fotovoltaico con diagrama esquemático básico con filtro activo de potencia.....                                         | 70 |
| Figura VI. 2 Sistema de estudio completo en Matlab/simulink de generación fotovoltaica con filtro de potencia activa y carga no lineal ..... | 71 |
| Figura VI. 3 Diagrama del sistema a estudiar .....                                                                                           | 76 |
| Figura VI. 4 Diagrama del sistema a estudiar .....                                                                                           | 77 |
| Figura VI. 5 Cargas de CC simuladas.....                                                                                                     | 78 |
| Figura VI. 6 carga de accionamiento del motor.....                                                                                           | 78 |
| Figura VI. 7 Inversor trifásico.....                                                                                                         | 79 |
| Figura VI. 8 Carga CA.....                                                                                                                   | 79 |



## ***“DISEÑO DE UN FILTRO ACTIVO DE ARMONICOS PARA INVERSOR FV CONECTADO AL SEN”***

---

### **ABSTRACT**

The growing demand for energy and the transition to sustainable energy means that distributed photovoltaic generation is increasingly used. This being a great option to face environmental challenges, it is being one of the main sources of growing energy, but this in turn has its difficulties to overcome.

This research project is focused on the studies of an active harmonic filter, these harmonics, which under certain conditions can be created with photovoltaic generation, since this type of generation is characterized by being dependent on solar radiation and is not being constant creates harmonic distortions that decrease the quality of energy, causing the Electrical Power System to not have the desired reliability and stability.

Different articles that use active harmonic filters will be studied to see the impact of the harmonics that are had before and after placing the filter, thus seeing the effect that it has on the quality of the energy and its effects on the injection to the SEP.

Power quality is an extremely important issue for the correct operation of the electrical network, therefore, the correction of harmonics in photovoltaic generation is important to achieve the correct operation of the network.



## ***“DISEÑO DE UN FILTRO ACTIVO DE ARMONICOS PARA INVERSOR FV CONECTADO AL SEN”***

---

### **RESUMEN**

La creciente demanda de energía y la transición a energías sustentables, hace que cada vez se utilice la generación fotovoltaica distribuida. Esta al ser una gran opción para enfrentar los retos medioambientales, está siendo una de las principales fuentes de energía en crecer, pero esta a su vez tiene sus dificultades a superar.

Este proyecto de investigación está centrado en los estudios de un filtro activo de armónicos, estos armónicos, que en ciertas condiciones se pueden crear con la generación fotovoltaica, ya que este tipo de generación se caracteriza por ser dependiente de la radiación solar y esta al no ser constante crea distorsiones armónicas que afectan la calidad de la energía, haciendo que el Sistema Eléctrico de Potencia no tenga la confiabilidad y estabilidad deseada.

Se estudiarán distintos artículos que emplean filtros activos de armónicos para lograr ver el impacto de los armónicos que se tienen antes y después de colocar el filtro, viendo de esta manera el efecto que se tiene en la calidad de la energía y sus efectos de esta en la inyección al SEP.

La calidad de la energía es un tema de suma importancia para el correcto funcionamiento de la red eléctrica, por lo tanto, la corrección de los armónicos en la generación fotovoltaica es importante para lograr el correcto funcionamiento de la red.



## ***“DISEÑO DE UN FILTRO ACTIVO DE ARMONICOS PARA INVERSOR FV CONECTADO AL SEN”***

---

### **INTRODUCCIÓN**

Actualmente el cambio climático nos está orillando a tomar acciones para frenar el aumento de la temperatura lo más pronto posible y si bien la energía eléctrica es parte esencial para el progreso de una nación, el proceso para generarla esta provocado en gran medida el aumento de gases de efecto invernadero en nuestro planeta. Las pruebas de que la revolución industrial han provocado una alteración de nuestro ecosistema son palpables, basta con ver las noticias de los desastres naturales que son más comunes, intensos y duraderos. Esto seguirá en aumento sino logramos llevar a cabo una transición acelerada y segura en la implementación de generadores de energía limpia [1].

La generación eléctrica tradicional consiste en generadores síncronos que alimentan un sistema eléctrico de potencia, la mayoría de este tipo de generación contribuye en la inyección de gases nocivos, además de que la infraestructura está hecha para este tipo de generación eléctrica.

Actualmente la generación eléctrica con energías renovables del tipo intermitente (fotovoltaica y eólica), está creciendo a un ritmo acelerado en el mundo y en el país. En el caso de la generación fotovoltaica, donde se genera corriente directa, tiene que transformarse en corriente alterna para poder conectarse al sistema eléctrico nacional. Esta conversión debe tener parámetros técnicos específicos que se tienen que cumplir para poder interconectarse a la red, esto con el fin de conectarse de manera correcta y segura [2] [3].

La generación fotovoltaica puede presentar un riesgo para la seguridad y estabilidad del sistema Eléctrico Nacional (SEN), la intermitencia de la radiación solar tiene efectos sobre la generación, provocando armónicos que, a su vez afectan la calidad de la frecuencia, voltaje, potencia que ponen en estrés al SEN [4] [5].

Es importante saber cómo se comportarán las ondas de voltaje y corriente en la salida del inversor, antes de interconectarse a la red, ya que como se sabe, debido a las características de aleatoriedad e intermitencia de la radiación, además de la electrónica de potencia para convertir de CD a CA, se crean armónicos [4] [5].

La estabilidad de la red y la seguridad del suministro siempre serán dos aspectos importantes para el SEP. Por esto es de vital importancia estudiar el comportamiento del inversor para saber cómo actuara en condiciones reales, el análisis de este nos lleva a mejorar las técnicas de resolución de problemas.

Una técnica eficaz para solucionar este problema es el diseño de filtros activos para armónicos, con la finalidad de disminuir en gran medida el paso de estas distorsiones al SEN, para que la estabilidad de la red y la seguridad del suministro sean constantes, logrando así una calidad de energía óptima para su correcto uso, reduciendo los gastos y peligros que conlleva una alteración en la red eléctrica.



# ***“DISEÑO DE UN FILTRO ACTIVO DE ARMÓNICOS PARA INVERSOR FV CONECTADO AL SEN”***

---

## **CAPÍTULO I**

### **PROTOCOLO DE INVESTIGACIÓN**

#### **PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA**

Los equipos electrónicos, incluyendo el inversor FV crean señales armónicas no deseadas para una buena calidad de energía, además de que la generación fotovoltaica proporciona potencia activa, lo que ocasiona que se tenga que tomar de la red potencia reactiva, provocando un factor de potencia bajo, lo cual también genera armónicos en la red [6] [7].

En los momentos donde la radiación solar es mínima o nula, provoca alteraciones en el voltaje y corriente en el inversor, esto a su vez crea armónicos no deseados que pueden provocar una mala calidad de la energía [4] [5].

Es por estas razones que es indispensable estudiar, analizar, simular y documentar los armónicos durante el funcionamiento del inversor durante un periodo de tiempo. para que de esta manera se tenga información de cómo se comportan las variables eléctricas que se pueden llegar a generar perturbaciones en el SEN.

#### **I.2 JUSTIFICACIÓN**

El crecimiento de la generación a partir de paneles fotovoltaicos, como se mencionó antes, se pronostica que crecerá al pasar los años, pero, así como puede ayudarnos a resolver nuestros problemas de Energía, también tiene sus distintos retos a superar, el estudio de estos nos puede ayudar a mitigar o disminuir su impacto en el SEP [8].

La intermitencia y aleatoriedad que caracterizan a la generación fotovoltaica, la nula generación de potencia reactiva, la electrónica de potencia misma del inversor y las fallas que se pueden presentar en la transmisión de la energía, hacen el estudio de armónicos un área de oportunidad para su comprensión, análisis y solución [4] [6].

Es por esta razón es indispensable estudiar el comportamiento de las señales que se crean a partir de energía fotovoltaica y se conecta a la red eléctrica, esto para poder crear soluciones a estos disturbios en la red que son peligros para el correcto funcionamiento del SEP, además de provocar desconexiones, daños a equipos y pérdidas económicas.



## ***“DISEÑO DE UN FILTRO ACTIVO DE ARMONICOS PARA INVERSOR FV CONECTADO AL SEN”***

---

Los filtros activos presentan una gran oportunidad para mitigar o reducir la creación de armónicos que se inyectan a la Red y así poder aprovechar la mayor cantidad de energía solar que llega a nuestra atmosfera, esto sin afectar la calidad de la energía [6].

### **I.3 OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN**

#### **I.3.1 OBJETIVO GENERAL**

El diseño y cálculo de un filtro activo para ayudarnos a atenuar o disminuir el impacto de las frecuencias armónicas que se inyectan al SEN a partir de la generación fotovoltaica

#### **I.3.2 OBJETIVOS PARTICULARES**

- Lograr que la transición eléctrica por medio de la generación fotovoltaica sea confiable y segura, para ayudar a contrarrestar lo efectos del cambio climático.
- Probar que la energía solar puede ser de gran calidad aplicando toda la tecnología disponible, para que la calidad de la energía sea lo mejor posible.
- Ser un parteaguas para la creación de mas plantas fotovoltaicas en el país sin temor a interferir con la calidad de la energía.



# “DISEÑO DE UN FILTRO ACTIVO DE ARMONICOS PARA INVERSOR FV CONECTADO AL SEN”

## CAPÍTULO II

### MARCO DE REFERENCIA

#### II.1 MARCO HISTORICO

La energía creada a partir de fuentes limpias está en pleno auge en el mundo y en País, de hecho, México ha establecido en su legislación nacional metas para la generación eléctrica a partir de fuentes de Energías Limpias, estas metas se fijaron en la Ley General de Cambio Climático y la Ley de Transición Energética [9] [10].

Es muy probable el crecimiento de este tipo de energías en los siguientes años, en el Programa de desarrollo del sistema eléctrico nacional, proporciona información sobre la generación neta de energía limpia, en cual se aprecia el crecimiento de generación de energía sustentable [11].

El porcentaje de participación de generación con fuentes de energía limpia en 2021 fue del 29.5% (70,563.43 GWh). La generación de energía limpia renovable México se integra por la generación de centrales hidroeléctricas, eoloelectricas, fotovoltaicas y plantas que utilizan bioenergéticos. La generación hidroeléctrica en el 2021 continúa representando el mayor porcentaje de las energías renovables con el 42%, seguida de la energía eoloelectrica con 26%, la fotovoltaica con 25%, la geotérmica con 5% y, finalmente la generación a partir de bioenergía, la cual represento el 2% de la generación renovable, hablando en MG quedaría como la siguiente tabla II.1 [11].

**Tabla II. 1 Capacidad Instalada por tipo de Tecnología**

|                                             |               |               |               |
|---------------------------------------------|---------------|---------------|---------------|
| Hidroeléctrica                              | 12,612        | 12,612        | 12,614        |
| Geotermoeléctrica                           | 899           | 951           | 976           |
| Eoloelectrica                               | 6,050         | 6,504         | 6,977         |
| Fotovoltaica                                | 3,646         | 5,149         | 5,955         |
| Bioenergía <sup>2/</sup>                    | 375           | 378           | 378           |
| <b>SUMA LIMPIA RENOVABLE</b>                | <b>23,582</b> | <b>25,594</b> | <b>26,899</b> |
| Nucleoeléctrica                             | 1,608         | 1,608         | 1,608         |
| Cogeneración Eficiente <sup>5/</sup>        | 1,710         | 2,305         | 2,305         |
| <b>SUMA LIMPIA NO RENOVABLE</b>             | <b>3,318</b>  | <b>3,913</b>  | <b>3,913</b>  |
| <b>TOTAL DE CAPACIDAD DE ENERGÍA LIMPIA</b> | <b>26,900</b> | <b>29,506</b> | <b>30,812</b> |
| <b>PORCIENTO</b>                            | <b>34.29</b>  | <b>35.50</b>  | <b>35.76</b>  |
| Ciclo combinado                             | 30,402        | 31,948        | 33,640        |
| Térmica convencional <sup>3/</sup>          | 11,831        | 11,809        | 11,793        |
| Turbogás <sup>4/</sup>                      | 2,960         | 3,545         | 3,744         |
| Combustión interna                          | 891           | 850           | 701           |
| Carboeléctrica                              | 5,463         | 5,463         | 5,463         |
| <b>TOTAL</b>                                | <b>78,447</b> | <b>83,121</b> | <b>86,153</b> |

<sup>1/</sup> Capacidad instalada de la CFE y del resto de los permisionarios, al 31 de diciembre de 2020.

<sup>2/</sup> Incluye uso de biomasa, bagazo de caña, biogás y licor negro como combustibles de acuerdo con la Ley de Promoción y Desarrollo de los Bioenergéticos

<sup>3/</sup> Incluye Lecho Fluidizado

<sup>4/</sup> Incluye plantas móviles

<sup>5/</sup> Con base a la información del 21-mar-2021, se modificaron las Centrales Eléctricas de cogeneración que tienen Certificado de Energía Limpia a Cogeneración Eficiente.

<sup>6/</sup> Capacidad instalada de la CFE y del resto de los permisionarios, al 31 de diciembre de 2021.

Fuente: SENER con información de la CFE y CENACE



## **“DISEÑO DE UN FILTRO ACTIVO DE ARMONICOS PARA INVERSOR FV CONECTADO AL SEN”**

---

En el programa para el desarrollo del sistema eléctrico nacional (PRODESEN), se detalla la planeación anual, con un horizonte de quince años (2020-2036), en este se define la planeación del Sistema Eléctrico Nacional (SEN) en el cual se incluyen los elementos relevantes del programa indicativo para la Instalación y Retiro de Centrales Eléctricas (PIIRCE), así como los programas de ampliación y modernización de la Red Nacional de Transmisión (PAMRNT) y de las Redes Generales de Distribución (PAMRGD) [11].

El cual pronostica la demanda y consumo de energía para que de esta manera se pueda trazar un plan para desarrollar el crecimiento en paralelo con la transición energética, conforme a compromisos internacionales y nacionales, con el fin de reducir el impacto ambiental que provoca la generación de energía [11].

Esta pronóstico es muy importante para trazar un plan en materia energética conforme a los nuevos requerimientos en transición energética, con nuevas tecnologías que nos ayuden a tener un sistema eléctrico de potencia actualizado y seguro para lograr el desarrollo del país.

Este pronóstico debe de ir de la mano con el trazo de un proyecto que cuide la estabilidad de la red y la seguridad del suministro, estos aspectos fundamentales deben tenerse presentes en la generación fotovoltaica, por esto es necesario que las plantas generadoras de energía cuenten con capacidad de control y mecanismos de protección para evitar cortes y mala calidad de la energía.

### **II.2 MARCO TEORICO**

De los distintos componentes de una planta fotovoltaica, el inversor es parte fundamental para el correcto funcionamiento de la planta interconectada a la red, se usa para convertir la corriente continua (CD) generada por los paneles fotovoltaicos en corriente alterna (CA), la cual es compatible para la interconexión al SEN, además de que nos permite controlar el valor de la tensión de entrada, la tensión de salida, así como su frecuencia [2].

La electrónica de potencia utilizada por el inversor y la aleatoriedad de la radiación solar hace que las ondas de voltaje y corriente se distorsionen provocando efectos no deseados en la red dañando la calidad de la energía, esta deformación de una onda seno se denomina distorsión armónica [2] [4] [5].

En general, los armónicos son producidos por cargas no lineales, lo cual significa que su impedancia no es constante (está en función de la tensión). Estas cargas no lineales a pesar de ser alimentadas con una tensión sinusoidal absorben una intensidad no sinusoidal, pudiendo estar la corriente desfasada un ángulo respecto a la tensión. Para simplificar se considera que las cargas no lineales se comportan como fuentes de intensidad que inyectan armónicos en la red [6].

La distorsión armónica puede provocar daños en los equipos conectados, una baja eficiencia energética y problemas con el suministro eléctrico. Las frecuencias de los armónicos que más problemas generan en el



## ***“DISEÑO DE UN FILTRO ACTIVO DE ARMONICOS PARA INVERSOR FV CONECTADO AL SEN”***

---

flujo de potencia son aquellas que son múltiplos enteros de la fundamental como son: 120, 180, 240, 300 y 360 ciclos/segundos y las que siguen [6].

Es más difícil detectar una armónica que no es múltiplo de la frecuencia fundamental, porque no altera la longitud de onda de la misma manera, esto significa que no se ve un cambio estable en el osciloscopio cuando se estudia la onda, sin embargo, una vez que se detecta es mucho más fácil identificar su origen [6].

Una solución para este tipo de distorsiones son los filtros activos de armónicos, este tipo de filtros buscan producir corrientes de compensación la cual inyecta la misma cantidad de armónicos a la red. Esto se lleva a cabo inyectando una intensidad carente de la componente fundamental, pero con igual cantidad de contenido armónico, pero de magnitud opuesta a la corriente [12].

Los filtros activos son dispositivos basados en sofisticada electrónica de potencia y son mucho más caros que los filtros pasivos; sin embargo, tienen la gran ventaja de no presentar problemas de resonancia con el sistema.

Estos filtros generalmente están diseñados para las cargas no lineales, pero para el estudio de esta tesis, se implementará para la generación fotovoltaica para analizar y estudiar cómo se pueden adaptar para ayudarnos a solucionar el problema de la inyección armónica generada por este tipo de generación eléctrica.

Además, puede ser parteaguas, para la instalación de plantas generadoras fotovoltaicas de mayor capacidad, esto con el fin de contribuir con el compromiso que se tiene con las próximas generaciones, de dejar un mundo sustentable, reduciendo las emisiones de gases de efecto invernadero, que tanto daño hacen a nuestro planeta y humanidad.

## **CAPÍTULO III**

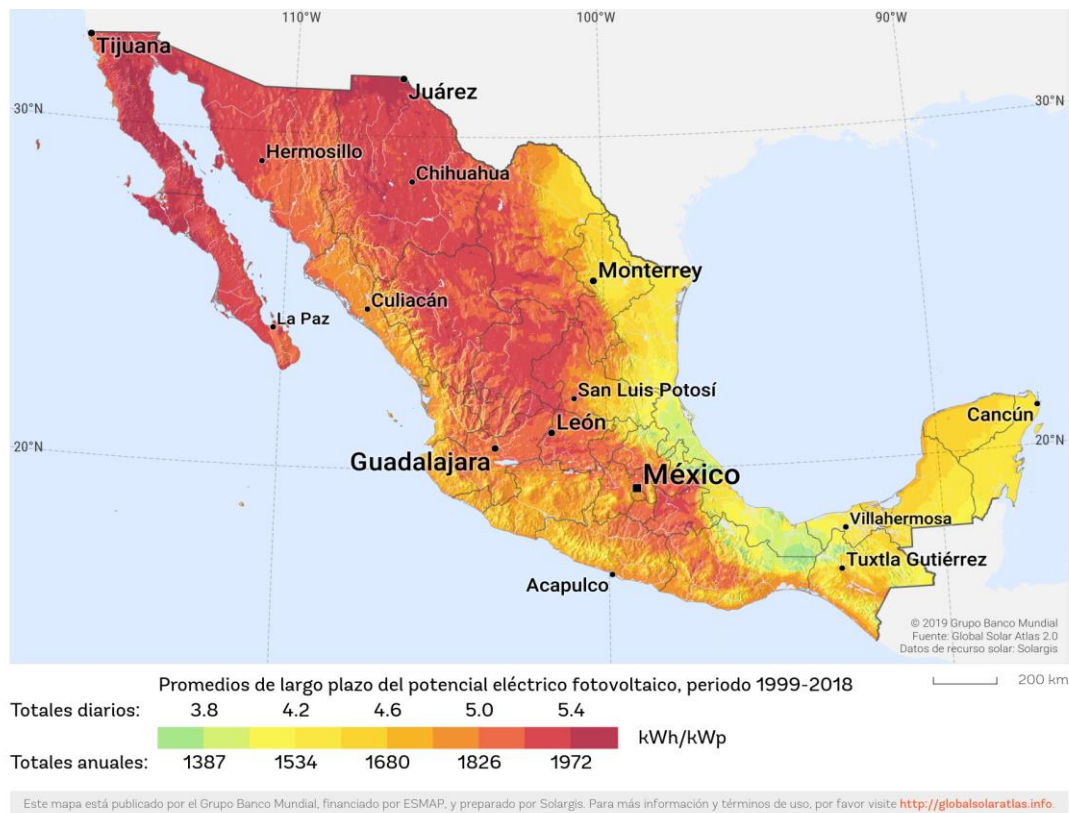
### **ENERGIA FOTOVOLTAICA**

#### **III.1 ORIGEN**

Es la energía que irradia nuestra estrella y que llega a la superficie terrestre en formas de ondas, principalmente en forma ultravioleta, luz visible y el infrarrojo dentro del espectro electromagnético. Esta forma en la que viaja la energía e irradia la superficie del planeta hace que llegue una cantidad enorme de energía utilizable y renovable [2].

Esta energía se mide  $\text{kW/m}^2$ , en teoría la radiación media incidente por  $\text{m}^2$  fuera de la atmosfera es de  $1.4 \text{ kW/m}^2$ , ya dentro de la atmosfera, esto varía según el lugar del planeta donde se quiera hacer la medición, en México la radiación promedio que incide sobre el territorio de manera diaria es de  $5.5 \text{ kW/m}^2$ , esto varia de estado a estado [3].

**Figura III. 1 Potencial Eléctrico Fotovoltaico en México**



Fuente: Global Solar Atlas 2.0 con datos de Solargis.



## “DISEÑO DE UN FILTRO ACTIVO DE ARMONICOS PARA INVERSOR FV CONECTADO AL SEN”

La Energía total que llega de a la Tierra desde el Sol es de aproximadamente 1 559 280 TWh en un año, de la cual posiblemente podríamos ocupar el 1% , la energía solar aprovechable supera los 1 000 TW, en México se podría generar hasta 84 GW, en términos de irradiación solar y de disponibilidad de techos, esto considerando las 29 ciudades más grandes de México, pudiendo lograr que el mismo sector residencial pueda satisfacer hasta el 70% de su consumo por cuenta propia por medio de una capacidad de generación de 25 GW de techos solares que se pudieran alcanzar en el año 2030 [8].

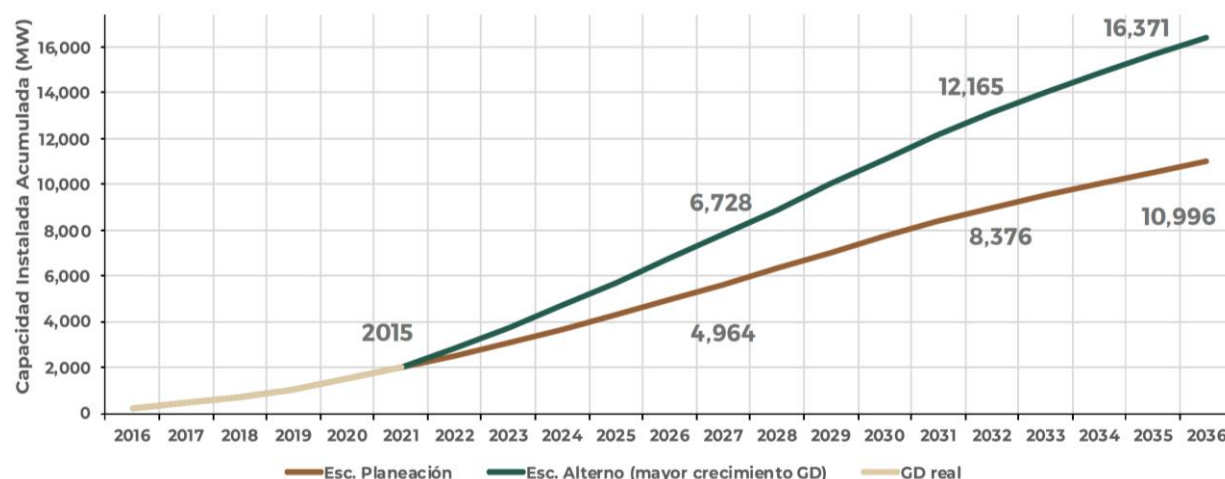
### III.2 PRODUCCIÓN Y CONSUMO

En el informe Renewables 2021 de la agencia internacional de Energía (AIE), resalta que entraron en servicio alrededor de 290 GW de energía limpia, esto es un 3% más que en el 2020. La generación fotovoltaica represento el 60% de toda la expansión de generación de energía limpia, seguida de la energía Eólica e hidroeléctrica [14].

En México a finales de 2021 se tenía una generación de 26 899 MW, un incremento del 5.1% con respecto al 2020, siendo las centrales FV la de mayor incremento la cual produce una capacidad de 1 181 MW [11].

La mayor parte de esta generación es distribuida, es decir la generación de electricidad se hace manera local en pequeñas cantidades (menor a 500 MW instalados) para autoconsumo, comúnmente para residencias, comercios, media y pequeñas empresas que se interconectados al SEN por medio de circuitos de baja tensión [11].

Gráfica III. 1 Evolución Estimada de la Capacidad Instalada Acumulada de Generación Distribuida Fotovoltaica 2016-2036 (MG)



Fuente: SENER con información de CENACE



## ***“DISEÑO DE UN FILTRO ACTIVO DE ARMONICOS PARA INVERSOR FV CONECTADO AL SEN”***

---

La generación fotovoltaica distribuida se presenta durante el día por la irradiación solar, alimentado la carga generada por los centros de cargas locales, porque para la generación distribuida no se necesita almacenar la energía para su uso posterior cuando existe nula irradiancia, ya que, al estar interconectado al SEN, durante la noche el consumo de energía es alimentado por el SEN [11].

La medición de la Energía se lleva a cabo por medio medidores bidireccionales que miden tanto la energía que se genera como la que se consume, para que, de esta manera, se haga una suma algebraica y se determine cuanta energía eléctrica generada se inyecta al SEN durante el día, más o menos, la carga consumida por la noche [11].

La generación fotovoltaica aislada es otra manera de producir y consumir energía fotovoltaica, la cual almacena el excedente de la energía generada por el día, el sobrante lo almacena en un banco de baterías para el consumo que se pueda presentar durante la noche [2].

### **III.3 PRINCIPIO DE FUNCIONAMIENTO**

#### **III.3.1 Reseña histórica**

Edmund Becquerel, físico francés, descubrió en 1839 que algunos materiales eran capaces de generar pequeñas corrientes eléctricas cuando eran expuestos a la luz, esto mientras experimentaba con dos electrones metálicos en una solución conductora, logrando observar un pequeño aumento de la generación eléctrica cuando la luz apuntaba a los electrones metálicos. Luego en 1873 Willoughby Smith observó el mismo efecto, pero esta vez en selenio [2].

Tuvieron que pasar más de 100 años para que en 1977 a W. G. Adams y R. E. Day pudieran producir la primera célula fotovoltaica, esto gracias a los estudios antes realizados como la explicación de Albert Einstein en 1904, del efecto fotovoltaico y estos a su vez facilitaron que en 1954 D. M. Chaplin, C.S. Fuller y G. L. Pearson produjesen la primera célula de silicio de la cual se obtenía energía eléctrica directamente de luz solar con una eficiencia del 6%. La carrera espacial ha contribuido de manera significativa en el desarrollo de la generación fotovoltaica [2].

#### **III.3.2 Semiconductores**

Los semiconductores son materiales, que a diferencia de los materiales conductores ofrecen poca resistencia al paso de los electrones en cambio los materiales aislantes ofrecen una resistencia elevada al tránsito de los electrones, los semiconductores presentan una resistencia media entre estos dos tipos de materiales [2].

Lo especial de los materiales semiconductores es la de tener 4 electrones en su órbita de valencia, esto hace que el átomo sea inestable, creando dos posibilidades para volverse estable, que le cueste la misma cantidad de energía, es decir le da igual desprenderse de los 4 electrones periféricos para quedarse sin una órbita o absorber 4 electrones para lograr la estabilidad [2].

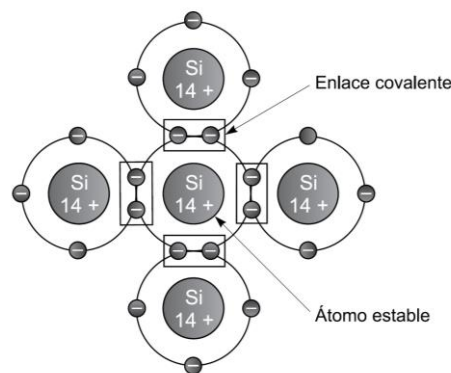


## “DISEÑO DE UN FILTRO ACTIVO DE ARMONICOS PARA INVERSOR FV CONECTADO AL SEN”

El silicio es un elemento semiconductor, el cual se integra de 14 electrones y 14 protones, los cuales se agrupan formando una estructura reticular en la que cada átomo queda rodeado por otros 4, cada átomo de silicio (Si) ocupa siempre el centro de un cubo que posee otros 4 átomos de silicio en cuatro de sus vértices. Esta forma de estructura cristalina obliga al átomo a estar rodeado por otros 4 átomos igual, creando enlaces covalentes, lo que significa que cada átomo crea un enlace con dos átomos contiguos [2].

Cada átomo del material semiconductor está rodeado por otros 4 átomos y estos a su vez aportan al átomo central uno de sus electrones, creando 4 enlaces covalentes de pares de electrones, los cuales son compartidos por 2 átomos contiguos, logrando así que el material sea estable porque se comporta como si tuviera 8 electrones periféricos, una representación se muestra en la figura III.2 [2].

Figura III. 2 Enlaces Covalentes del Silicio



Fuente: Centrales de Energías Renovables

Con esto se creería que es suficiente para ser un buen aislador, pero esto depende de la temperatura, es decir por ejemplo a  $-273^{\circ}\text{C}$  ( $0^{\circ}\text{K}$ ), la formación de los enlaces covalentes es perfecta por lo tanto es un buen aislante, pero a medida que la temperatura va en aumento la agitación de los electrones va creciendo proporcionalmente a la temperatura, haciendo que los electrones que están en la órbita periférica rompan el enlace covalente, el espacio que deja este electrón puede considerarse una carga positiva, por querer atraer un electrón libre y nuevamente completar el enlace covalente roto [2].

### III.3.2.1 Semiconductores extrínsecos

Los enlaces covalentes pueden debilitarse dependiendo de la temperatura ambiente a la que están expuestos, de tal manera que, si se le aplica una diferencia de potencial a este semiconductor, lo atraviesa una corriente muy pequeña, proporcional a la temperatura, esta corriente puede ser despreciable [2].

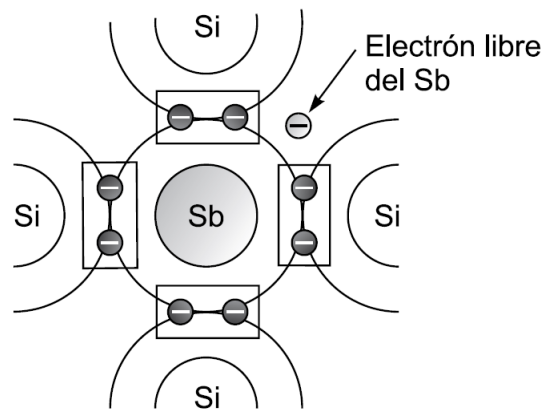
Esta corriente es tan pequeña que es insignificante, dado que la baja cantidad de portadores libres. Para aumentar estos portadores libres, se añaden otro tipo de material, a esto se le denominan impurezas [2].

### III.3.2.2 Semiconductores Extrínsecos tipo N

Si a la estructura conocida del semiconductor, en este caso el silicio puro, se le añade un átomo de impureza de antimonio (Sb), cada átomo de impureza se asienta en la estructura cristalina, obteniendo un lugar similar al que ocuparía otro átomo de Si, lo que quiere decir que estaría rodeado por 4 átomos del semiconductor tratando de formar con él, los 4 enlaces covalentes necesarios para la estabilización [2].

Así, a estos 4 enlaces covalentes, les sobra un electrón que busca salirse de su órbita para lograr la estabilidad en el átomo de Sb. Por cada átomo de impureza añadido aparece un electrón libre en la estructura, por ejemplo, en el silicio además de los  $10^{10}$  electrones y  $10^{10}$  huecos libres que existen en  $1 \text{ cm}^3$  a la temperatura ambiente, se le suma la cantidad de electrones libres equivalente a los átomos de impureza, en tales condiciones el Si con impurezas de Sb alcanza  $10^{16}$  electrones libres y  $10^{10}$  huecos libres por  $\text{cm}^3$ , haciendo que la carga negativa sea mayor que la carga positiva, en este caso a las cargas negativas de los llama portadores mayoritarios y a la carga positiva portadores minoritarios, este tipo de semiconductores extrínsecos, se les clasifica como tipo N, la figura III.3 muestra una representación del mismo [2].

**Figura III. 3 Estructura cristalina del Si en la cual se ha introducido un átomo de impureza Sb**



Fuente: Centrales de Energías Renovables

### III.3.2.2 Semiconductor Extrínseco tipo P

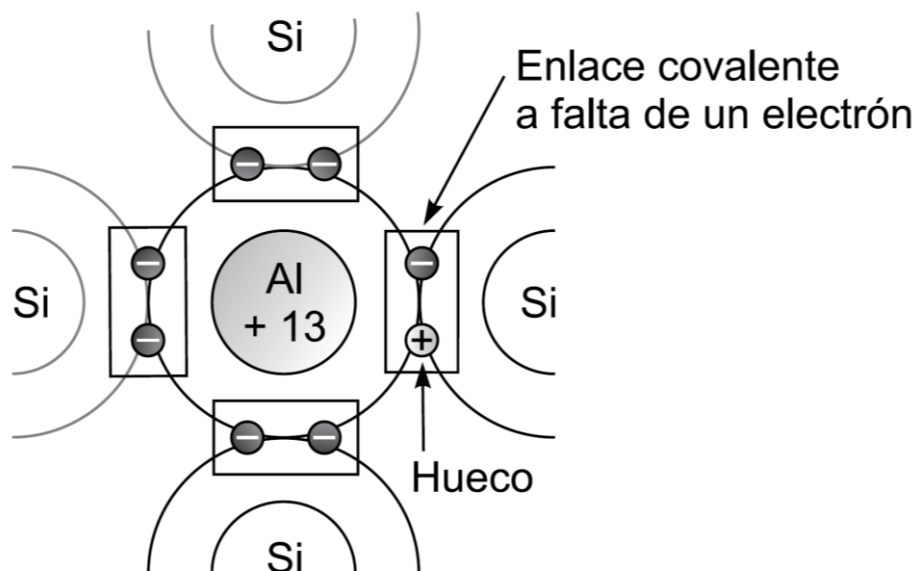
Los elementos trivalentes tales como el boro o el aluminio, son llamados así por tener 3 electrones en su órbita de valencia. Al añadir impurezas trivalentes al semiconductor, se vuelven parte de la estructura cristalina, estas impurezas se rodean de 4 átomos de Si, en este caso, con los que, de formar cuatro enlaces covalentes a falta de un electrón, es decir aparece un “hueco” [2].

Por cada átomo de impureza trivalente que se añade al semiconductor intrínseco aparece en la estructura un hueco, dicho de otra manera, falta un electrón, por ejemplo, si añadimos un átomo de impureza

trivalente por cada millón de átomos de semiconductores existen  $10^{16}$  huecos libres y  $10^{10}$  electrones libres por  $\text{cm}^3$  a la temperatura ambiente [2].

En este tipo de semiconductor existe mayor número de cargas positivas o huecos denominados en este caso portadores mayoritarios, mientras que los electrones libres son los portadores minoritarios, este semiconductor extrínseco recibe el nombre de semiconductor de tipo P, una representación se muestra en la figura III.4 [2].

**Figura III. 4 Estructura cristalina del Si en la cual se le introdujo un átomo de impureza Al**



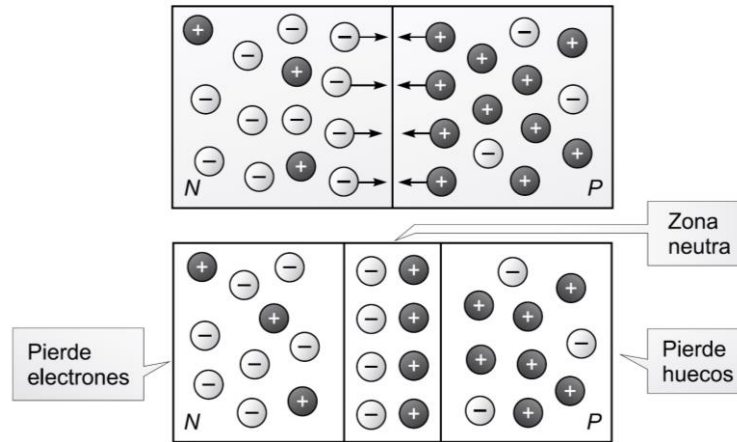
Fuente: Centrales de Energías Renovables

### **III.3.3 Unión del semiconductor P con el N**

El semiconductor tipo P tiene más espacios libres que electrones libres, pero su carga neta es neutra. Lo que le sucede al revés al semiconductor tipo N, porque tiene más electrones libres que espacios libres, pero en conjunto posee una carga neutra [2].

Al unir dos semiconductores uno del tipo P y otro del tipo N, debido a la ley de la difusión, los electrones de la zona N tratan de acercarse a la zona P, logrando que donde se unan los dos semiconductores se logre la unión de una estructura estable y neutra, debido a que los espacios libres del semiconductor tipo P pasan a ser ocupados por los electrones libres del semiconductor tipo N, la representación visual se muestra en la figura III.5 [2].

**Figura III. 5 Unión del semiconductor P con el N**

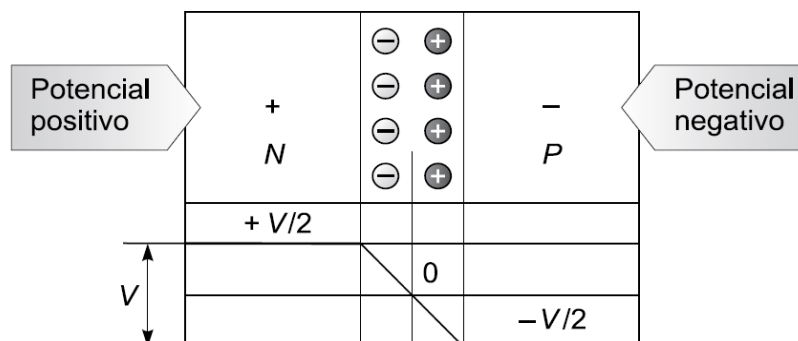


Fuente: Centrales de Energías Renovables

El semiconductor tipo N es neutro desde el principio, cuando se junta con un semiconductor tipo P pierde electrones libres, haciendo al semiconductor tipo N cada vez más positivo, de manera contraria el semiconductor tipo P, va perdiendo espacios libres al juntarlo con un conductor tipo N, haciéndolo cada vez más negativo. Logrando que exista una diferencia de potencial en los extremos de cada semiconductor como se muestra en la figura III.6 [2].

La diferencia de tensión que se crea en los extremos de los semiconductores tipo N y P, se le llama barrera de potencial, el potencial positivo que se forma en la zona N, expulsa las cargas negativas que provienen de la zona P y de manera contraria la zona P repele a los electrones de la zona N. Cuando ambas zonas perdieron cierta cantidad de portadores mayoritarios, la propia barrera que sea crea no permite más la difusión, de esta manera se igualan las concentraciones de ambas zonas, figura III.6 [2].

**Figura III. 6 Diferencia de potencial que existe en las zonas N y P**



Fuente: Centrales de Energías Renovables

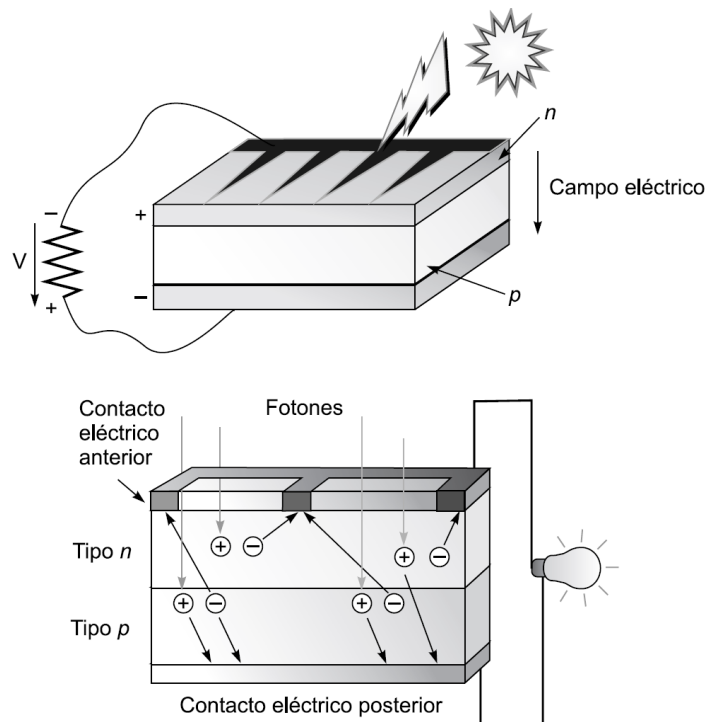
La diferencia de potencial es de aproximadamente 0.2 V cuando el semiconductor este hecho de Ge y alrededor de 0.5 V cuando es de Si [2].

### III.3.4 Efecto fotovoltaico

Cuando la luz incide sobre los materiales semiconductores, los fotones excitan a los electrones del lado de un semiconductor, colando un circuito exterior, algunos electrones pueden atravesar la barrera de potencial, esto a su vez crea una corriente eléctrica, ya que los electrones tras recorrer el circuito externo vuelven entrar en el semiconductor de cara opuesta [2].

Esta unión N-P hace que se cree un campo eléctrico en la célula con una dirección de N al lado P, esto a su vez separa las cargas positivas y negativas, las cargas positivas (huecos), los dirige hacia el contacto del lado P y de manera contraria los electrones, las cargas negativas los dirige hacia el contacto del lado N, haciendo posible que se mantenga una corriente eléctrica, eso a través del circuito exterior, figura III.7 [2].

**Figura III. 7 Efecto Fotovoltaico**



Fuente: Centrales de Energías Renovables

La generación de energía solo ocurre cuando los fotones entran en el semiconductor, es decir cuando la luz está apuntando hacia el material. No todos los fotones se comportan del mismo modo a la hora de



## **“DISEÑO DE UN FILTRO ACTIVO DE ARMONICOS PARA INVERSOR FV CONECTADO AL SEN”**

---

generar energía, existen frecuencia que se pueden aprovechar mejor que otras, dependiendo del material semiconductor que se está utilizando [2].

### **III.4 Inversor fotovoltaico**

Los inversores son elementos fundamentales en cualquier sistema fotovoltaico, esto porque como se mencionó en el capítulo anterior, las celdas fotovoltaicas generan energía eléctrica a través de corriente directa y esta no se puede utilizar para alimentar cargas de tipo alterna, ni tampoco conectar al SEP de manera directa. La función principal del inversor es un convertir la corriente continua en corriente alterna, lo cual se hace utilizando la electrónica de potencia [6] [17].

El inversor se compone de tres elementos principales:

- Circuito de interruptores
- Etapas de acondicionamiento de potencia
- Sistema de control

El circuito de interruptores es el que lleva a cabo la conversión de corriente directa a corriente alterna, esta constituido por interruptores, construidos con semiconductores que trabajan en conmutación, de manera que sigan una serie de pasos dirigidos por el sistema de control del inversor. Actualmente se ocupan semiconductores de tecnología MOS (Metal- Oxide-Semiconductor), que son dispositivos electrónicos formados por un sustrato de silicio dopado, en el cual se crea una capa de óxido ( $\text{SiO}_2$ ), tales como los MOSFET (transistor de efecto de campo metal-óxido semiconductor) o los IGBT (transistor bipolar de puerta aislada) [16].

La función de la etapa de acondicionamiento de potencia es la de modificar las características de la potencia eléctrica a través de la tensión, corriente y frecuencia en diferentes etapas del proceso de conversión DC/AC. Por ejemplo, la tensión continua de entrada que generan las celdas fotovoltaicas por lo general pasa por convertidores DC/DC para modificar su valor, antes de llegar al circuito de interruptores. También la tensión alterna generada por el circuito de interruptores, por lo general, tiene características diferentes de las que necesita la carga, por lo tanto, en la salida del inversor podemos encontrar otras etapas de acondicionamiento de potencia [16].

El sistema de control del inversor vigila y condiciona el proceso de conversión de potencia, esto lo logra a través de dos funciones básicas:

- La primera consiste en ordenar la apertura y cierre de los interruptores de acuerdo con el diseño de conmutación elegida para crear la onda sinusoidal
- La segunda es que la onda sinusoidal de salida tenga las magnitudes de tensión, frecuencia, corriente, potencia, etc., requeridas por la carga.

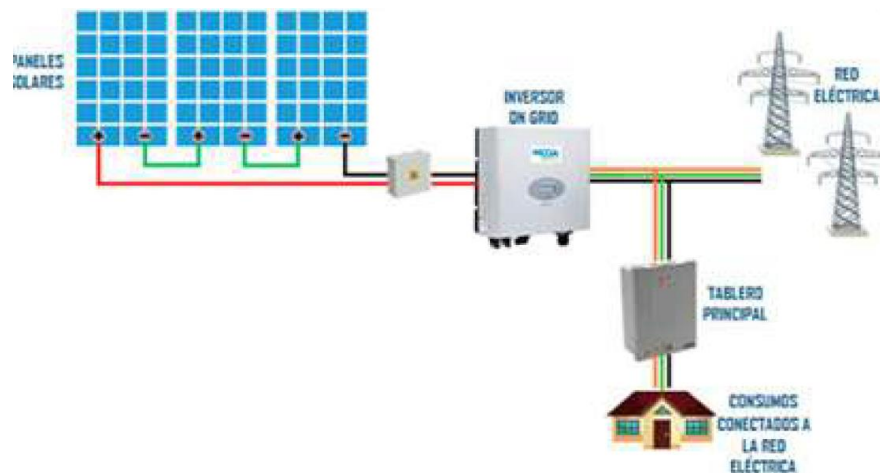
Cabe mencionar que los inversores de sistemas fotovoltaicos interconectados a la red y los inversores de sistemas fotovoltaicos aislados son diferentes, por lo tanto, no se pueden utilizar en instalaciones de las cuales fueron diseñados [16].

### III.4.1 Tipos de Inversores

Los inversores, aunque cumplen la misma función de transformar la corriente CD a CA, se pueden clasificar en tres tipos según su forma de operar:

- **OnGrid – Inversores de conexión a la Red.** Este tipo de inversor convierte la corriente directa de los paneles a corriente alterna, está diseñado para actuar directamente en la red eléctrica del sistema eléctrico de potencia, de manera que la potencia que se va generando en la planta fotovoltaica, alimenta las cargas conectadas a esta, ya sea para el hogar, empresa o industria. El excedente de potencia que se pudiera llegar a generar se inyecta directamente a la red del SEP, este tipo de arreglo no necesita almacenar la energía. El inversor monitorea en todo momento los parámetros de entrada y salida de las variables como el voltaje, la frecuencia, la corriente, la potencia, etc., Este tipo de inversor produce una onda senoidal pura, en la figura III.8 se muestra este tipo de arreglo [6].

Figura III. 8 Sistema OnGrid



- **Microinversores.** Los Microinversores solares, convierten la corriente directa en corriente alterna de manera individual para cada panel solar, es decir cada panel solar cuenta con su micro inversor o se pueden conectar hasta cuatro paneles solares, esto tiene la ventaja de que se pueda monitorear de manera individual, dichos microinversores hacen más eficiente la generación de energía, ya que cada módulo logra la máxima potencia de generación evitando que algún panel baje el

rendimiento de la planta y se genere un desaprovechamiento de la instalación. Estos al igual que el inversor OnGrid, se conectan directamente a la red eléctrica del Sistema Eléctrico de Potencia y no se necesitan baterías para almacenar la energía, la figura III.9 muestra tal arreglo [6].

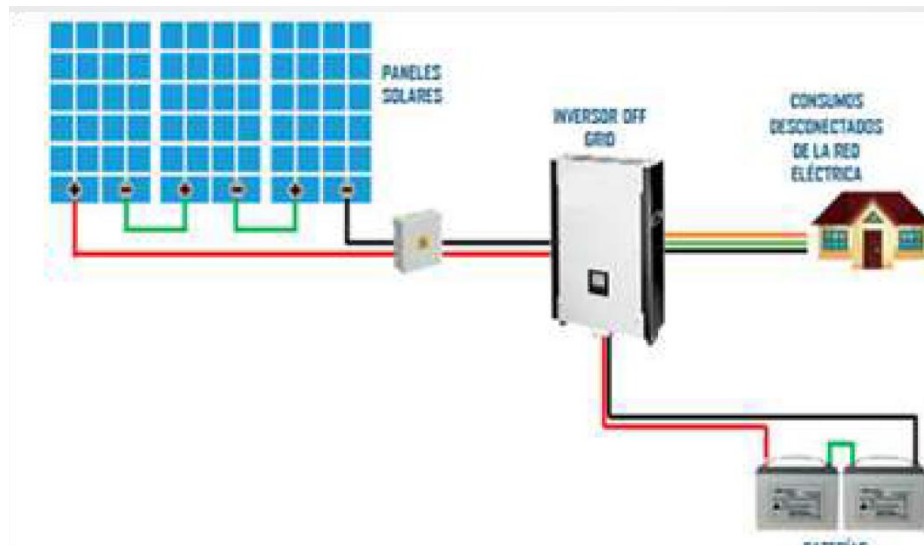
Figura III. 9 Microinversores



- **OffGrid.** Los inversores fotovoltaicos de sistemas aislados, es decir de los que se requiere almacenar la energía generada, se utilizan en plantas fotovoltaicas que no tienen conexión alguna a la red eléctrica. Estos convierten la corriente continua de las baterías en corriente alterna para que de esta manera se pueda alimentar las cargas conectadas. Por lo general estas instalaciones se llevan a cabo donde no es posible conectarse a la red eléctrica, por ejemplo, casas de campo, barcos, sistemas de bombeo, zonas rurales donde no existe una red eléctrica, etc.

Para el diseño de un inversor OffGrid es necesario tener en cuenta distintos parámetros como la potencia nominal que puede proporcionar el inversor en uso continuo y normal, además de la potencia pico que puede entregar cuando las cargas demandan durante un periodo de tiempo corto, ya que como se sabe, algunas cargas eléctricas al encender demandan una potencia mayor en el inicio. Este es el caso de aparatos con motores tales como bombas, refrigeradores, taladros, etc., la figura III.10 muestra el arreglo OffGrid [6].

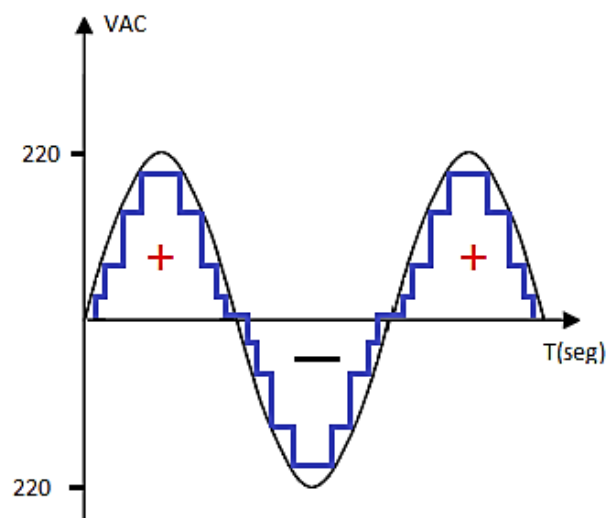
Figura III. 10 Inversor OffGrid



Los inversores pueden generar dos tipos de ondas:

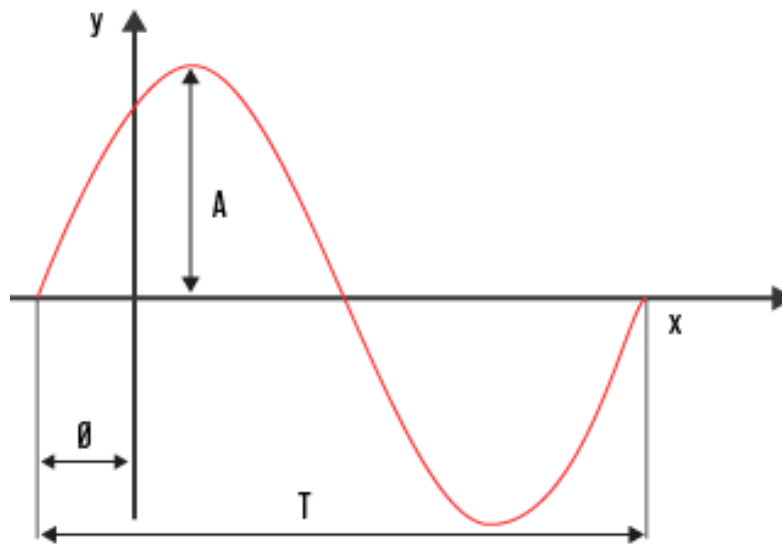
- **Onda Modificada.** Los inversores que generan este tipo de Onda modificada tienen una mayor eficiencia en comparación con los inversores de onda cuadrada, tienen una buena relación calidad-precio cuando se utilizan para iluminación, televisores, radiadores o motores universales. Aunque estos inversores se pueden utilizar para prácticamente todo tipo de cargas, existen cargas inductivas con las que no funcionaría de manera eficiente o correcta, ya que la onda se genera electrónicamente, La gráfica III.2 muestra este tipo de onda [6].

Gráfica III. 2 Onda Modificada



- **Onda Pura.** Inversores OffGrid de Onda Pura están diseñados para no generar ruido en los aparatos electrodomésticos, este tipo de inversor que genera una onda pura, normalmente se utilizan cuando la planta fotovoltaica no se conecta a la red eléctrica. Estos inversores generan una onda sinusoidal casi perfecta. Estos inversores son más caros que los de onda modificada y también se pueden utilizar con todo tipo de aparatos respetando siempre los parámetros para el cual fue diseñado, la gráfica III.3 muestra el tipo de onda que se genera [6].

Gráfica III. 3 Onda Pura



### III.5 Generación Distribuida

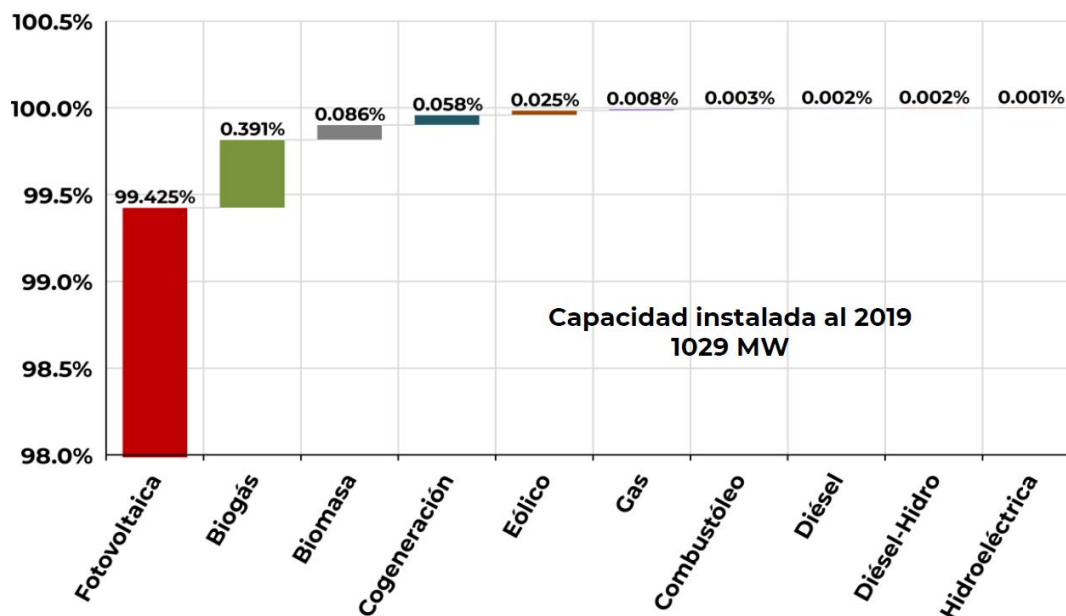
La generación distribuida es aquella fuente de generación que se encuentran lo más cerca posible de la carga o centro de consumo, su generación no debe rebasar los de 0.5 MW de potencia, además se encuentra interconectada en la red eléctrica del sistema eléctrico de potencia y por lo regular se trata de fuentes de generación de energía limpia [2].

En el país existen diferentes maneras de generar energía distribuida, siendo la generación fotovoltaica la de mayor capacidad, tanto así que equivale al 99.4% del total de este tipo de generación, para el año 2019 la capacidad instalada de generación distribuida generada fue de 337 MWh, esto debe a que es el tipo de energía más rentable y de mayor utilización en México, en la gráfica III.4 se muestra los porcentajes por tipo de energía presentes en México en el año 2019 [13].



## “DISEÑO DE UN FILTRO ACTIVO DE ARMONICOS PARA INVERSOR FV CONECTADO AL SEN”

Gráfica III. 4 Capacidad instalada acumulada por tipo de Tecnología al 2019



En México la generación fotovoltaica distribuida se encuentra en aumento año con año, de los años 2017 al 2020 los contratos de interconexión registrados, según la comisión reguladora de energía (CRE), aumentaron un 21% con 35,483 contratos, ya que en el 2017 se registraron 29,676 contratos de interconexión con un aumento para el año 2020 de 65,159 contratos (CRE, 2021) [13].

De manera similar, la capacidad instalada acumulada fotovoltaica tuvo un aumento, al pasar de 452 MW en el 2017 a 1,023 MW en el 2019, en la gráfica III.5 se muestra el crecimiento de la capacidad instalada. De acuerdo con la información de la comisión reguladora de energía, la capacidad instalada se conforma de 76.6 % de generación distribuida y el 25.4% proviene de contratos de pequeñas y mediana escala [13]

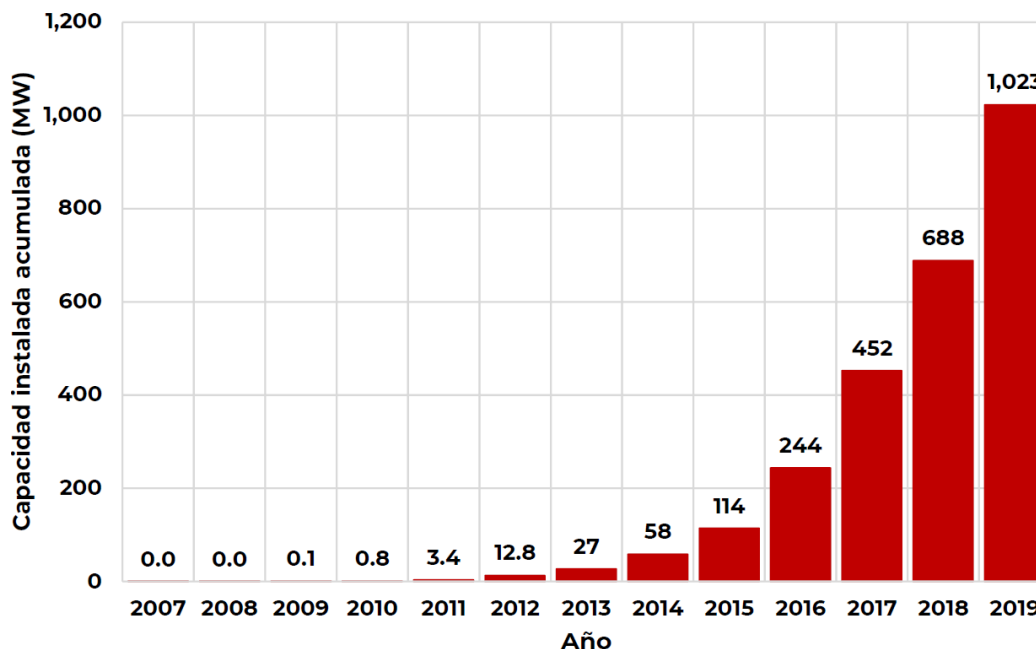
Del total de contratos hasta el 2019 el 77.2% representa la generación distribuida y el 22.8% son contratos de pequeña y mediana escala, la mayor parte de solicitudes de generación fotovoltaica (entre 1 y 5 kW) la representa la generación distribuida con el 65.4 %, por el contrario, las solicitudes de mayor capacidad (250 y 500 kW) son del 0.4% [13].

Los consumidores de este tipo de energía en GD en su mayoría son personas físicas, aunque existe un pequeño porcentaje de personas morales que instalo plantas fotovoltaicas distribuidas, esto según los datos disponibles hasta el año 2019, se estima que el 90% de las instalaciones de generación distribuida son construidas por personas físicas, aunque las Pymes y grandes empresas han aumentado su participación en la instalación de generación distribuida: del 4% de permisos registrados en el año 2017, hubo un incremento del 11% para el año 2019 [13].



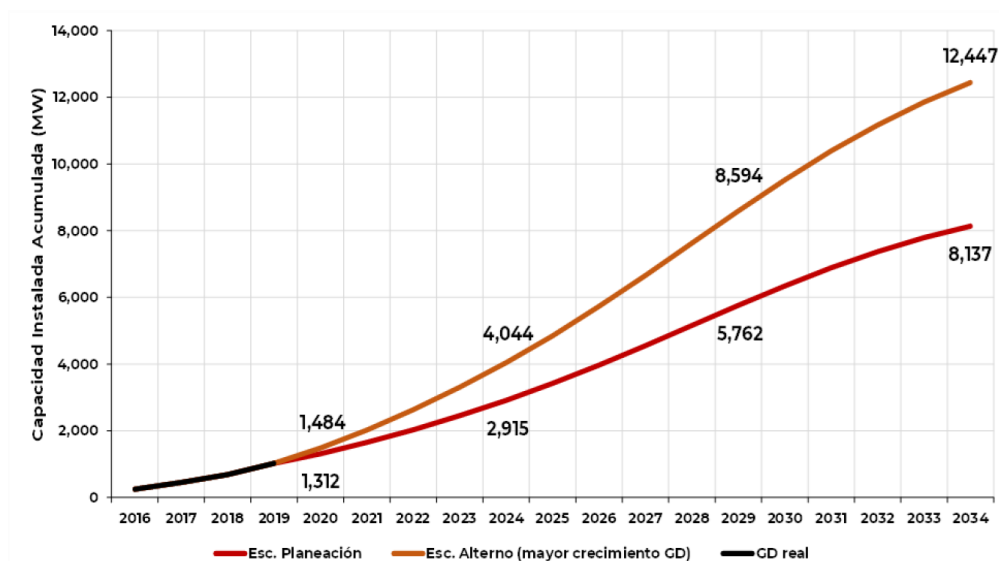
## “DISEÑO DE UN FILTRO ACTIVO DE ARMONICOS PARA INVERSOR FV CONECTADO AL SEN”

Gráfica III. 5 Capacidad instalada acumulada (MW) en sistemas fotovoltaicos 2007-2019



Se estima que para el año 2034 la capacidad instala pasara de 1,0123 registrada en el 2019 a 8,137 MW, aunque podría ser mayo acercándose a los 12,447 MW si existe un mayor dinamismo e impulso de la generación distribuida, la gráfica III.6 muestra estas estimaciones [13] [11].

Gráfica III. 6 Estimación de la capacidad instalada acumulada de generación distribuida 2016-2034





## **CAPÍTULO IV**

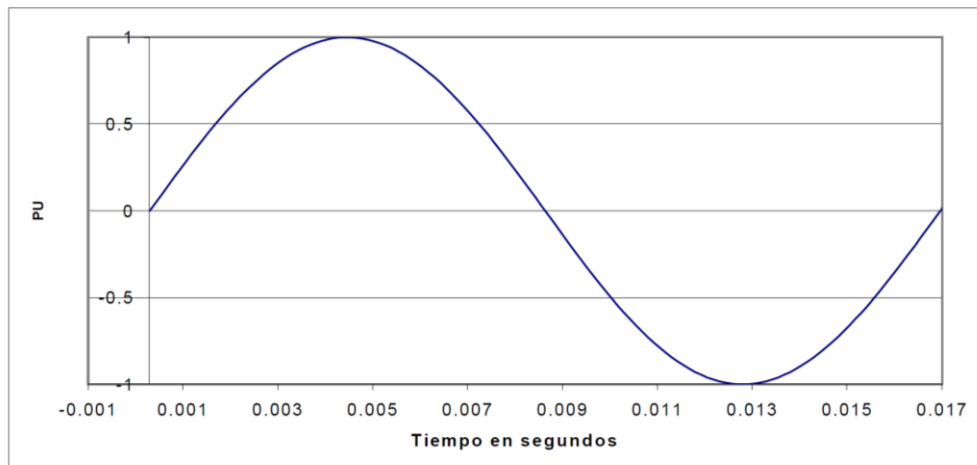
### **ARMÓNICOS ELECTRICOS**

#### **IV.1 Armónicos**

Actualmente el uso de cargas no lineales en el sistema eléctrico de potencia es bastante común, pero estos a su vez pueden generar problemas tanto para los usuarios como para la compañía suministradora de energía que ocasionan diversos efectos nocivos en los equipos de la red, estas perturbaciones en la red son llamados armónicos [6] [16].

Para poder definir a los armónicos, es necesario primero entender la calidad de la onda de tensión, la cual debe tener una amplitud y frecuencia al igual que una onda sinusoidal, en la gráfica IV.1 se representa la forma de onda ideal la cual no contiene armónicos, la representación se hace con una frecuencia constante de 60 Hz y una amplitud constante de 1pu.

**Gráfica IV. 1 Onda sin contenido armónico**



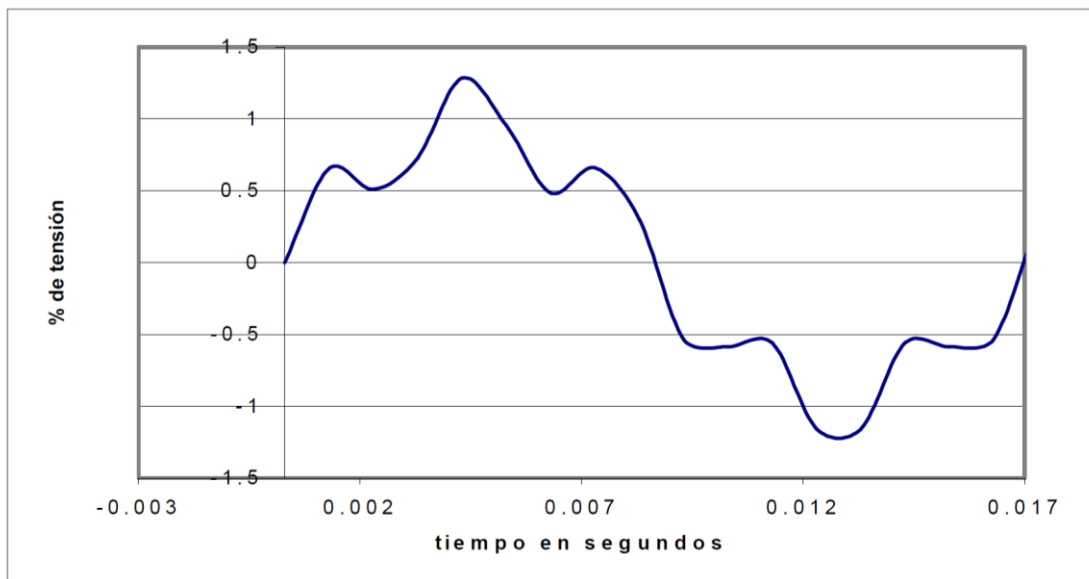
Los armónicos hacen que la calidad de la onda disminuya provocando alteraciones en la misma, haciendo que la forma sinusoidal se modifique, lo cual puede alterar su valor pico y/o valor RMS provocando alteraciones en el funcionamiento normal de los equipos conectados cerca de estas perturbaciones [16].



## “DISEÑO DE UN FILTRO ACTIVO DE ARMONICOS PARA INVERSOR FV CONECTADO AL SEN”

Se pueden definir a los armónicos como señales cuya frecuencia es un múltiplo entero de la frecuencia fundamental, la cual es la onda periódica principal. Así, en sistemas con frecuencia de 60 HZ sus múltiplos son 120, 180, 240, 300, etc., a cada armónico se le llama según al múltiplo que corresponda, es decir, segundo armónico (120 Hz), tercer armónico (180 Hz), cuarto armónico (240 Hz) y así sucesivamente, en la gráfica IV.2 se muestra una onda de tensión con un contenido del 30% del quinto armónico, se puede observar que esta interferencia hace que el valor pico aumente un 30% [6].

Gráfica IV. 2 Onda con contenido armónico



Estas alteraciones de onda de voltaje y/o corriente, son provocadas por cargas no lineales, pero antes es necesario entender cuáles son las cargas lineales las cuales se pueden definir en tres puntos:

- La corriente de la carga es proporcional al voltaje
- Si el voltaje de alimentación es sinusoidal, la forma de onda de la corriente es sinusoidal
- La onda de voltaje no es afectada por la onda de corriente.

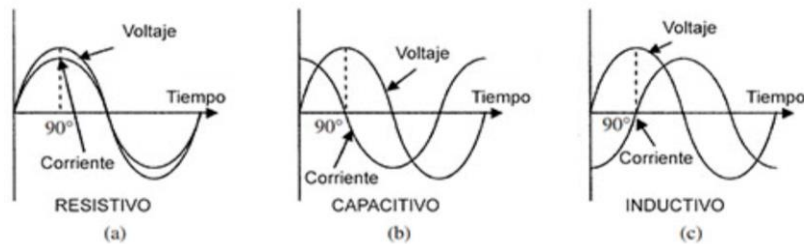
Algunos ejemplos de cargas lineales son los calentadores resistivos, luminarias incandescentes, motores, capacitores, transformadores, líneas, cables, cargas de calefacción y estas son lineales por naturaleza haciendo que la impedancia de carga se esencialmente constante sin importar el voltaje aplicado [6]

Estas cargas cuentan con elementos resistivos, capacitivos e inductivos, siendo una combinación de ellos o por separado. En un circuito puramente resistivo la corriente está en fase con el voltaje, en un circuito predominantemente inductivo la corriente está en retraso con respecto al voltaje y finalmente en un circuito mayormente capacitivo, la corriente está en adelanto con respecto al voltaje, en el grafico IV.3 se muestra la representación gráfica de cada elemento mencionado [6].



## “DISEÑO DE UN FILTRO ACTIVO DE ARMONICOS PARA INVERSOR FV CONECTADO AL SEN”

Gráfica IV. 3 Relación de fase en Circuitos Resistivos, capacitivos e inductivos



En cualquiera sea el caso de los circuitos mostrados la magnitud de la corriente será proporcional al voltaje aplicado, además si el voltaje es sinusoidal, de igual manera la corriente tendrá una onda sinusoidal [6].

Antes de la llegada de la electrónica, casi todas las cargas eran lineales y las pocas cargas no lineales eran tan pequeñas que se ignoraban para el cálculo, diseño y operación de los sistemas eléctricos de potencia. Cuando la revolución electrónica comenzó, surgieron más cargas no lineales [6] [17.]

La mayoría de las cargas electrónicas son no lineales, entonces surgió la necesidad de estudiar este tipo de cargas, ya que alcanzaron un nivel de utilización masivo que fue necesario tomarlo en cuenta para el diseño y operación del sistema eléctrico de potencia, estas cargas las podemos definir en tres puntos

- La corriente de la carga no es proporcional al voltaje
- Aunque el voltaje de alimentación sea sinusoidal, la corriente puede que no sea sinusoidal
- Las ondas de voltaje se pueden distorsionar debido a las ondas de corriente

Algunos ejemplos de cargas no lineales son balastos electrónicos, equipos de cómputo, equipos de enfriamiento, hornos de arco eléctricos, unidades rectificadoras, iluminación led, lámparas fluorescentes, fuentes reguladas por conmutación, cargadores de baterías, variadores de frecuencia para motores, inversores, etc [6].

El efecto más notable de las cargas no lineales son la de crear distorsión armónica en el sistema haciendo que los equipos que estén conectados cerca de estas fuentes armónicas no trabajen de manera correcta. Cada elemento del SEP presenta efectos dañinos diferentes cuando se producen armónicos cerca de estos equipos. A continuación, se presenta el efecto que producen en cada elemento presente en el SEP.

### IV.2 Efecto provocados por armónicos en los distintos elementos del sistema

**Efecto en conductores:** Uno de los efectos que más se presenta en los conductores es el efecto Skin, este efecto no se presenta en corriente directa ya que la distribución de corriente directa a través de la sección



## **“DISEÑO DE UN FILTRO ACTIVO DE ARMONICOS PARA INVERSOR FV CONECTADO AL SEN”**

---

transversal de un conductor es uniforme, en cambio en corriente alterna a medida que el voltaje y/o la frecuencia aumenta la densidad de corriente está en el exterior del conductor [18] [19].

Cuando las tensiones y/o frecuencias son bajas, el tránsito de corriente tiende a ser uniforme en toda la sección transversal del conductor; cuando la tensión se aumenta hace que produzca un incremento del campo magnético en la zona central del conductor haciendo que el paso de electrones se vea forzado a transitar por la parte externa, aumentando la densidad de corriente en la periferia del conductor [18] [19].

Por lo tanto, la resistencia a corriente alterna de un conductor es mayor que su valor a corriente directa y aumenta con la frecuencia, por ende, también aumentan las pérdidas por calentamiento. A una frecuencia de 60 Hz, este efecto se puede despreciar, ya que este efecto se considera en el diseño del conductor, sin embargo, con corrientes distorsionadas por los armónicos, las pérdidas por efecto joule son mayores por las componentes armónicas de la corriente [18] [19].

**Efecto en los transformadores:** Casi todos los transformadores están diseñados con frecuencias fundamentales de 50 Hz ó 60 Hz, dependiendo del país y las necesidades del usuario, por lo tanto, su funcionamiento en condiciones de carga nominal y con temperaturas no mayores a la diseñada, deber ser capaz de disipar el calor producido por el efecto joule sin sobrecalentarse ni comprometer su vida útil [18] [19].

Las perdidas en los transformadores consisten en 4 puntos fundamentales:

- **Perdida sin carga:** Estas se producen por el voltaje que excita al núcleo, en el diseño del mismo la onda de voltaje en el primario es considerada sinusoidal, por lo que la corriente de carga que contenga armónicas no está considerado en el diseño del transformador, pudiendo dañar el equipo por el aumento de temperatura [18] [19].
- **$I^2R$ :** Si existen armónicos en la corriente de carga, las perdidas aumentan en los conductores por el efecto Skin [18] [19].
- **Perdidas por corriente de Eddy:** En el núcleo de transformadores se generan tensiones inducidas debido a las variaciones de flujo magnético, esto a su vez genera corrientes no deseadas en el núcleo, que no son deseables para la eficiencia de este. Por lo tanto, cuando existen corrientes armónicas de parte de la carga, estas pérdidas por corrientes de Foucault (también llamadas corrientes de Eddy o parasitas) aumentan provocando mayores pérdidas [18] [19].
- **Perdidas adicionales:** Las pérdidas adicionales son debidas al flujo disperso y corrientes parásitas en los devanados del transformador, estas corrientes pueden llegar despreciarse, pero cuando existen corrientes armónicas estas pérdidas adicionales aumentan afectando la eficiencia del equipo [18] [19].

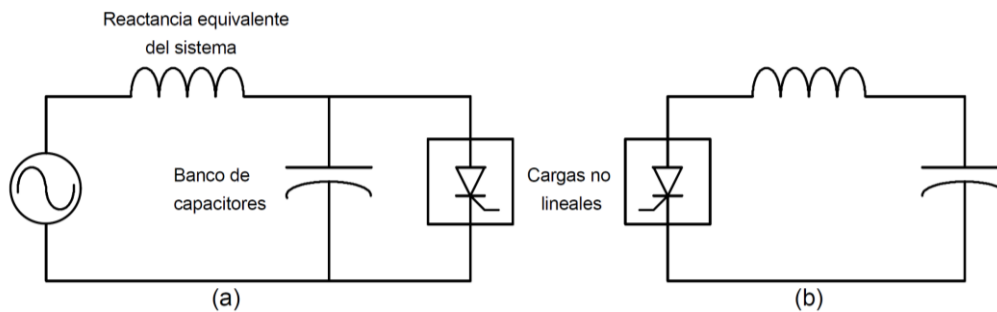
**Efectos en capacitores:** Cuando se instala un banco de capacitores en circuitos que alimenten cargas no lineales el mayor riesgo que puede suceder es la resonancia tanto en serie como en paralelo. Mientras más alta sea la frecuencia, la reactancia inductiva del circuito equivalente aumenta, de manera contraria la



## “DISEÑO DE UN FILTRO ACTIVO DE ARMONICOS PARA INVERSOR FV CONECTADO AL SEN”

reactancia capacitiva del banco de capacitores disminuye. En algún momento estas frecuencias llegaran a ser de la misma magnitud, provocando resonancia en el sistema, en la figura IV.1 se representan los circuitos de resonancia en paralelo (a) y resonancia en serie (b) [18] [19].

Figura IV. 1 A) circuito resonancia en paralelo y B) circuito resonancia en serie



Dado que la reactancia de los capacitores disminuye cuando crece la frecuencia, esto tiene como consecuencia que incremente el esfuerzo dieléctrico, por lo tanto, la temperatura tiende a incrementarse, haciendo que se fatiguen los materiales dieléctricos cuando son sometidos a sobretensiones por largos periodos de tiempo [18] [19].

**Efecto sobre los motores:** Las maquinas rotativas síncronas y los motores de inducción sufren incrementos de temperatura debido a las perdidas en el hierro y cobre por las altas frecuencias a consecuencia de los armónicos, afectando tanto al torque como a la eficiencia del equipo [18] [19].

La corriente armónica que se inyectan a los motores provocando un aumento de ruidos audibles, además sufrirá un aumento de las de Foucault. Si algún armónico es de secuencia negativa, como podría ser el 5° y el 11° armónico el campo rotativo que se genera es de sentido contrario al giro del motor, reduciendo el par y la eficiencia del motor [18] [19].

Por otro lado, se generan pares pulsantes que ocasionan vibraciones mecánicas producidas por la interacción de los campos magnéticos rotatorios de los armónicos con el campo fundamental. Por ejemplo el quinto y el séptimo armónico pueden combinarse para producir una torsión en el rotor del generador a la frecuencia del sexto armónico en tanto se pueden crear resonancia mecánica de frecuencia cercana a la eléctrica provocando altas fuerzas mecánica en algunas partes del motor [18] [19].

**Efecto en interruptores:** Los fusibles e interruptores termomagnéticos funcionan con la temperatura producida por el flujo de corriente rms, cuando se sobrepasa la temperatura diseñada para la corriente rms,



## **“DISEÑO DE UN FILTRO ACTIVO DE ARMÓNICOS PARA INVERSOR FV CONECTADO AL SEN”**

---

la protección abre el circuito, por consiguiente, el efecto del aumento de la temperatura adicional ocasionado por los armónicos puede provocar disparos de las protecciones inexplicables [18] [19].

**Efecto en las barras de neutros:** Es el punto de unión de los neutros de cargas monofásicas, siendo el caso ideal, que las cargas estén balanceadas, las corrientes (fundamental y armónicas) de secuencia positiva y negativa se cancelan en este punto, pero como en el mundo físico es muy difícil encontrar un caso ideal, estas barras pueden llegar sobrecargarse por el efecto de cancelación de las componentes armónicas de secuencia positiva y negativa entre los conductores neutros no balanceados [18] [19].

Las corrientes de secuencia cero, llamadas también armónicas triplen, no se cancelan, aunque las condiciones estén balanceadas, por lo que estas barras pueden llegar sobrecargarse. Lo que sucede en la barra de neutros es la circulación de corrientes de secuencia positiva y negativa producidas por el desbalance de cargas más las armónicas triplen de secuencia cero, por lo tanto, las barras que están diseñadas para soportar la misma corriente de fase pueden sobrecargarse fácilmente en presencia de cargas no lineales [18] [19].

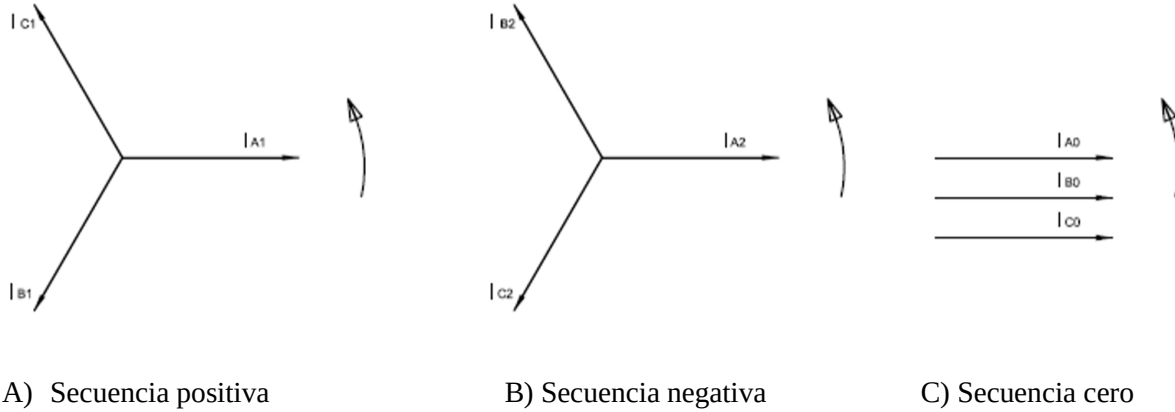
**Efecto en otros equipos:** Los equipos electrónicos sensitivos pueden trabajar de manera incorrecta por consecuencia de los armónicos, por ejemplo, algunos equipos utilizan la determinación precisa del cruce por cero del voltaje u otros aspectos de la forma de onda de este, por lo que al existir distorsión armónica puede que afecten a la correcta operación de la protección [18] [19].

El equipo de medición e instrumentación se ven afectados principalmente si existe resonancia que provoquen grandes voltajes armónicos, para el caso de los medidores las lecturas pueden ser erróneas dependiendo del medidor y de las corrientes armónicas involucradas [18] [19].

### **IV.3 Secuencia de los armónicos**

En corriente alterna la componente fundamental del voltaje de suministro normalmente constata de tres fases desfasadas  $120^\circ$  grados eléctricos entre cada una de ellas, de manera que la secuencia que lleva es primero la fase A es seguida por la fase C y por último la fase B, cada una separa  $120^\circ$ , siendo una secuencia A-C-B, también conocida como secuencia positiva, la componente fundamental de corriente lleva esta misma secuencia. Por el lado contrario tenemos la secuencia A-B-C, también llamada secuencia negativa y por último existe una secuencia llamada cero la cual consiste en tres vectores de magnitudes iguales con desplazamiento de fase cero uno con otros, una representación gráfica se muestra en la gráfica IV.4 [19].

Figura IV. 2 Secuencia de las corrientes armónicas en sistemas balanceados



Un sistema trifásico de corrientes no sinusoidales (corrientes armónicas), así como la corriente fundamental, cuentan con su propia secuencia. Para estudiar estas tres corrientes es necesario aplicar la descomposición en series de Fourier, haciendo que cada una de ellas sea igual a la suma de infinitos armónicos, los cuales varían sinusoidalmente en el tiempo con frecuencias diferentes unos de los otros [19].

Entonces, el teorema de Fourier establece que toda onda periódica no sinusoidal puede ser descompuesta como la suma de ondas sinusoidales, por lo tanto, si expresamos a la corriente como una serie de Fourier infinita dada por el sistema de ecuaciones:

$$\begin{aligned}
 i_a &= \sum_{h=1}^{\infty} \sqrt{2} I_h \cos(h\omega t) \\
 i_b &= \sum_{h=1}^{\infty} \sqrt{2} I_h \cos\left(h\omega t - h\frac{2\pi}{3}\right) \\
 i_c &= \sum_{h=1}^{\infty} \sqrt{2} I_h \cos\left(h\omega t + h\frac{2\pi}{3}\right)
 \end{aligned}$$

En donde se aprecia que el ángulo de fase es afectado el número de armónica ( $h$ ), así observamos que para  $h=2$ , el desfaseamiento será  $2(0^\circ)$  fase A,  $2(-120^\circ)$  fase B y  $2(120^\circ)$  fase C, siendo que para la segunda armónica se observa que es de secuencia negativa. Para el tercer armónico ( $h=3$ ), se obtiene  $3(0^\circ)$ ,  $3(-120^\circ)$  y  $3(120^\circ)$ , dando como resultado  $360^\circ$  en cada una de las fases, esto indica que es de “secuencia



## “DISEÑO DE UN FILTRO ACTIVO DE ARMONICOS PARA INVERSOR FV CONECTADO AL SEN”

cero”, es decir todas las fases giran sin ninguna desfase entre ellas, para el caso de la cuarta armónica ( $h=4$ ) vuelve a ser secuencia positiva, así sucesivamente, este patrón es periódico y para sistemas trifásicos desfasados  $120^\circ$  grados, como se representa en la tabla IV.1 [19].

Tabla IV. 1 Secuencia de las corrientes armónicas en sistemas balanceados

| Armónica | Secuencia | Armónica | Secuencia | Armónica | Secuencia |
|----------|-----------|----------|-----------|----------|-----------|
| 1        | Positiva  | 6        | Cero      | 11       | Negativa  |
| 2        | Negativa  | 7        | Positiva  | 12       | Cero      |
| 3        | Cero      | 8        | Negativa  | 13       | Positiva  |
| 4        | Positiva  | 9        | Cero      | 14       | Negativa  |
| 5        | Negativa  | 10       | Positiva  | 15       | Cero      |

La secuencia que sigue cada armónico es importante ya que de esta manera se pueden analizar sus efectos, obteniendo las siguientes conclusiones.

- En sistemas trifásicos, los armónicos de secuencia cero de corriente solo se pueden propagar cuando es posible un retorno por neutro.
- Los armónicos de secuencia positiva en tensión generan en los motores un campo giratorio en el mismo sentido de la componente fundamental
- Los armónicos de secuencia negativa en tensión generan en los motores un campo giratorio en sentido contrario al generado por la componente fundamental

### IV.4 Impedancia en Función de la Frecuencia

Cuando existe presencia de armónicos en aplicaciones donde se ocupan capacitores se puede presentar resonancia eléctrica. En la frecuencia de resonancia de un circuito LC, la reactancia inductiva se hace igual a la capacitiva [20] [21].

En circuitos donde se utilizan capacitores para la corrección del factor de potencia o el mejoramiento del perfil de tensiones pueden presentarse problemas de resonancia serie, paralelo o una combinación de ambas, esto depende del diseño del circuito [20].

En la resonancia en paralelo, la impedancia total a la frecuencia de resonancia es demasiado alta, teóricamente tiende a infinito. Así al aplicar excitación a través de una fuente de corriente externa a la frecuencia de resonancia, se producirá una elevada corriente que estará circulando entre el capacitor y la inductancia en paralelo, logrando que el voltaje a través del paralelo se incremente [20].



## **“DISEÑO DE UN FILTRO ACTIVO DE ARMONICOS PARA INVERSOR FV CONECTADO AL SEN”**

---

De esta manera, si la frecuencia generada por la fuente armónica entra en resonancia con circuitos serie y/o paralelo, puede generar una corriente armónica excesiva y/o sobretensión armónica. Este fenómeno hace que los capacitores fallen o se dañen, en los fusibles de los bancos de capacitores hace que se disparen las de manera constante, calentamiento excesivo en los transformadores y rupturas dieléctricas en cables aislados [20]

La impedancia es un parámetro de los que más varía con la frecuencia por el hecho de que en los conductores el efecto skin crece proporcionalmente con la frecuencia. La corrección por efecto skin es necesaria para resonancias en frecuencias medianamente altas y altas su efecto en todo caso debe ser tenido en cuenta siempre [21]

### **IV.5 Índices para la medición de armónicos**

Para el estudio y análisis de los efectos que producen los armónicos se utilizan índices que cuantifican el nivel de contaminación armónica de las ondas, estos índices son comparados con valores límites dados por las normas o con valores de soportabilidad de los equipos. Estos índices se presentan a continuación

#### **IV.5.1 Índices para armónicos de corriente**

Para la corriente existen tres tipos de índices, el de valor RMS, distorsión armónica individual y los de distorsión armónica total [21]

El valor RMS o valor eficaz sirve para cuantificar la naturaleza de la forma de onda mediante su valor efectivo y se define como la raíz cuadrada de la suma de los cuadrados de cada componente [21]:

$$I_{RMS} = \sqrt{\sum_{h=1}^N I_h^2}$$

Donde:

$I_{RMS}$  = Valor Eficaz o RMS.

$h$  = orden armónico.

$N$  = enésimo armónico.

$I_N$  = enésima corriente armónica.



## “DISEÑO DE UN FILTRO ACTIVO DE ARMONICOS PARA INVERSOR FV CONECTADO AL SEN”

---

El índice de distorsión armónica individual es el porcentaje de distorsión de orden  $h$  con respecto a la fundamental y se define matemáticamente con la ecuación [21]:

$$D_i = \frac{I_h}{I_1} \times 100 \%$$

Donde:

$D_i$  = Distorsión armónica individual de corriente.

$I_h$  = Corriente armónica individual.

$I_1$  = Corriente nominal.

La distorsión armónica total (THD) es la relación entre el contenido armónico de la señal y la primera armónica o fundamental, matemáticamente se resume a con la siguiente ecuación [21]:

$$THD_I = \frac{1}{I_1} \sqrt{\sum_{h=2}^N (I_h)^2} \times 100\%$$

Donde:

$THD_I$  = Distorsión armónica total de corriente.

$I_1$  = corriente nominal.

$h$  = orden armónico.

$N$  = enésimo armónico.

$I_h$  = Corriente armónica individual.

La distorsión de demanda total es la relación que existe en la corriente armónica y la demanda máxima de la corriente de carga [21].

Cuando se toman mediciones de armónicos en un sistema eléctrico, se pueden encontrar niveles de THD altos en condiciones de baja carga que no afectan la operación de los equipos, ya que la energía distorsionante que fluye es baja. Para evaluar adecuadamente se define el TDD que es el parámetro de referencia que establece los límites aceptables de distorsión en corriente en la norma IEEE 519 [22].



## “DISEÑO DE UN FILTRO ACTIVO DE ARMONICOS PARA INVERSOR FV CONECTADO AL SEN”

$$TDD = \frac{I}{I_L} \sqrt{\sum_{h=2}^N (I_h)^2} \times 100\%$$

Donde:

$TDD$  = Distorsión de demanda total

$I_h$  = Corriente armónica individual.

$h$  = Orden armónico.

$I_L$  = Demanda máxima de la corriente fundamental de carga, que se calcula como el promedio máximo mensual de demanda de corriente de los 12 últimos meses o puede estimarse [21].

### IV.5.2 Índices para armónicos de tensión

Para los índices armónicos de tensión prácticamente se utilizan los mismos índices que se utilizan para corriente, con la diferencia de que se utiliza el voltaje en vez de la intensidad, por lo tanto las definiciones son aplicables para los índices de tensión [21].

Valor RMS en tensión:

$$V_{RMS} = \sqrt{\sum_{h=1}^N V_N^2}$$

Donde:

$V_{RMS}$  = Valor Eficaz o RMS.

$h$  = orden armónico.

$N$  = enésimo armónico.

$V_N$  = enésimo voltaje armónico.

El índice de distorsión armónica individual de tensión se define mediante la siguiente ecuación:

$$D_v = \frac{V_i}{V_n} \times 100\%$$

Donde:



## “DISEÑO DE UN FILTRO ACTIVO DE ARMONICOS PARA INVERSOR FV CONECTADO AL SEN”

---

$D_v$  = Distorsión armónica individual de tensión.

$V_i$  = Tensión armónica individual.

$V_n$  = Tensión nominal.

El índice de distorsión armónica total de tensión se define como:

$$THD_v = \frac{1}{V_1} \sqrt{\sum_{h=2}^N (V_h)^2} \times 100\%$$

Donde:

$THD_v$  = Distorsión armónica total de voltaje.

$V_1$  = Voltaje nominal.

$h$  = Orden armónico.

$N$  = Enésimo armónico.

$V_h$  = Voltaje armónico individual.

### IV.6 Armónicos y factor de potencia

Cuando presencia de armónicos en una instalación eléctrica, se puede distorsionar la lectura del factor de potencia e incrementar la lectura de la potencia aparente, provocando que el factor de potencia disminuya. El factor de potencia con presencia de armónicos está representado matemáticamente con la siguiente ecuación [21]:

$$F.P. = \frac{P}{S} = \frac{P}{V \times I_{RMS}} = \frac{P}{V \times \sqrt{I_1^2 + I_2^2 + \dots + I_N^2}}$$

Donde:

$F.P.$  = Factor de potencia.

$P$  = Potencia Activa.

$S$  = Potencia Aparente.



## “DISEÑO DE UN FILTRO ACTIVO DE ARMONICOS PARA INVERSOR FV CONECTADO AL SEN”

$V$  = Voltaje.

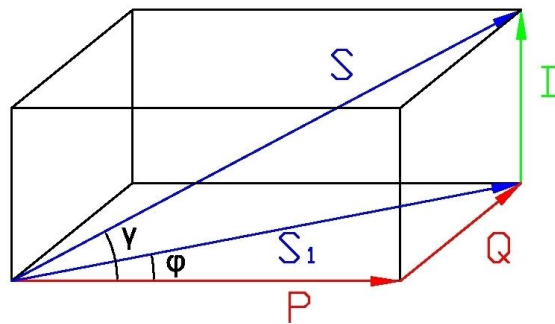
$I_{rms}$  = Valor eficaz de la corriente.

$I$  = Corriente

En la Figura IV.2 se muestra una representación gráfica del factor de potencia con presencia de armónicos. La potencia reactiva  $Q$  está dada por las componentes fundamentales de corriente y tensión, mientras que los contenidos armónicos generan la componente  $D$ , por lo tanto, la potencia aparente total  $S$ , está dado por [20]:

$$S_{total}^2 = P^2 + Q^2 + D^2$$

Figura IV. 3 Factor de potencia en presencia de armónicos.



### IV.7 Niveles de armónicas permitidos por las normas

Para asegurar la calidad de la potencia en sistema eléctrico de potencia, es necesario conocer y establecer los límites permitidos de distorsión armónica que apliquen tanto a los usuarios como a los suministradores de energía, esto con el fin de mantener la confiabilidad del SEP.

La comunicación entre el suministrador y el consumidor debe ser clara, ya que los dos deben de entender la importancia de mantener unos niveles bajos de distorsión armónica, por lo tanto, el suministrador tiene el derecho a pedir al usuario que limite la contaminación al sistema de transmisión y distribución, mientras que el usuario tiene el derecho de pedir calidad en la potencia suministrada.



## “DISEÑO DE UN FILTRO ACTIVO DE ARMONICOS PARA INVERSOR FV CONECTADO AL SEN”

En México existe el código red publicado por la comisión reguladora de energía (CRE), que establece los límites permisibles de armónicos en el sistema, esta a su vez se apoyó de 2 normas, la norma CFE L0000-45 y los estándares de la IEEE 519-1992 [22] [23].

Ambas normativas están diseñadas para limitar las corrientes armónicas de cada usuario de manera individual de forma que los niveles armónicos en voltaje en la totalidad del sistema eléctrico de potencia sean adecuados, compartiendo la responsabilidad tanto el suministrador como los usuarios [22] [23].

El Suministrador tiene la responsabilidad de que la distorsión armónica total en voltaje  $THD_v$  este dentro de los límites establecidos en el punto de la acometida, por lo que debe asegurar que las condiciones de resonancia en el sistema de generación, transmisión o distribución no ocasionen niveles inadecuados de distorsión en voltaje [23].

Los usuarios deben ser conscientes de asegurar que, en el punto de la acometida, su generación de armónicas de corriente se encuentre dentro de los límites que la normas establecen, tanto para componentes de armónicas individuales como para la distorsión de demanda total TDD, especificando los límites como porcentaje de la demanda promedio de corriente del usuario en lugar de la corriente fundamental instantánea, con el fin de proporcionar una base común de evaluación a lo largo del tiempo [23].

### IV.7.1 Límites de distorsión en voltaje

La norma CFE L0000-45 establece un periodo mínimo de monitoreo de una semana, en este periodo se pueden obtener valores estadísticos de mediciones de magnitud: Máximos, mínimos, promedios, valores más frecuentes, entre otros [23].

Un exceso en la medición de promedios podría ocasionar una pérdida de información, cuando las armónicas solo se presentan durante un instante del ciclo de carga.

Esta norma también establece la medición de la deformación de las ondas de tensión y corrientes en los sistemas eléctricos, ya que se requiere para llevar un reporte de estas para la correcta supervisión de los niveles de distorsión armónica presentes en las redes e instalaciones eléctricas, esto para verificar que están dentro de los límites de esta norma. En la tabla IV.2 se muestran los límites permisibles de distorsión armónica de tensión de acuerdo con CFE L0000-45 [23].

Tabla IV. 2 Límites de distorsión Armónica en Voltaje en % del voltaje nominal (CFE L0000-45)

| Nivel de tensión en la acometida ( $V_n$ ) | Distorsión armónica individual | Distorsión armónica total THD $V_n$ |
|--------------------------------------------|--------------------------------|-------------------------------------|
| $V_n \leq 1 \text{ kV}$                    | 5.0 %                          | 8.0 %                               |
| $1 \text{ kV} < V_n \leq 69 \text{ kV}$    | 3.0 %                          | 5.0 %                               |



## **“DISEÑO DE UN FILTRO ACTIVO DE ARMONICOS PARA INVERSOR FV CONECTADO AL SEN”**

|                                           |       |       |
|-------------------------------------------|-------|-------|
| $69 \text{ kV} < V_n \leq 138 \text{ kV}$ | 1.5 % | 2.5 % |
| $V_n > 138 \text{ kV}$                    | 1.0%  | 1.5%  |

Para la norma IEEE 519-1992 se establecen los límites permisibles de voltaje en la tabla IV.3, que se muestra a continuación [22].

**Tabla IV. 3 límites de distorsión Armónica en Voltaje en % del voltaje nominal (IEEE 519-1992)**

| <b>Nivel de tensión en la acometida (<math>V_N</math>)</b> | <b>Distorsión armónica individual</b> | <b>Distorsión armónica total THD <math>V_n</math></b> |
|------------------------------------------------------------|---------------------------------------|-------------------------------------------------------|
| $V_n \leq 69 \text{ kV}$                                   | 3.0 %                                 | 5.0 %                                                 |
| $69 \text{ kV} < V_n \leq 161 \text{ kV}$                  | 1.5 %                                 | 2.5 %                                                 |
| $V_n > 161 \text{ kV}$                                     | 1.0 %                                 | 1.5 %                                                 |

### **IV.7.2 Límites de distorsión en Corriente**

Los límites de corrientes armónicas para cada usuario son evaluados en la acometida y estos límites se establecen en base a la relación entre la corriente de cortocircuito y la demanda máxima de corriente de la carga del usuario [23].

Para la corriente de cortocircuito se debe utilizar aquella que, bajo condiciones normales de operación, resulte en la mínima corriente de cortocircuito en la acometida, ya que este valor reduce la relación  $I_{cc}/I_L$ , por lo tanto, la evaluación es más holgada [23].

La demanda máxima de corriente fundamental ( $I_L$ ) en la acometida se puede calcular como el promedio de las demandas máximas de corriente mensuales de los últimos 12 meses o puede estimarse para usuarios que inician su operación [23].

Los límites son más estrictos para los usuarios que representan mayor carga al sistema, por la relación  $I_{cc}/I_L$ , ya que esta es menor [23].



## **“DISEÑO DE UN FILTRO ACTIVO DE ARMONICOS PARA INVERSOR FV CONECTADO AL SEN”**

Los sistemas de mayor robustez pueden transmitir mayores niveles de corrientes armónicas sin producir distorsiones excesivas de voltaje que los sistemas más débiles.

Para la norma CFE L0000-45 se establecen los límites permisibles de corriente en la tabla IV.4, que se muestra a continuación [23].:

**Tabla IV. 4 límites de la distorsión armónica en corriente en la acometida (CFE L0000-45).**

| $I_{CC}/I_L$                   | TDD    | $h < 11$ | $11 \leq h < 17$ | $17 \leq h < 23$ | $23 \leq h < 35$ | $h \geq 35$ |
|--------------------------------|--------|----------|------------------|------------------|------------------|-------------|
| $V_n \leq 69 \text{ kV}$       |        |          |                  |                  |                  |             |
| $I_{CC}/I_L < 20$              | 5.0 %  | 4.0 %    | 2.0 %            | 1.5 %            | 0.6 %            | 0.3 %       |
| $20 < I_{CC}/I_L < 50$         | 6.0 %  | 7.0 %    | 3.5 %            | 2.5 %            | 1.0 %            | 0.5 %       |
| $50 < I_{CC}/I_L < 100$        | 12.0 % | 10.0 %   | 4.5 %            | 4.0 %            | 1.5 %            | 0.7 %       |
| $100 < I_{CC}/I_L < 1000$      | 15.0 % | 12.0 %   | 5.5 %            | 5.0 %            | 2.0 %            | 1.0 %       |
| $I_{CC}/I_L \geq 1000$         | 20.0 % | 15.0 %   | 7.0 %            | 6.0 %            | 2.5 %            | 1.4 %       |
| $69 < V_n \leq 161 \text{ kV}$ |        |          |                  |                  |                  |             |
| $I_{CC}/I_L < 20$              | 2.5 %  | 2.0 %    | 1.0 %            | 0.75 %           | 0.3 %            | 0.15 %      |
| $20 < I_{CC}/I_L < 50$         | 4.0 %  | 3.5 %    | 1.75 %           | 1.25 %           | 0.5 %            | 0.25 %      |
| $50 < I_{CC}/I_L < 100$        | 6.0 %  | 5.0 %    | 2.25 %           | 2.0 %            | 0.75 %           | 0.35 %      |
| $100 < I_{CC}/I_L < 1000$      | 7.5 %  | 6.0 %    | 2.75 %           | 2.5 %            | 1.0 %            | 0.5 %       |
| $I_{CC}/I_L \geq 1000$         | 10.0 % | 7.5 %    | 3.5 %            | 3.0 %            | 1.25 %           | 0.7 %       |
| $V_n > 161 \text{ kV}$         |        |          |                  |                  |                  |             |
| $I_{CC}/I_L < 50$              | 2.5 %  | 2.0 %    | 1.0 %            | 0.75 %           | 0.3 %            | 0.15 %      |
| $I_{CC}/I_L \geq 50$           | 3.75 % | 3.0 %    | 1.5 %            | 1.15 %           | 0.45 %           | 0.22 %      |

- Para las armónicas pares, los límites son el 25% de los valores especificados en la tabla
- Los límites deben ser usados como el caso más desfavorable de operación normal. Para arranque de hornos eléctricos de arco, que toman un tiempo máximo de un minuto, se permite exceder los límites en 50%
- No se permiten corrientes de carga con componentes de corriente directa.
- $I_n$  = Magnitud de la armónica individual
- $I_L$  = Demanda máxima de la corriente fundamental de la carga
- $h$  = Orden armónico impar



## **“DISEÑO DE UN FILTRO ACTIVO DE ARMONICOS PARA INVERSOR FV CONECTADO AL SEN”**

Para la norma IEEE 519-1992 se establecen los límites permisibles de corriente en la tabla IV.5, que se muestra a continuación [22]:

**Tabla IV. 5 Límites de la distorsión armónica en corriente en la acometida (IEE 519)**

| $I_{CC}/I_L$                   | TDD    | $h < 11$ | $11 \leq h < 17$ | $17 \leq h < 23$ | $23 \leq h < 35$ | $h \geq 35$ |
|--------------------------------|--------|----------|------------------|------------------|------------------|-------------|
| $V_n \leq 69 \text{ kV}$       |        |          |                  |                  |                  |             |
| $I_{CC}/I_L < 20$              | 5.0 %  | 4.0 %    | 2.0 %            | 1.5 %            | 0.6 %            | 0.3 %       |
| $20 < I_{CC}/I_L \leq 50$      | 8.0 %  | 7.0 %    | 3.5 %            | 2.5 %            | 1.0 %            | 0.5 %       |
| $50 < I_{CC}/I_L \leq 100$     | 12.0 % | 10.0 %   | 4.5 %            | 4.0 %            | 1.5 %            | 0.7 %       |
| $100 < I_{CC}/I_L \leq 1000$   | 15.0 % | 12.0 %   | 5.5 %            | 5.0 %            | 2.0 %            | 1.0 %       |
| $I_{CC}/I_L > 1000$            | 20.0 % | 15.0 %   | 7.0 %            | 6.0 %            | 2.5 %            | 1.4 %       |
| $69 < V_n \leq 161 \text{ kV}$ |        |          |                  |                  |                  |             |
| $I_{CC}/I_L < 20^*$            | 2.5 %  | 2.0 %    | 1.0 %            | 0.75 %           | 0.3 %            | 0.15 %      |
| $20 < I_{CC}/I_L \leq 50$      | 4.0 %  | 3.5 %    | 1.75 %           | 1.25 %           | 0.5 %            | 0.25 %      |
| $50 < I_{CC}/I_L \leq 100$     | 6.0 %  | 5.0 %    | 2.25 %           | 2.0 %            | 0.75 %           | 0.35 %      |
| $100 < I_{CC}/I_L \leq 1000$   | 7.5 %  | 6.0 %    | 2.75 %           | 2.5 %            | 1.0 %            | 0.5 %       |
| $I_{CC}/I_L > 1000$            | 10.0 % | 7.5 %    | 3.5 %            | 3.0 %            | 1.25 %           | 0.7 %       |
| $V_n > 161 \text{ kV}$         |        |          |                  |                  |                  |             |
| $I_{CC}/I_L < 50$              | 2.5 %  | 2.0 %    | 1.0 %            | 0.75 %           | 0.3 %            | 0.15 %      |
| $I_{CC}/I_L \geq 50$           | 4.0 %  | 3.5 %    | 1.75 %           | 1.25 %           | 0.5 %            | 0.22 %      |

\* Todos los equipos de generación de energía están limitados a estos valores corriente, sin importar la relación  $I_{CC}/I_L$ .

- Para las armónicas pares, los límites son el 25% de los valores especificados en la tabla.

- No se permite la existencia de componentes de corriente directa, que corresponden a la armónica cero.

- Si las cargas que producen las armónicas utilizan convertidores con número de pulsos  $q$  mayor a 6, los límites indicados en la tabla incrementan por un factor  $\sqrt{q/6}$

$I_h$  = Magnitud de la armónica individual

$I_L$  = Demanda máxima de la corriente fundamental de la carga

$h$  = Orden armónico impar



## **“DISEÑO DE UN FILTRO ACTIVO DE ARMONICOS PARA INVERSOR FV CONECTADO AL SEN”**

---

### **IV.8 Armónicos eléctricos en generación fotovoltaica distribuida**

En la actualidad el crecimiento de la generación fotovoltaica distribuida está en un crecimiento exponencial tanto en el mundo como en México, esto por la importancia de la transición energética que se necesita para contrarrestar los efectos provocados por el cambio climático, pero esta nueva forma de generar energía trae consigo nuevos retos que son necesarios afrontar para poder adaptarlos al sistema eléctrico de potencia, ya que la infraestructura que se tiene actualmente no fue construida para este nuevo tipo de generación.

Los dispositivos de generación de energía fotovoltaica distribuida están conectados con la red eléctrica en el lado del usuario. Originalmente, era una red de distribución de energía que solo tenía energía en el lado de la red de transmisión. Ahora se ha convertido en una red eléctrica con fuentes de energía en ambos lados de la red fotovoltaica y la red de transmisión de energía [8].

Los armónicos se generarán cuando se cambia la estructura de la red de distribución original, lo que tendrá un impacto inevitable en la red de distribución. Si no hay medidas restrictivas correspondientes, entonces el equipo en el lado del usuario y el lado de la red estará en peligro, la seguridad de la fuente de alimentación se verá amenazada. Por lo tanto, el análisis y control de los armónicos es indispensable para la generación de energía fotovoltaica distribuida. Esto no solo puede proteger la red eléctrica y el equipo del usuario, sino también satisfacer a los usuarios con una buena calidad de la potencia [21].

El aumento de los armónicos aumentará las pérdidas del sistema, acelerará el envejecimiento de los equipos y afectará la calidad de la energía. Por lo tanto, es de gran importancia analizar los efectos armónicos de los sistemas de generación de energía fotovoltaica distribuida [21].

Algunos efectos adversos son resultado del sistema fotovoltaico conectado a la red, como un sistema de generación de energía descentralizado, y algunas características de la propia generación de energía fotovoltaica en la red del sistema de suministro de energía centralizado tradicional, como el efecto isla, el balance de energía reactiva, la contaminación por armónicos, etc. La contaminación armónica es un problema que debe resolverse para la operación segura y confiable de los sistemas fotovoltaicos conectados a la red [20] [21].

Los armónicos en los sistemas fotovoltaicos se generan principalmente durante el proceso de inversión de los inversores fotovoltaicos conectados a la red. Deteriorará los factores de potencia, el voltaje Distorsión de la forma de onda, aumento de la interferencia electromagnética y daño a la red. Y cuando el inversor fotovoltaico estaba funcionando con carga ligera, el contenido armónico de la salida del inversor aumentará significativamente, por debajo del 20% de la salida nominal, la tasa de distorsión armónica de corriente total superará el 5% [5] [7].

Cuando hay una gran cantidad de armónicos en la red de distribución, tendrá un efecto negativo, principalmente porque los armónicos interferirán con el funcionamiento normal de varios equipos eléctricos, a menudo causando ruido, sobrecalentamiento y vibración, y los aislarán del envejecimiento, acortamiento la vida útil y pueden ocurrir daños graves y fallas en el dispositivo [7].

En la actualidad, en la mayoría de los casos, los inversores al momento de transformar la corriente directa en corriente alterna, lo logran sin mayor problema y con logrando un nivel de armónicos dentro de las



## **“DISEÑO DE UN FILTRO ACTIVO DE ARMONICOS PARA INVERSOR FV CONECTADO AL SEN”**

---

normas establecidas, aunque en ciertas circunstancias se pueden presentar un aumento en la generación de armónicos.

Aunque este aumento de generación de armónicos no sobrepasa lo recomendado por la norma IEEE 519-1992, el aumento de la generación distribuida (GD), provoca que los armónicos inyectados por los sistemas solares son parcialmente aditivos y contribuyen aproximadamente con un 0,1 % a la distorsión armónica total (THD) en el terminal de alimentación. Significativo <sup>3</sup>, <sup>5</sup>, <sup>7</sup>, <sup>9</sup>, <sup>11</sup> y <sup>13</sup> se descubren los niveles armónicos. Aunque el sistema no está sujeto a un riesgo inmediato, la adición futura de generación distribuida (DG) basada en inversores junto con posibles condiciones resonantes presenta la perspectiva de un aumento en los niveles de distorsión armónica más allá de los límites [4] [5].

Pero, también existen casos específicos donde la generación de armónicos puede tener valores por encima de lo establecido por las normas. La distorsión armónica total y el factor de potencia frente al tiempo tienen una relación estrecha, es decir a Mayor distorsión armónica, mayor es la corriente total respecto a su componente fundamental, y por ello el factor de potencia disminuye [7].

Otro efecto que provoca la generación de armónicos, en específico la  $THD_i$  varía con la irradiancia, siendo muy sensible a esta, por lo tanto la generación de armónicos va en aumento cuando existe una menor irradiancia, esto hace que la generación sea susceptible al clima, al proceso natural del día-noche, y a otros agentes externos que puedan provocar sombras en los paneles solares [7].

### **IV.8.1 Efecto Isla**

Con el desarrollo de la generación fotovoltaica, cuando más y más sistemas de generación de energía están conectados a la red eléctrica, aparece un nuevo fenómeno de protección de la red eléctrica: el efecto isla, y su daño no puede ignorarse [5].

El efecto isla es un fenómeno que se da cuando en un sistema compuesto por uno o varios grupos de generación distribuida (GD) y cargas pierde su conexión con la red, pero la GD sigue suministrando potencia a esta parte de la red también llamada microrred. De este modo, la red eléctrica ya no puede controlar esa parte del sistema al estar aislada eléctricamente [5].

La aparición del fenómeno isla es uno de los principales inconvenientes de la GD. Que un sistema de GD esté operando en isla puede ocurrir, entre otras circunstancias, por:

- Falta en la red cercana al PCC dando apertura de desconexión, pero no es detectada por los sistemas de protección del convertidor.
- Apertura accidental debida al fallo en un equipo, cortando la conexión con la red.
- Cambios bruscos en la red de generación o demanda.
- Desconexión intencionada para servicios de mantenimiento.
- Error humano o actos vandálicos.



## **“DISEÑO DE UN FILTRO ACTIVO DE ARMONICOS PARA INVERSOR FV CONECTADO AL SEN”**

---

- Accidente natural.

Existen numerosas razones para la prevención y detección del modo isla de cualquier sistema de generación conectado a red. Seguridad, responsabilidad, prevención y mantener la calidad de la potencia suministrada son razones para que cualquier sistema de GD disponga de algún método efectivo para la detección de modo isla. Los clientes confían en la calidad de la energía recibida, por lo que es importante que un inversor conectado a la red pueda cambiar su modo de actuación en los sistemas de GD por los siguientes motivos [5].:

- Al desconectarse, la red ya no controla la tensión y la frecuencia de la potencia eléctrica suministrada por lo que el convertidor pasa a controlar dichos parámetros.
- Los elementos que forman parte de la denominada microrred pueden sufrir daños si las magnitudes de tensión y frecuencia difieren considerablemente de las nominales. La red eléctrica junto con el propietario del sistema de generación puede ser responsabilizados de los daños.
- Una isla no detectada puede suponer peligro para los trabajadores o personas a la hora de manipular una línea que se considera desconectada.

Hay que tener en cuenta la gran penetración de GD en la red eléctrica actual. Además, los pronósticos actuales indican que la GD tendrá un papel importante en el sistema eléctrico futuro. De ahí, la necesidad de incorporar a los inversores conectados a red un sistema de protección anti-isla para garantizar la seguridad.

Al producirse la situación de isla, los armónicos resultantes de la conmutación del convertidor circulan por la carga que tiene generalmente una mayor impedancia que la red. Al interactuar los armónicos con una alta impedancia producirá grandes armónicos en la tensión  $V_{PCC}$  que pueden ser detectados [5].

Al analizar las características de voltaje y frecuencia de la fuente de alimentación fotovoltaica conectada a la red antes y después de la operación en isla, se encuentra que cuando los criterios de balance de energía, voltaje, frecuencia, impedancia y fase fallan antes y después de la operación en isla, la suma de los armónicos de voltaje de orden bajo cambia significativamente [5].

### **IV.8.2 Armónicos y radiación solar**

Como es sabido la generación fotovoltaica tiene su característica intermitencia, ya que la radiación solar no es constante, esto provoca variaciones en la generación de energía provocando que se generen distorsiones armónicas, aunque la mayoría de los inversores pueden mantener estos armónicos dentro de los límites establecidos en las normas durante la mayor parte del tiempo, también existen estudios que demuestran que durante las primeras horas del día, que es cuando la radiación solar es mínima, pueden provocar que la distorsión armónica sea muy elevada [24].

Dos estudios hechos con diferentes inversores demuestran el punto anterior, el primero es un inversor StecaGrid 300, cuya potencia máxima de entrada es de 320 W, con dos paneles fotovoltaicos conectados en serie, que generan un máximo de 380 w. Para el segundo se utilizó un inversor marca SunnyBoy 1100

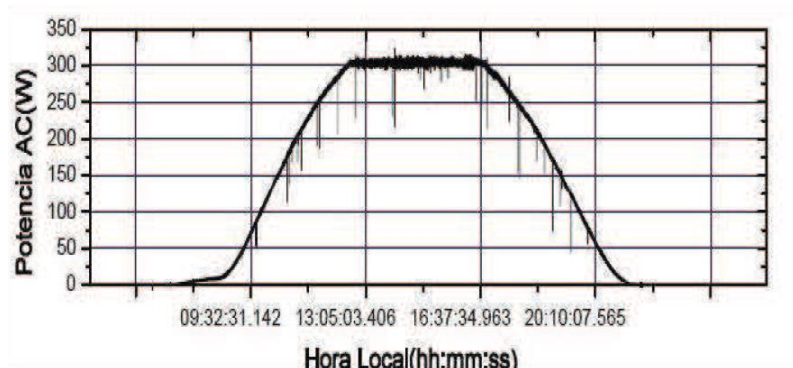


## “DISEÑO DE UN FILTRO ACTIVO DE ARMONICOS PARA INVERSOR FV CONECTADO AL SEN”

con una potencia máxima de 1220 W, para este inversor se utilizaron 4 paneles conectados en serie generando 760 W de potencia máxima [24].

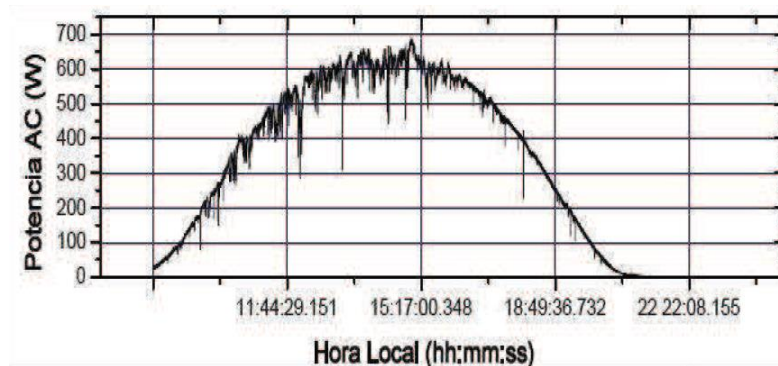
El Inversor StecaGrid 300 limita la potencia de entrada de los paneles a 320 W, por lo tanto, también se reduce la potencia de salida, como se muestra en la gráfica IV.5, donde se observa cómo se corta la curva de la potencia de salida y no pasa de 300 W [24].

Gráfica IV. 4 potencia de salida del inversor StecaGrid 300



Para el segundo caso con el inversor SunnyBoy 1100 no existe problema alguno con la generación de potencia, ya que puede aceptar toda la generación que aportan los paneles fotovoltaicos, como se muestra en la gráfica IV.5 [24].

Gráfica IV. 5 potencia de salida inversor SunnyBoy 1100



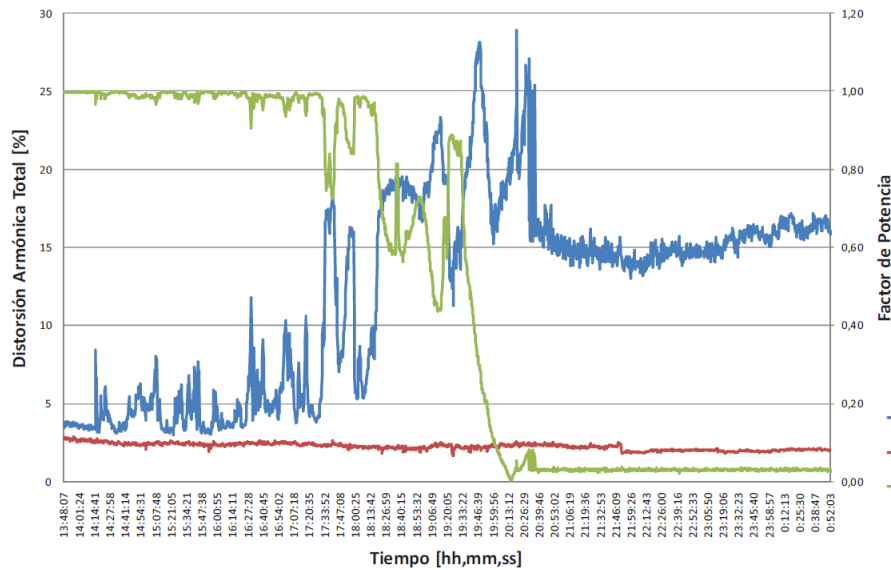
Se monitorio los armónicos generados por el inversor en el tiempo, en la gráfica IV.6 se puede observar las curvas de la distorsión armónica total de corriente y de tensión a la salida del inversor, así como el comportamiento del factor de potencia, el promedio de la distorsión armónica total de voltaje (THD<sub>v</sub>) es del 2.24% logrando mantenerse estable y continuo durante todo el ciclo. Al principio de la medición, que es aproximadamente a las 2 de la tarde, por lo tanto, la radiación solar es óptima para las celdas fotovoltaicas ya que reciben buena cantidad de radiación solar, de tal manera el inversor está en pleno



## “DISEÑO DE UN FILTRO ACTIVO DE ARMONICOS PARA INVERSOR FV CONECTADO AL SEN”

funcionamiento y la distorsión armónica a pesar de las fluctuaciones, se mantiene en cercanos al 5%. Cuando esto ocurre se nota que el factor de potencia es cercano a 1 [24].

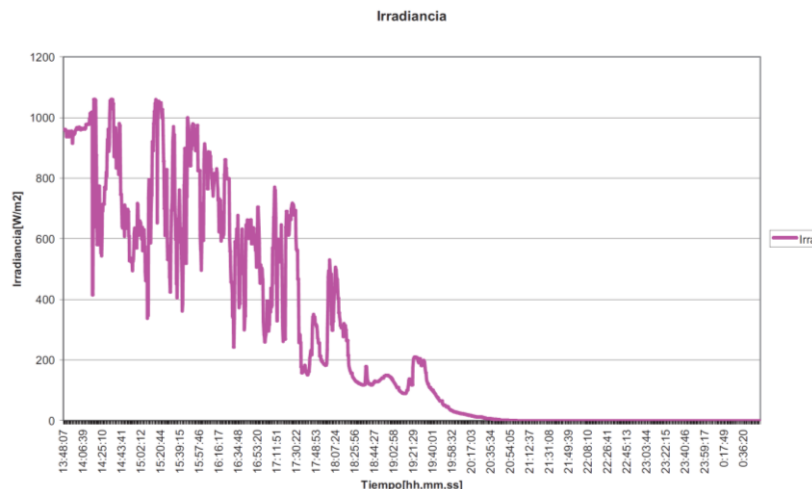
Gráfica IV. 6 THDi, THDv y FP frente al tiempo (SB 1100)



En la parte derecha de la gráfica IV.6, cuando los módulos fotovoltaicos están recibiendo una cantidad de luz solar en decremento e insuficiente para trabajar de manera óptima, se aprecia como el factor de potencia es casi 0 y la distorsión armónica total de corriente (THDi) se dispara hasta alcanzar un valor de 15%. El fp sufre esta bajada ya que, a mayor distorsión armónica, la corriente total aumenta respecto a su corriente fundamental y por ellos el factor de potencia disminuye [24].

La gráfica IV.7 se muestra cómo se va modificando la irradiancia durante el día, coincidiendo con las modificaciones de factor de potencia y THDi [24].

Gráfica IV. 7 Modificación de la irradiancia durante el tiempo (SB 1100)

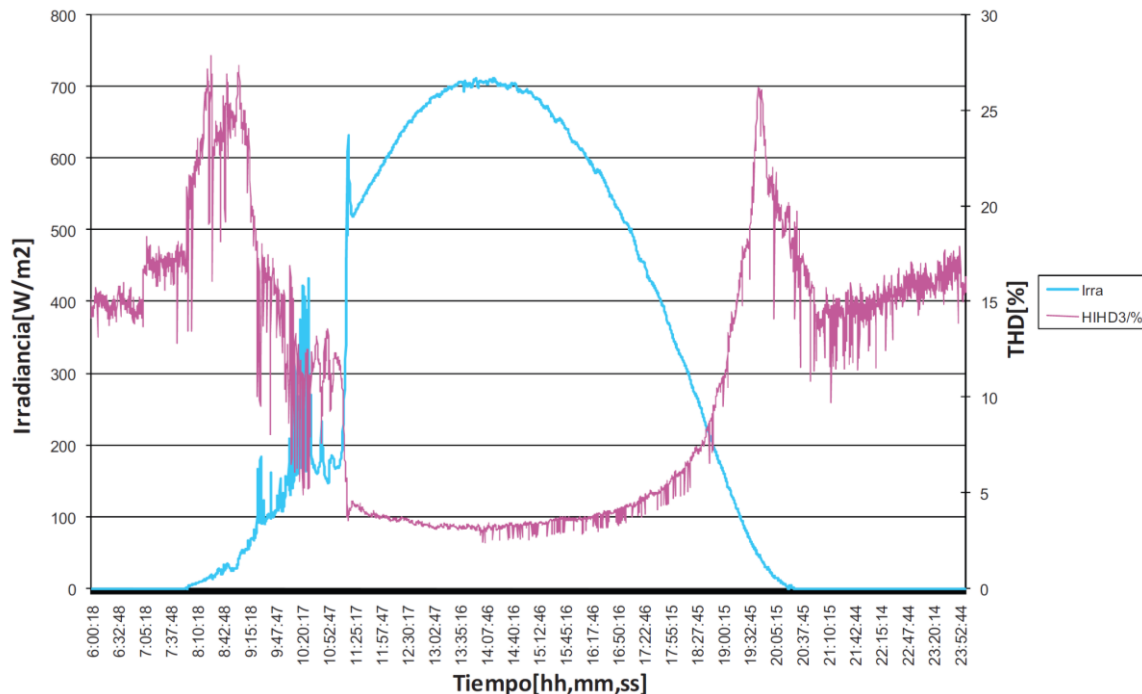




## “DISEÑO DE UN FILTRO ACTIVO DE ARMONICOS PARA INVERSOR FV CONECTADO AL SEN”

Se observa que la irradiancia es bastante irregular independientemente de que sea un día despejado y soleado, aunque también estas variaciones pueden deberse a que las mediciones se realizaron cada 20 segundos [24].

Gráfica IV. 8 Comparación de irradiancia y THDi (SB 1100)



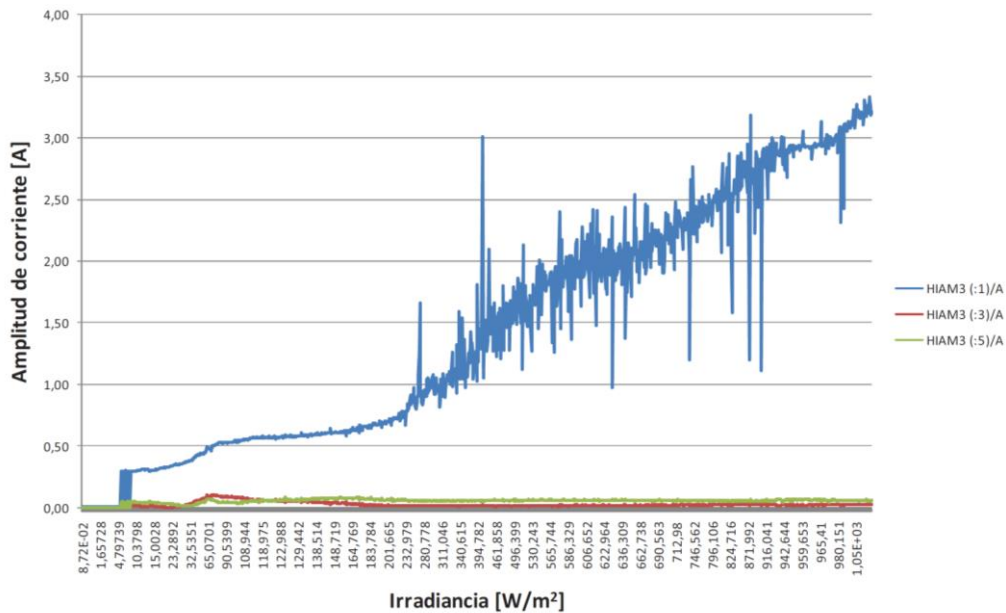
La grafica IV.8 muestra la comparativa entre la irradiancia y la generación de THDi, desde las 6 de la mañana hasta la media noche, apreciando la relación que existe entre una buena irradiancia y la poca generación de THDi, de lado contrario cuando la cantidad de irradiancia va en declive se observa un incremento considerable de corrientes armónicas, al grado de que el THDi puede alcanzar un pico del 25%, este pico ocurre justo cuando la irradiancia va a pasar ser 0, después a medida que transcurre el tiempo el valor se estabiliza a un 15% [24].

En las gráficas IV.9 e IV.10 se muestran los armónicos 1°, 2° y 3° de corriente con respecto a la irradiancia, ya que estos armónicos son los que más crean los disturbios, en cambio los demás armónicos impares pueden ser despreciables. Para los armónicos pares con los que se relacionan con la componente continua, por lo tanto, conforme a la teoría no deberían existir a la salida del sistema fotovoltaico [24].

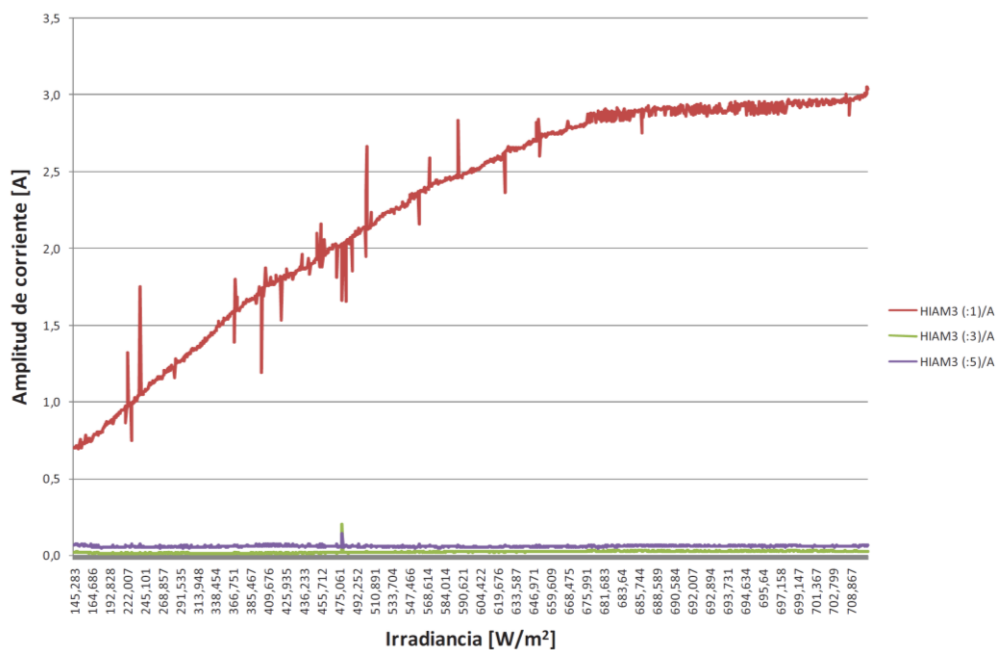
Como es sabido el amónico de orden 1 se refiere a la componente de corriente fundamental del sistema, el orden 0 de armónicos corresponde con la componente continua que existe en la señal, que en este caso, por tratarse de una corriente alterna debería ser cero [24].

## “DISEÑO DE UN FILTRO ACTIVO DE ARMÓNICOS PARA INVERSOR FV CONECTADO AL SEN”

Gráfica IV. 9 Amplitud de los armónicos de corriente de orden 1°, 2° y 3° respecto a la irradiancia (SB 1100)



Gráfica IV. 10 Armónicos 1°, 3° y 5° frente a la irradiancia (SB 1100)



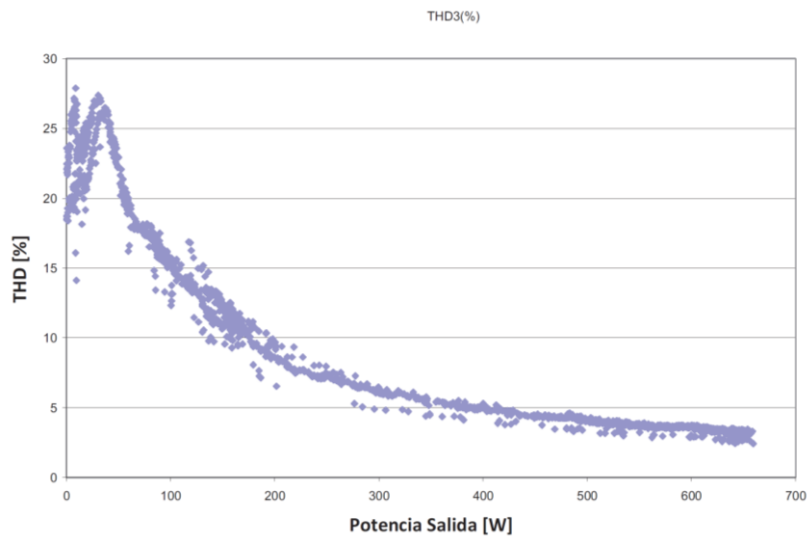
En ambas graficas se puede observar que la componente fundamental de la corriente varía con irradiancia de forma directa, sin embargo los armónicos de orden 3 y 5, continúan casi constantes a pesar del aumento de la irradiancia [24].



## “DISEÑO DE UN FILTRO ACTIVO DE ARMONICOS PARA INVERSOR FV CONECTADO AL SEN”

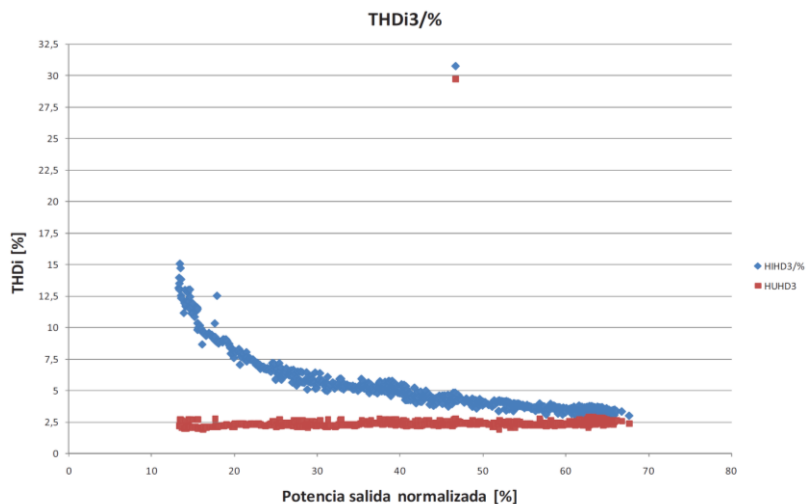
Normalmente la THD de corriente aumenta cuando disminuye la potencia de operación, como se muestra en la gráfica IV.11, donde se observa la relación que existe en la distorsión armónica total de corriente y la potencia en la salida del inversor fotovoltaico, en este caso, cuando se alcanza una potencia de 400 w, la THD<sub>i</sub> se estabiliza en valores inferiores al 5% [24].

Gráfica IV. 11 THDi respecto a la potencia de salida (SB 1100)



La gráfica IV.12 muestra un dato atípico de THD<sub>i</sub> de casi el 30%, por lo tanto de puede despreciar, lo importante a resaltar en esta grafica es que cuando la potencia es superior al 50%, el THD<sub>i</sub> se mantiene estable y en valores menores al 5%, de manera contraria para potencias menores al 50%, los armónicos de corriente pueden alcanzar valores muy altos [24].

Gráfica IV. 12 Gráfica IV.14 1 THDi y THDv respecto a la potencia CA normalizada





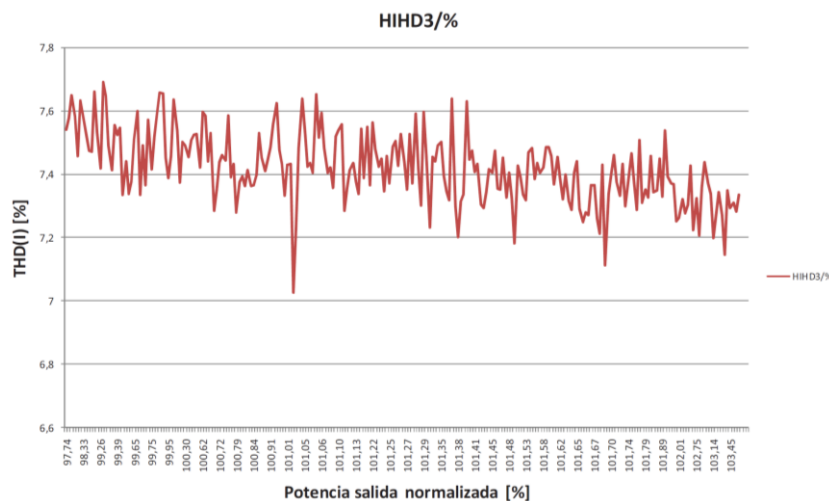
## “DISEÑO DE UN FILTRO ACTIVO DE ARMONICOS PARA INVERSOR FV CONECTADO AL SEN”

La potencia normalizada se obtuvo calculando respecto a la potencia nominal en corriente alterna, con la siguiente ecuación [24]:

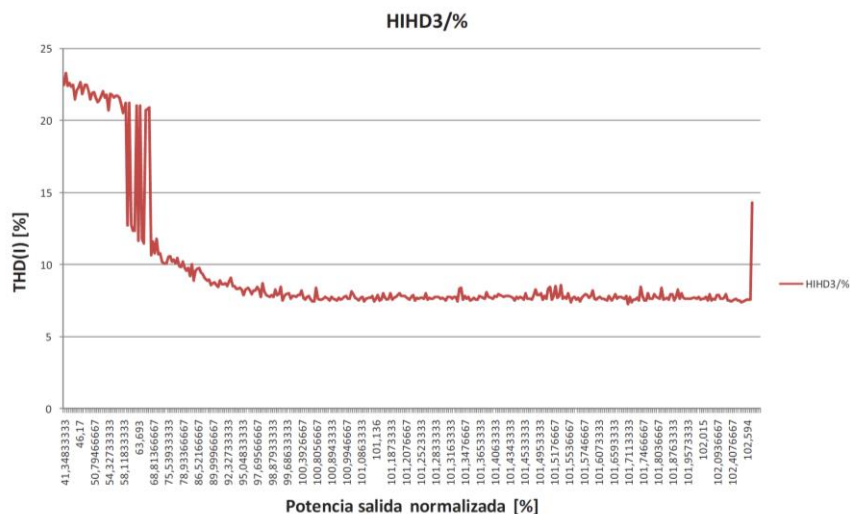
$$P_{CA}[\%] = \frac{P_{ACmedida}}{P_{ACnominal}} \times 100$$

Las gráficas IV.13 e IV.14 muestran la misma comparativa entre la THD<sub>i</sub> frente a la potencia normalizada, pero ahora con el inversor StecaGrid 300 [24].

Gráfica IV. 13 THD<sub>i</sub> frente a la potencia de salida (SG 300)



Gráfica IV. 14 THDi frente a la potencia de salida con una cantidad mayor de datos (SG 300)



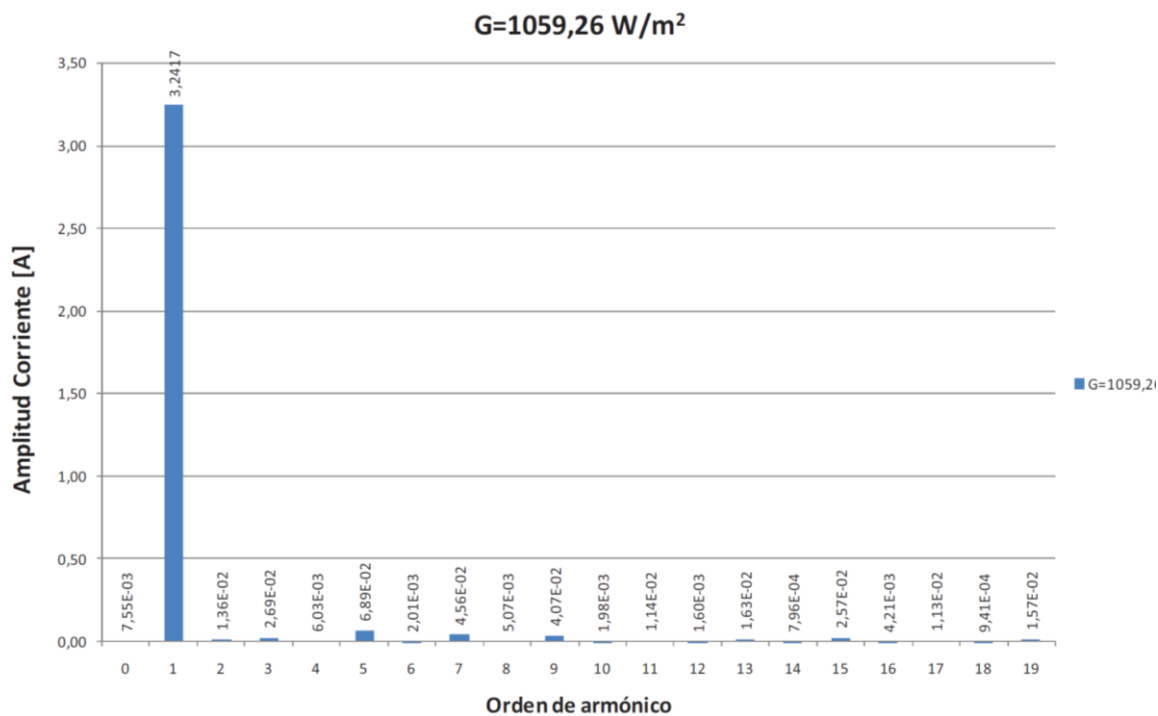


## “DISEÑO DE UN FILTRO ACTIVO DE ARMONICOS PARA INVERSOR FV CONECTADO AL SEN”

En el grafico IV.15 se puede apreciar una aparente estabilidad del  $THD_i$ , pero no se puede decir que son valores óptimos ya que rebasan el 5%, por lo tanto, están fuera de norma. En el grafico IV.16 que se cuenta con más datos de la potencia de salida, se pude apreciar que a potencias menores al 63% de la potencia normalizada, la  $THD_i$  se eleva a valores del más del doble que si estuviera trabajando de manera correcta. En este inversor también se observa que la respuesta de la  $THD_i$  respecto a la variación de la potencia de salida no es suave, sino que en potencias bajas la generación de armónicos de corriente aumenta bruscamente [24].

La gráfica IV.15 siguiente se representa el espectro de los primeros 20 armónicos de corriente cuando la irradiancia fue de  $1059.29 \text{ W/m}^2$ , una irradiancia optima para el buen funcionamiento del inversor [24].

Gráfica IV. 15 Espectro armónico para valor máximo de irradiancia (SB 1100)



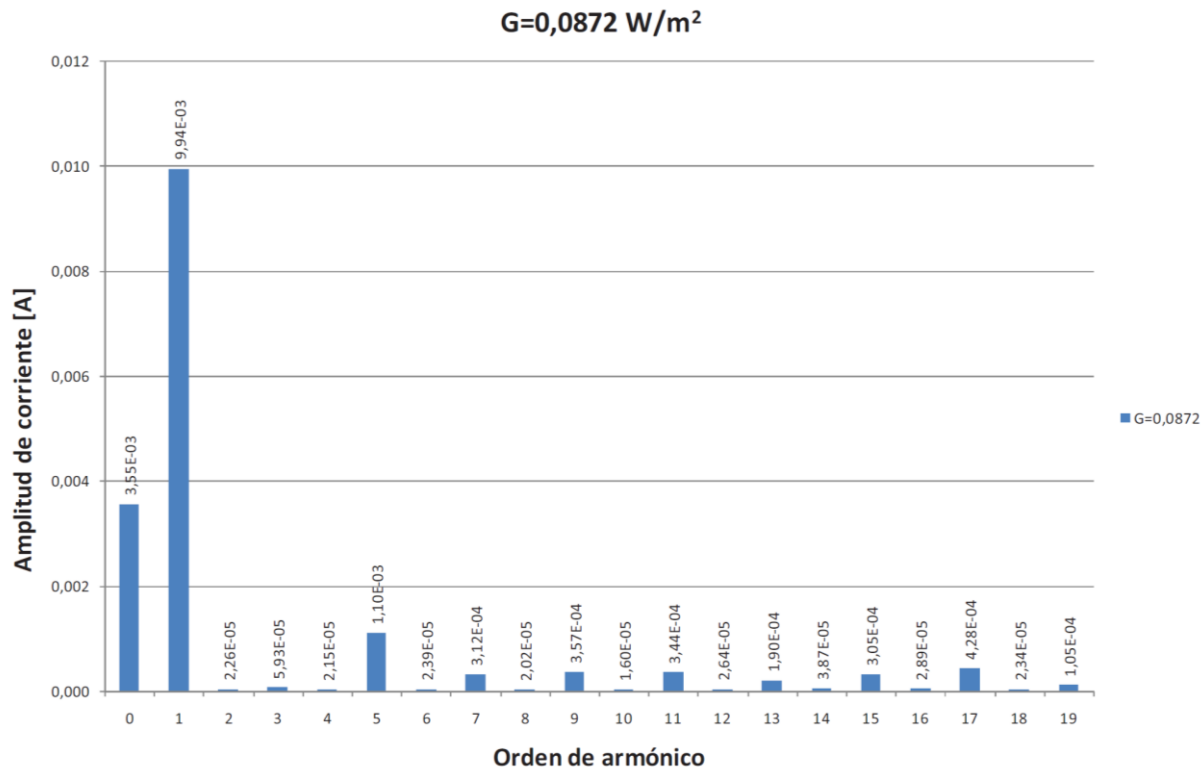
Como ya se me menciona el orden cero corresponde a la componente de corriente continua de salida, también se logra observar que el 5° armónico es el más destacado, pero está dentro de los límites establecidos y no causa una distorsión que pueda provocar daños en la calidad de la potencia, esto se debe a que la generación fotovoltaica está en un nivel óptimo, el problema viene cuando la irradiancia es insuficiente [24].



## “DISEÑO DE UN FILTRO ACTIVO DE ARMONICOS PARA INVERSOR FV CONECTADO AL SEN”

El grafico IV.16 muestra el espectro de los primero 20 armónicos cuando la irradiancia es el valor mínimo, es decir cuando empieza amanecer, en horas tempranas del día, con una irradiancia de  $8.72 \times 10^{-2} \text{ W/m}^2$  [24].

Gráfica IV. 16 Aspecto armónico cuando la irradiancia es mínima (SB 100)



A simple vista se puede observar una diferencia menor entre la corriente fundamental y el armónico de orden cero, aunque es de resaltar que la corriente fundamental es considerablemente menor que cuando la generación fotovoltaica es óptima es decir existe una irradiancia óptima para la generación [24].

La inyección de corriente continua CD (armónico de orden cero) a la red eléctrica es un efecto que no se desea ya que provoca diferentes problemas, tales como la saturación de transformadores, elevadas corrientes en los primarios de los transformadores, activación de protecciones, corrosión, calentamientos de las cargas, etc. [24].

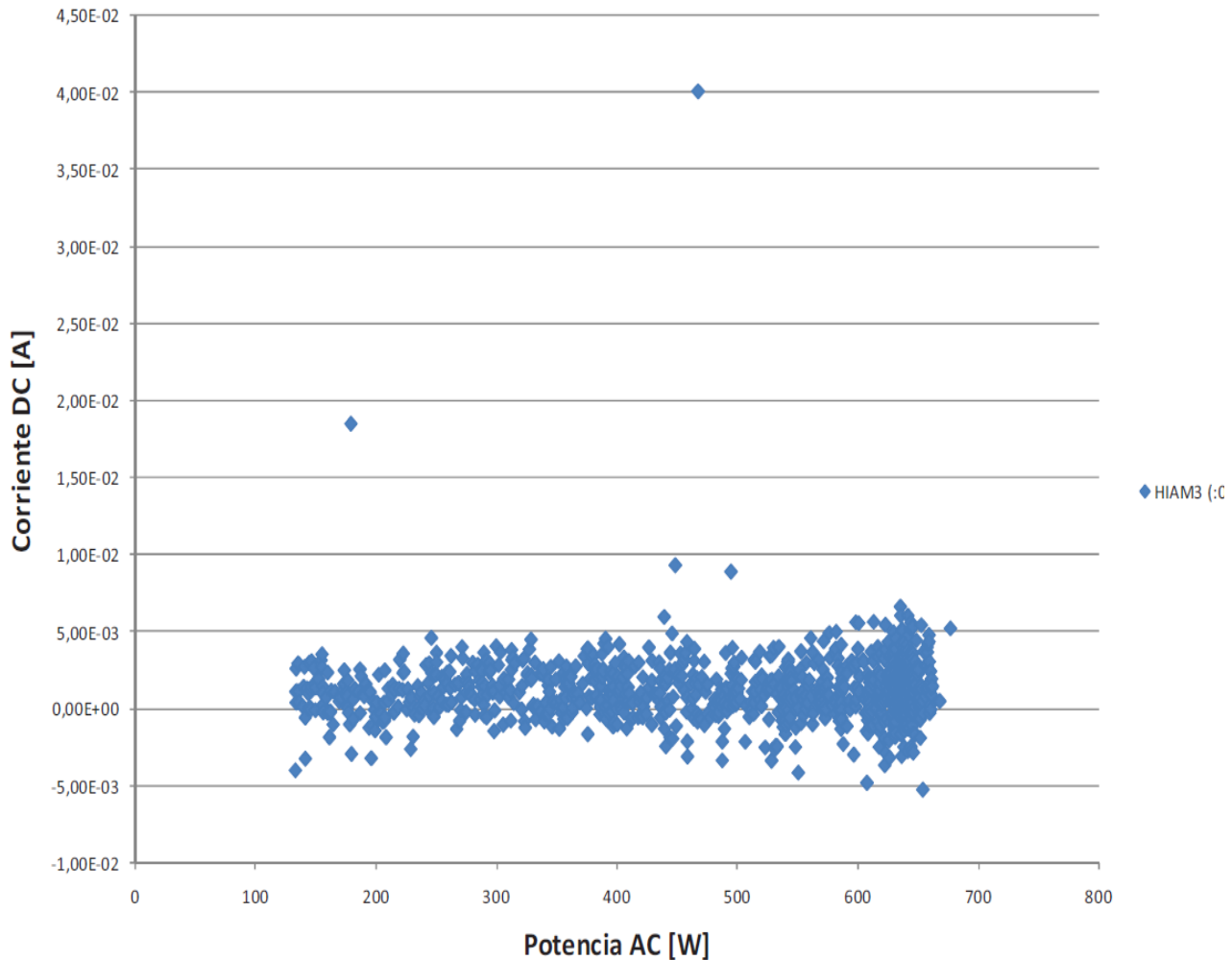
Es difícil diferencial de manera experimental la corriente directa generada por el inversor y la corriente directa que pudiese existir en la propia red eléctrica del sistema eléctrico de potencia, ya que la corriente directa del orden de mA superpuestas a corrientes eficaces del orden de decenas de amperios a expensas de la precisión como a la resolución del instrumento de medición a utilizar. También se tiene que tomar en cuenta que el transformador del inversor es un corto circuito para la corriente continua que pudiera provenir del mismo inversor, se puede suponer que en este caso la corriente continua a la salida del inversor es una corriente continua que proviene de la propia red eléctrica [24].



## “DISEÑO DE UN FILTRO ACTIVO DE ARMONICOS PARA INVERSOR FV CONECTADO AL SEN”

En la gráfica IV.17 se muestra el contenido de corrientes continua que inyecta el inversor SB 1100 a la red, donde se puede observar claramente el poco contenido de corriente continua que existe en la salida del inversor SunnyBoy 1100, el cual cuenta con un transformador integrado que actúa como freno para la corriente DC [24].

Gráfica IV. 17 corriente continua frente a la potencia AC (SB 1100)



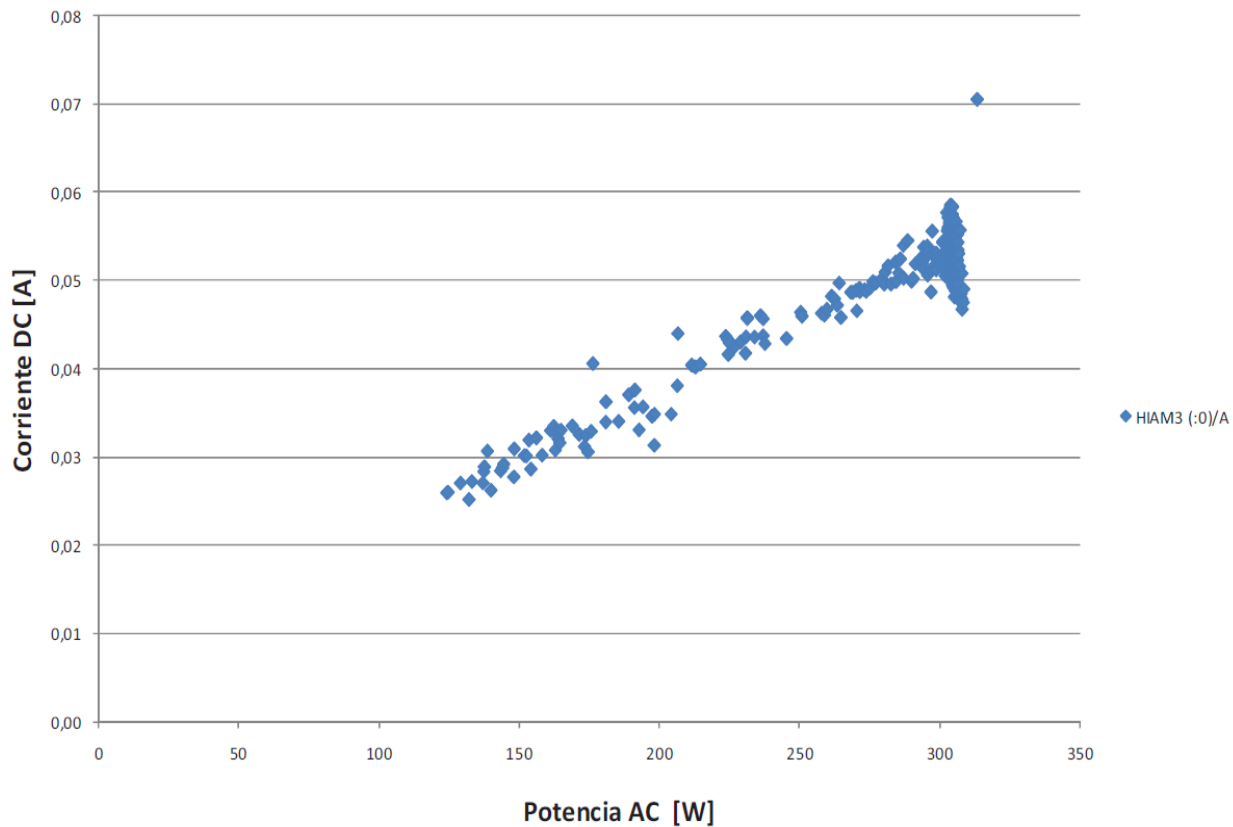
El valor medio se aprecia muy cercano a cero y descartando algunos valores atípicos, no supera los 5mA de corriente continua, además se nota un comportamiento estable y lineal, lo cual es una característica favorable a la hora del estudio [24].

La grafica IV.18 muestra el comportamiento del inversor StecaFrid 300, a que diferencia del ultimo inversor no cuenta con un transformadore, posee un valor elevado de corriente continua [24].



## “DISEÑO DE UN FILTRO ACTIVO DE ARMONICOS PARA INVERSOR FV CONECTADO AL SEN”

Gráfica IV. 18 corriente continua frente a la potencia AC (SG 300)



Se aprecia que la componente de corriente continua tiene un comportamiento ascendente según va aumentando la potencia de salida, lo cual provocara una serie de problemas en el funcionamiento del inversor. En este caso que la potencia máxima a la que puede llegar el inversor es de 300 W, el valor de la corriente continua es de alrededor de 60 mA, pero en el supuesto caso que el inversor lograra entregar mas potencia, la corriente continua aumentara proporcionalmente a la potencia de salida [24].



## **CAPÍTULO V**

### **Soluciones para disminuir el efecto de los armónicos**

#### **V.1 Introducción**

La solución para la problemática de la distorsión armónica no consiste en eliminar la fuente, ya que casi todos los aparatos de hoy en día contienen electrónica, por lo tanto, es prácticamente imposible eliminar la fuente creadora de armónicos. Lo que sí es posible es disminuir su impacto en la calidad de la potencia a niveles que no sobrepasen lo establecido en las normas antes mencionadas, por lo tanto, existen una variedad de técnicas, que dependiendo del caso en específico pueden ayudar a reducir los síntomas de esta distorsión, que van desde el incremento de la tolerancia del equipo y del sistema a los armónicos o modificar los circuitos y los sistemas para reducir su impacto, y atrapar o bloquear los armónicos con filtros.

Antes de seleccionar la técnica adecuada para la correcta disminución de la distorsión armónica es necesario primero llevar a cabo una inspección del equipo y del circuito eléctrico, ya que muchas veces de los casos estas distorsiones son provocadas por cargas desequilibradas, mala conexión a tierra, problemas con el conductor de neutro o con el equipo y por uso inapropiado. Los problemas de puesta a tierra contribuyen de un 33 a un 40% en los problemas relacionados con la calidad de energía.

En la próxima sección se presentan diferentes soluciones con las cuales podemos reducir o evitar que los armónicos causen una mala calidad de la potencia y por lo tanto causen problemas en nuestros equipos.

#### **V.2 Sobredimensionamiento**

En un caso particular si existe la presencia considerable de armónicos en una instalación eléctrica y el transformador trabaja en límites cercanos al 75% de su potencia nominal, pueden presentarse síntomas muy notables cuando existen distorsiones armónicas, pudiéndose apreciar manifestaciones tales como vibraciones y ruidos, sobrecalentamiento y aperturas de protecciones no deseadas [6] [16] [17].

Estos fenómenos acaban afectando principalmente a la calidad de la tensión, provocando una distorsión armónica total de tensión elevada. Al tener una mala calidad de tensión, los mismos armónicos de la instalación se comportan incrementando sus tasas de distorsión y se llega a unos términos en los que hay que tomar soluciones, ya que una tensión distorsionada puede provocar el anómalo funcionamiento de determinados receptores [6] [16] [17].



## ***“DISEÑO DE UN FILTRO ACTIVO DE ARMÓNICOS PARA INVERSOR FV CONECTADO AL SEN”***

---

El sobredimensionamiento se refiere a la práctica de instalar equipos eléctricos que tienen una capacidad mayor que la requerida para la carga a la que sirven. Esta técnica puede ayudar a combatir los armónicos eléctricos en ciertas situaciones [6] [16] [17].

El sobredimensionamiento de los equipos eléctricos puede ayudar a combatir los armónicos al reducir la carga en el equipo, lo que a su vez reduce los armónicos actuales. Por ejemplo, si un motor está sobredimensionado, funcionará a un porcentaje más bajo de su capacidad nominal, lo que dará como resultado un contenido de armónicos de corriente más bajo. De manera similar, si un transformador está sobredimensionado, tendrá una menor densidad de flujo, lo que reduce los armónicos de corriente de magnetización [6] [16] [17].

En resumen, el sobredimensionamiento hace que la impedancia total de la instalación disminuya, evitando que aumenten las pérdidas por efecto joule al ofrecer una sección mayor para flujo de la corriente [6] [16] [17].

Sin embargo, el sobredimensionamiento no siempre es la mejor solución para combatir los armónicos. Puede ser costoso e ineficiente y, en algunos casos, puede no ser efectivo. Otras técnicas, como el filtrado, la cancelación de armónicos y la mitigación activa de armónicos, pueden ser más apropiadas en determinadas situaciones [6] [16] [17].

### **V.2 Transformadores**

Los transformadores generalmente utilizados como elementos de adaptación de tensión, en ocasiones se utilizan para cambiar el régimen de neutro de la instalación o para generar un aislamiento galvánico entre elementos de electrónica de potencia o como medida suplementaria de seguridad contra contactos directos [6] [16] [17].

Hoy en día los transformadores también tienen su aplicación en el campo de los armónicos, precisamente gracias a la propiedad de poder aislar las cargas de la fuente y añadiéndole las distintas posibilidades de sus configuraciones de conexión y de construcción [6] [16] [17].

Estos transformadores permiten poder tener una determinada carga o conjunto de cargas, susceptibles de causar problemas a otros equipos, controladas en una zona concreta de la instalación, para que no perjudiquen al resto [6] [16] [17].

En sistemas trifásicos compensados, la corriente fundamental y las de los armónicos 5º, 7º, etc. se anulan mutuamente, mientras que las corrientes monofásicas del tercer armónico tienen el mismo decalaje de fase y, por consiguiente, se acumulan en el conductor neutro, retornando una corriente igual a tres veces las de las fases [6] [16] [17].

La circulación de corrientes importantes por el neutro debidas al armónico tercero y los múltiplos de tres, generan un desprendimiento de calor significativo debido al efecto Joule. Otro inconveniente de esta



## ***“DISEÑO DE UN FILTRO ACTIVO DE ARMÓNICOS PARA INVERSOR FV CONECTADO AL SEN”***

---

circulación es debido generalmente a su capacidad de deformar la tensión, haciéndola perder su carácter senoidal [6] [16] [17].

Los transformadores utilizados específicamente para el confinamiento y control de los armónicos en una determinada zona de la instalación se construyen con unos materiales y características especiales para este fin, ya que han de estar preparados para poder soportar en permanencia los efectos de los armónicos, con la misión de mantener unas prestaciones mínimas de calidad de tensión [6] [16] [17].

Los transformadores más utilizados en caso de cargas monofásicas son los de triángulo-estrella, que retienen los armónicos de orden tres y sus múltiplos. Si las cargas son trifásicas, es más adecuado utilizar transformadores de doble secundario para conseguir un desfase de 30° en las tensiones de sus dos salidas [6] [16] [17].

### **V.3 Dispositivos diferenciales**

Los dispositivos diferenciales, como los relés diferenciales y los esquemas de protección diferencial, se usan comúnmente para proteger los sistemas de energía eléctrica de fallas y otras condiciones anormales. Si bien los dispositivos diferenciales no están diseñados específicamente para combatir los armónicos eléctricos, pueden ayudar indirectamente a mitigar los problemas relacionados con los armónicos [6] [16] [17].

Una forma en que los dispositivos diferenciales pueden ayudar a combatir los armónicos eléctricos es brindando protección sensible para los equipos que son vulnerables a los daños relacionados con los armónicos. Por ejemplo, si una corriente armónica provoca una falla de aislamiento en un transformador, un relé diferencial puede detectar el flujo de corriente desequilibrado resultante y desconectar rápidamente el transformador para evitar daños mayores [6] [16] [17].

Otra forma en que los dispositivos diferenciales pueden ayudar a combatir los armónicos eléctricos es detectando la distorsión armónica causada por fallas u otras condiciones anormales. Por ejemplo, un relé diferencial puede detectar la presencia de una falla a tierra en un sistema de energía, lo que puede causar una distorsión armónica significativa. Al desconectar el equipo afectado fuera de servicio, el relé diferencial puede evitar más daños relacionados con armónicos y ayudar a restaurar la calidad de la energía [6] [16] [17].

Finalmente, algunos esquemas modernos de protección diferencial incorporan técnicas avanzadas de filtrado y procesamiento de señales que pueden ayudar a mitigar los efectos de los armónicos en el sistema. Por ejemplo, algunos esquemas usan algoritmos adaptativos que pueden ajustar dinámicamente los parámetros del filtro para apuntar a frecuencias armónicas específicas, mientras que otros usan transformadas de ondas para analizar la forma de onda del sistema e identificar la presencia de armónicos [6] [16] [17].



## ***“DISEÑO DE UN FILTRO ACTIVO DE ARMÓNICOS PARA INVERSOR FV CONECTADO AL SEN”***

---

En la actualidad se han desarrollado diferentes gamas de diferenciales para distintas aplicaciones, por lo que se pueden describir distintos diferenciales clasificados por su tipo. Los diferenciales tipo AC, tipo A y tipo B son tres tipos diferentes de relés diferenciales que se usan comúnmente en los sistemas de energía para proporcionar protección sensible contra fallas y otras condiciones anormales. Si bien estos relés no están diseñados específicamente para manejar armónicos eléctricos, pueden ayudar indirectamente a mitigar los problemas relacionados con los armónicos [6] [16] [17].

- Los diferenciales de tipo CA funcionan midiendo la diferencia de corriente entre dos conductores paralelos, como los dos lados del devanado de un transformador. En un sistema saludable, la corriente que fluye a través de los dos conductores debe ser igual y opuesta, lo que da como resultado una corriente neta de cero. Sin embargo, en presencia de una falla u otra condición anormal, el flujo de corriente se desequilibrará y el relé diferencial detectará el desequilibrio de corriente resultante y desconectará el equipo afectado.
- Los diferenciales tipo A funcionan de manera similar a los diferenciales tipo CA, pero están diseñados para proporcionar una protección más sensible para sistemas con una distorsión armónica significativa. Los diferenciales de tipo A incorporan capacidades adicionales de filtrado y procesamiento de señales que pueden ayudar a mitigar los efectos de los armónicos en el sistema, al mismo tiempo que brindan una protección confiable contra fallas y condiciones anormales.
- Los diferenciales tipo B están diseñados para brindar protección a los sistemas con grandes cantidades de distorsión armónica. Los diferenciales de tipo B utilizan una combinación de filtrado de armónicos y técnicas de cambio de fase para garantizar que el relé diferencial detecte con precisión los desequilibrios de corriente, incluso en presencia de una distorsión armónica significativa.

En resumen, si bien los diferenciales de tipo CA, tipo A y tipo B no están diseñados específicamente para manejar armónicos eléctricos, pueden ayudar indirectamente a mitigar los problemas relacionados con los armónicos al brindar protección sensible contra fallas y condiciones anormales, e incorporar filtrado y procesamiento de señales adicionales. capacidades para mitigar los efectos de los armónicos en el sistema [6] [16] [17].

### **V.4 Interruptor termomagnético**



## **“DISEÑO DE UN FILTRO ACTIVO DE ARMÓNICOS PARA INVERSOR FV CONECTADO AL SEN”**

---

Los interruptores magnetotérmicos, también conocidos como disyuntores termomagnéticos, se utilizan comúnmente en los sistemas de energía eléctrica para brindar protección contra sobrecorriente y fallas de cortocircuito. Si bien estos dispositivos no están diseñados específicamente para combatir los armónicos eléctricos, pueden ayudar indirectamente a mitigar los problemas relacionados con los armónicos [6] [16] [17].

Cuando ocurre una falla u otra condición anormal en un sistema de energía, la sobrecorriente resultante puede causar una distorsión armónica significativa en el sistema. Los interruptores magnetotérmicos pueden ayudar a mitigar los efectos de esta distorsión al desconectar rápidamente el circuito afectado fuera de servicio, evitando que la falla se propague más a través del sistema [6] [16] [17].

Los interruptores magnetotérmicos disponen de una lámina bimetálica o bilamina, cuya misión es la de soportar una determinada temperatura en función de la intensidad que la atraviese. Cuando las corrientes armónicas de elevada frecuencia circulan a través de esta bilamina, se produce un aumento de su resistencia óhmica, debido al efecto piel, lo que ocasiona un calentamiento adicional por el efecto Joule, que hace disparar el interruptor a intensidades inferiores a la nominal [6] [16] [17].

Además, algunos interruptores magnetotérmicos modernos incorporan técnicas avanzadas de filtrado y procesamiento de señales que pueden ayudar a mitigar los efectos de los armónicos en el sistema. Por ejemplo, algunos dispositivos usan algoritmos adaptativos que pueden ajustar dinámicamente los parámetros del filtro para apuntar a frecuencias armónicas específicas, mientras que otros usan transformadas de ondas para analizar la forma de onda del sistema e identificar la presencia de armónicos [6] [16] [17].

Si bien los interruptores magnetotérmicos normalmente no se usan como el medio principal para abordar los problemas relacionados con los armónicos en un sistema de energía, pueden proporcionar una importante capa secundaria de protección contra los efectos de la distorsión armónica. Al aislar rápidamente fallas y condiciones anormales, estos dispositivos pueden ayudar a prevenir más daños al sistema y restaurar la calidad de la energía más rápidamente [6] [16] [17].

### **V.5 Filtros Pasivos**

Los filtros pasivos se utilizan comúnmente en los sistemas de energía eléctrica para mitigar los efectos de los armónicos eléctricos. Estos filtros funcionan atenuando selectivamente las frecuencias armónicas, reduciendo así el nivel general de distorsión armónica en el sistema [6] [16] [17].

Los filtros pasivos generalmente consisten en una combinación de inductores, capacitores y resistencias dispuestas en configuraciones específicas para crear una red de filtros que se ajusta a frecuencias armónicas específicas. Cuando las corrientes armónicas fluyen a través de la red de filtros, los inductores y capacitores reaccionan de una manera que crea una ruta de alta impedancia para las frecuencias armónicas, filtrándolas efectivamente fuera del sistema [6] [16] [17].



## **“DISEÑO DE UN FILTRO ACTIVO DE ARMONICOS PARA INVERSOR FV CONECTADO AL SEN”**

---

Los filtros pasivos son los más simples y económicos, pero menos flexibles y efectivos para filtrar armónicos. Los filtros antiarmónicos suelen ser del tipo LC. Este filtro dispone de una bobina serie y, en paralelo, la que sintoniza con el armónico a eliminar, cerrando las bobinas con unos condensadores entre fases. Son elementos puramente pasivos, usados como circuitos en paralelo en la entrada de los servicios con problemas de generación de armónicas, evitando de esta manera que entren al sistema de distribución. También los filtros pueden instalarse directamente en un equipo particular donde existe un grave problema de generación de armónicas, evitando de esta manera que circulen en la propia instalación eléctrica del usuario [6] [16] [17].

El comportamiento de los filtros pasivos es ser sensitivos a la impedancia del sistema para los cuales han sido ajustados. Para aplicaciones en las que la impedancia del sistema puede cambiar a lo largo del tiempo, se corre el riesgo de que quede obsoleto ya que, con toda probabilidad, habrá cambiado el espectro armónico de las cargas o el de la instalación. Los filtros pasivos con frecuencia no proporcionan un comportamiento satisfactorio, bajo ciertas circunstancias pueden causar problemas de resonancia sobre el sistema donde están conectados [6] [16] [17].

Hay varios tipos de filtros pasivos que se usan comúnmente en los sistemas de energía, incluidos los filtros en serie, los filtros de derivación y los filtros híbridos [6] [16] [17].

- Los filtros en serie se utilizan normalmente para filtrar la distorsión armónica provocada por cargas no lineales, como los variadores de frecuencia, que están conectados al sistema de alimentación. Los filtros en serie están conectados en serie con la carga y funcionan bloqueando el flujo de corrientes armónicas desde la carga hacia el sistema de energía.
- Los filtros de derivación, por otro lado, se usan típicamente para filtrar la distorsión armónica causada por cargas que están conectadas en paralelo con el sistema de potencia, como grandes cargas de motores. Los filtros de derivación se conectan en paralelo con la carga y funcionan desviando las corrientes armónicas lejos de la carga y de regreso a la red de filtros.
- Los filtros híbridos son una combinación de filtros en serie y en derivación, y normalmente se usan para filtrar la distorsión armónica causada por una variedad de cargas y configuraciones del sistema. Los filtros híbridos brindan un enfoque más integral para la mitigación de armónicos y pueden ajustarse a frecuencias y características de carga específicas para lograr un rendimiento de filtrado óptimo.

En resumen, los filtros pasivos son un método comúnmente utilizado para combatir los armónicos eléctricos en los sistemas de potencia. Estos filtros funcionan atenuando selectivamente las frecuencias armónicas y se pueden configurar de varias maneras para proporcionar un rendimiento de filtrado óptimo para diferentes tipos de cargas y configuraciones del sistema [6] [16] [17].



## ***“DISEÑO DE UN FILTRO ACTIVO DE ARMONICOS PARA INVERSOR FV CONECTADO AL SEN”***

---

### **V.6 Filtros Activos**

Los filtros activos son otro método comúnmente utilizado para mitigar los armónicos eléctricos en los sistemas de potencia. A diferencia de los filtros pasivos, que funcionan atenuando selectivamente las frecuencias armónicas, los filtros activos funcionan inyectando corrientes armónicas iguales y opuestas en el sistema, cancelando efectivamente la distorsión armónica [6] [16] [17].

Los filtros activos generalmente consisten en un convertidor electrónico de potencia, un sistema de control y un sistema de detección. El sistema de detección monitorea la forma de onda actual en el punto de conexión y envía esta información al sistema de control, que calcula la inyección de corriente armónica requerida. Luego, el convertidor electrónico de potencia genera la forma de onda de corriente requerida y la inyecta en el sistema, cancelando efectivamente la distorsión armónica [6] [16] [17].

Los filtros activos son particularmente efectivos para mitigar la distorsión armónica causada por cargas no lineales, como unidades de frecuencia variable y otros equipos electrónicos. Estas cargas pueden generar formas de onda armónicas complejas e impredecibles que pueden ser difíciles de filtrar usando solo filtros pasivos. Los filtros activos pueden proporcionar una solución más precisa y eficaz para mitigar este tipo de armónicos [6] [16] [17].

Los filtros activos se pueden configurar de varias maneras, incluso como filtros en serie, filtros de derivación y filtros híbridos, similares a los filtros pasivos. Además, algunos filtros activos modernos incorporan funciones avanzadas, como algoritmos adaptables y capacidades de monitoreo en tiempo real, que pueden ayudar a optimizar el rendimiento del filtro y garantizar un funcionamiento confiable a lo largo del tiempo [6] [16] [17].

En conclusión, los filtros activos son un método poderoso y efectivo para combatir los armónicos eléctricos en los sistemas de potencia, particularmente en aplicaciones donde hay cargas no lineales. Estos filtros funcionan inyectando corrientes armónicas iguales y opuestas en el sistema, cancelando efectivamente la distorsión armónica. Los filtros activos se pueden configurar de varias maneras y pueden incorporar características avanzadas como algoritmos adaptativos y capacidades de monitoreo en tiempo real para proporcionar un rendimiento de filtrado óptimo y una operación confiable [6] [16] [17].



## **CAPÍTULO VI**

### **Diseños de filtros activos para generación fotovoltaica**

#### **VI.1 Introducción**

En la actualidad en la mayoría de los casos se utilizan los filtros pasivos sobre los filtros activos, aunque estos primeros tengan inconvenientes como su incapacidad para compensar la variación de corriente armónica aleatoria ya que están diseñados solo para una frecuencia específica y la posibilidad de resonancia en el punto de acoplamiento común, problemas de sintonía y sobrecarga del filtro, además de que su tamaño es voluminoso [6] [16] [25].

En la actualidad existen investigaciones para mejorar la confiabilidad de la generación fotovoltaica y esta no dañe la calidad de la potencia que se suministra a la red. Hoy por hoy los filtros activos se convirtieron en la solución más efectiva para eliminar la contaminación armónica en los sistemas de potencia, por el hecho de que tienen ventajas sobre otros métodos para la reducción de armónicos tales como:

- Capacidad para compensar corrientes variables aleatorias
- Buena capacidad de control y respuesta rápida a las variaciones del sistema
- Alta precisión de control

Como ya se mencionó anteriormente el principio de funcionamiento del filtro activo es el de inyectar una corriente de compensación de igual magnitud, pero en sentido contrario al armónico que se desea eliminar, además son capaces de absorber o generar potencia reactiva, eliminando así los armónicos no deseados y compensando la potencia reactiva de la carga conectada [6] [25].

El filtro activo logra de esta manera cancelar corrientes armónicas y deja que el sistema de potencia proporcione el componente de corriente fundamental y mejore el factor de potencia del sistema, además el filtro activo en derivación puede lograr que el sistema de potencia se mantenga equilibrado en ciertas condiciones de desequilibrio provocada por cargas no lineales, logrando que la inyección de armónicos este dentro de los estándares permisibles definidos por la IEEE-519 [6] [25].

#### **VI.2 Caso 1**

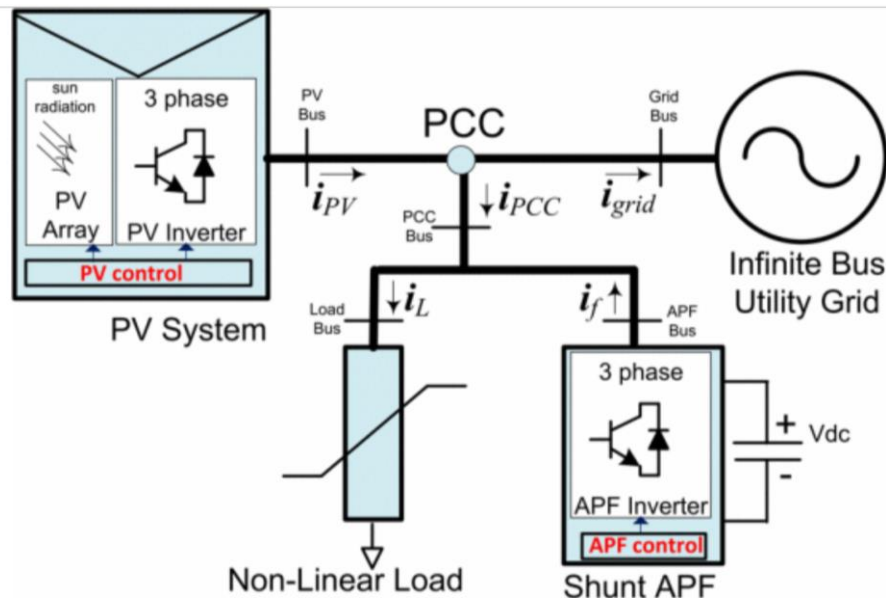
En el siguiente apartado se presenta el artículo “Active Power Filter For Power Quality Enhancement of Photovoltaic Renewable Energy Systems”, donde se estudia la aplicación de un filtro de potencia activo (APF por sus siglas en inglés) para mitigar las corrientes armónicas y compensar la potencia reactiva de una fuente de energía renovable fotovoltaica que alimenta una carga no lineal [25].

## “DISEÑO DE UN FILTRO ACTIVO DE ARMONICOS PARA INVERSOR FV CONECTADO AL SEN”

La topología del sistema fotovoltaico se muestra en la figura VI.1, el cual es un sistema fotovoltaico que se encuentra conectado al sistema eléctrico de potencia mediante un circuito trifásico (Red Nacional de Arabia Saudita, 110/13.8/0.4 KV) con un filtro de potencia activo en derivación y una carga no lineal, la generación fotovoltaica alimenta tanto a la red como a la carga no lineal, como es de suponer el APF en derivación es utilizado para el filtrado de armónicos además de mejorar el entrega de potencia reactiva de la generación fotovoltaica [25].

El cálculo de las componentes activos y reactivos de las corrientes de modulación sigue el método de la potencia instantánea. La técnica de modulación de ancho de pulso por histéresis se le ha aplicado al algoritmo de control tanto del inversor fotovoltaico como al filtro activo de potencia [25].

Figura VI. 1 Sistema Fotovoltaico con diagrama esquemático básico con filtro activo de potencia



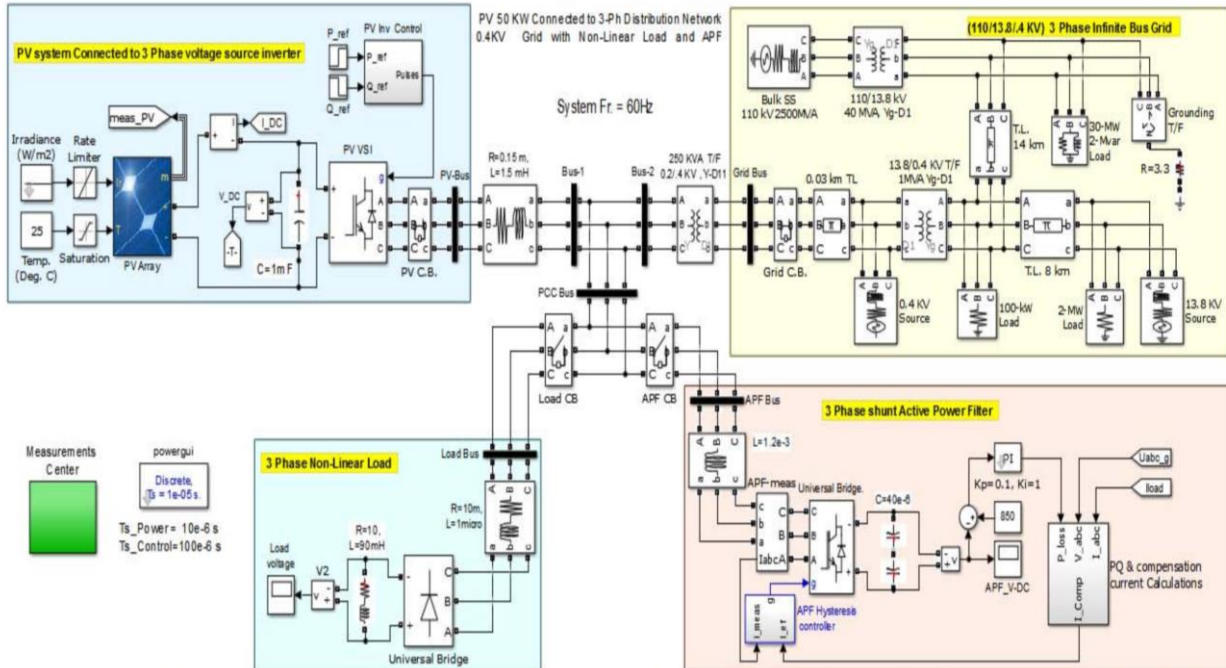
En el estudio se utilizó simulaciones a través de Simulink de Matlab para ver cómo se comporta el sistema en tres diferentes casos, el primero con la ausencia de la carga no lineal y con el filtro activo de potencia apagado, el segundo caso es con la presencia de la carga no lineal y el filtro activo de potencia apagado y el tercer y último caso es con la presencia de carga no lineal y el filtro activo de potencia encendido [25].

Esta simulación se lleva a cabo de la siguiente manera: el periodo de tiempo que va desde  $t=0.0$  hasta  $t=0.05$  seg. es el inicio de la simulación y es cuando la carga no lineal como el APF están apagados, en otras palabras, es cuando el sistema fotovoltaico está conectado solo a la red pública. El siguiente periodo de tiempo que va desde  $t=0.05$  a  $t=0.10$  seg. la carga no lineal se enciende, pero el filtro Activo de potencia sigue apagado, para el último periodo de la simulación de va desde  $t=0.10$  a  $t=0.15$  seg. tanto la carga como el filtro están prendidos [25].

## “DISEÑO DE UN FILTRO ACTIVO DE ARMONICOS PARA INVERSOR FV CONECTADO AL SEN”

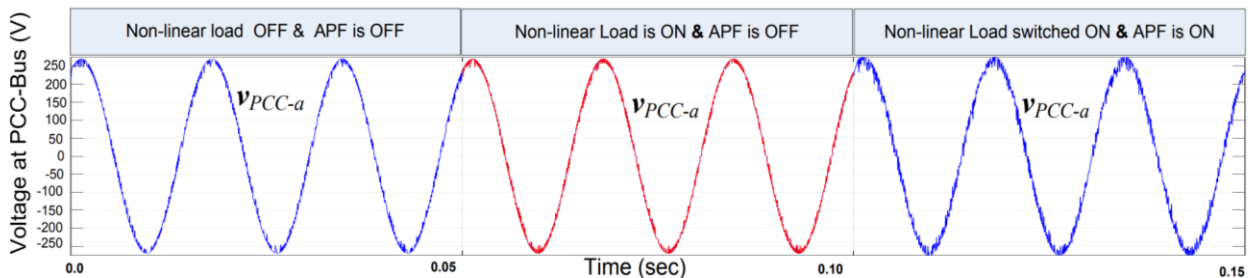
Las mediciones de simulación se realizaron en diferentes buses (PV-Bus, Bus-2, PCC-bus, Grid-Bus, Load-Bus y APF-bus), la localización de estos buses se muestra en la figura VI.2 [25].

**Figura VI. 2 Sistema de estudio completo en Matlab/simulink de generación fotovoltaica con filtro de potencia activa y carga no lineal**



En la gráfica VI.1 se muestra el comportamiento de voltaje medido en el bus PCC-bus, el cual es el punto donde se conecta la salida del inversor fotovoltaico (Bus-1 y Bus-2) y (APF-Bus y Load-Bus). Este voltaje alimenta la carga no lineal local en los tres casos diferentes mencionados anteriormente [25].

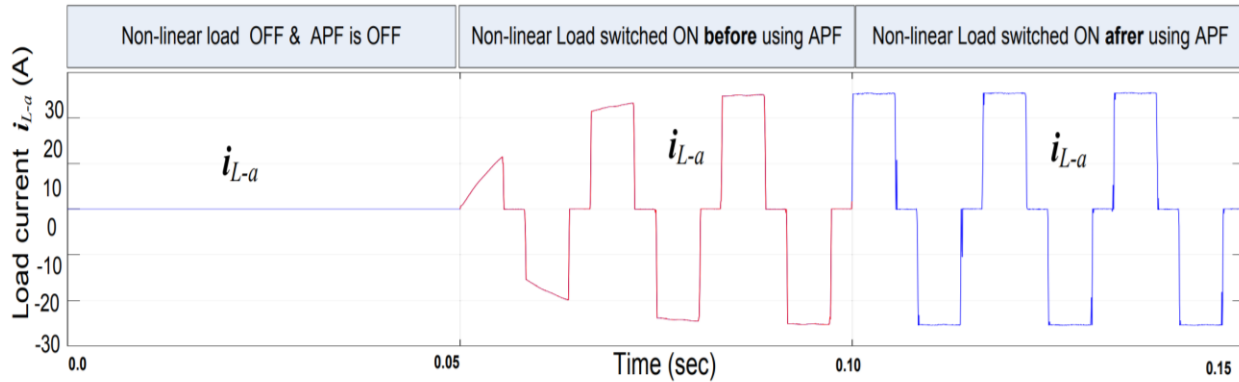
**Gráfica VI. 1 forma de onda de Voltaje Medida en el BUS PCC**



## “DISEÑO DE UN FILTRO ACTIVO DE ARMONICOS PARA INVERSOR FV CONECTADO AL SEN”

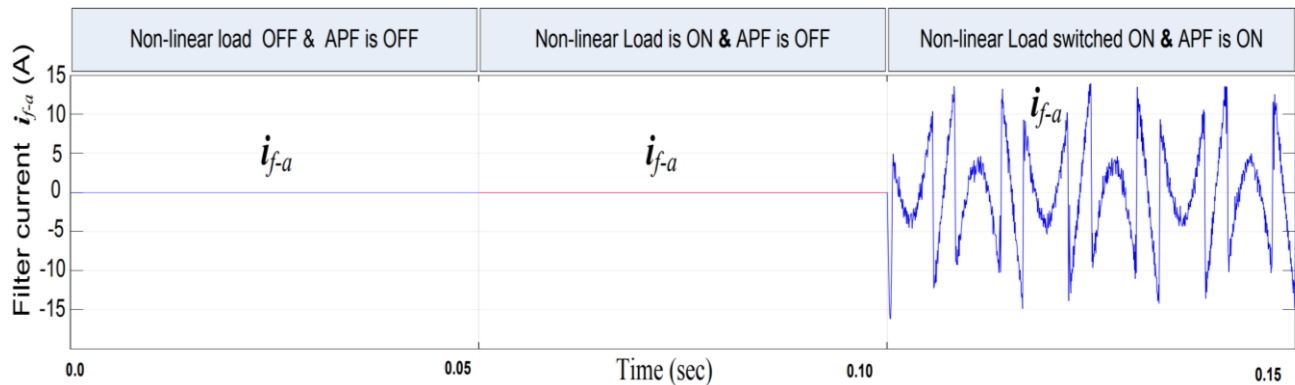
En la gráfica VI.2 se aprecia la forma de onda de la corriente de carga no lineal medida en el bus Load-Bus en los casos mencionados anteriormente [25].

**Gráfica VI. 2 Corriente de carga no lineal medida en el bus Load-bus.**



La grafica VI.3 se muestra el comportamiento del Filtro de potencia activa compensando las corrientes armónicas y reactivas casusas por la carga no lineal, esta corriente tiene la capacidad de eliminar las corrientes reactivas y armónicas no deseadas de las corrientes de la salida tanto de la carga no lineal como las corrientes de salida del inversor fotovoltaico [25].

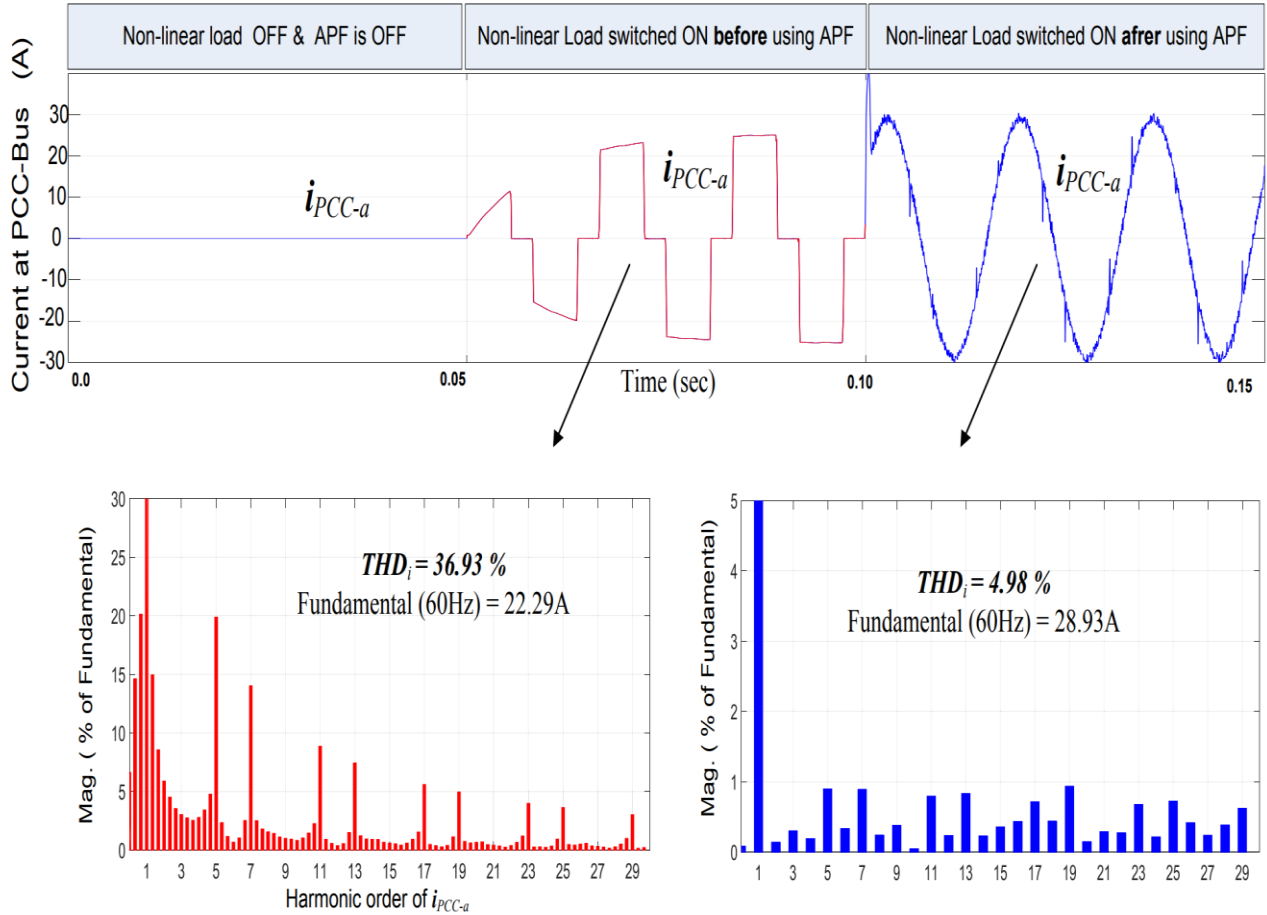
**Gráfica VI. 3 Corrientes de compensación del filtro para compensar tanto la carga no lineal como las corrientes fotovoltaicas**



En la gráfica VI.4 se muestra la forma de onda de la corriente en el bus PCC-Bus comparada con el aspecto de armónicos en los tres diferentes casos [25].

## “DISEÑO DE UN FILTRO ACTIVO DE ARMÓNICOS PARA INVERSOR FV CONECTADO AL SEN”

Gráfica VI. 4 Forma de onda de la corriente en el bus PV-bus comparada con el espectro de armónicos.

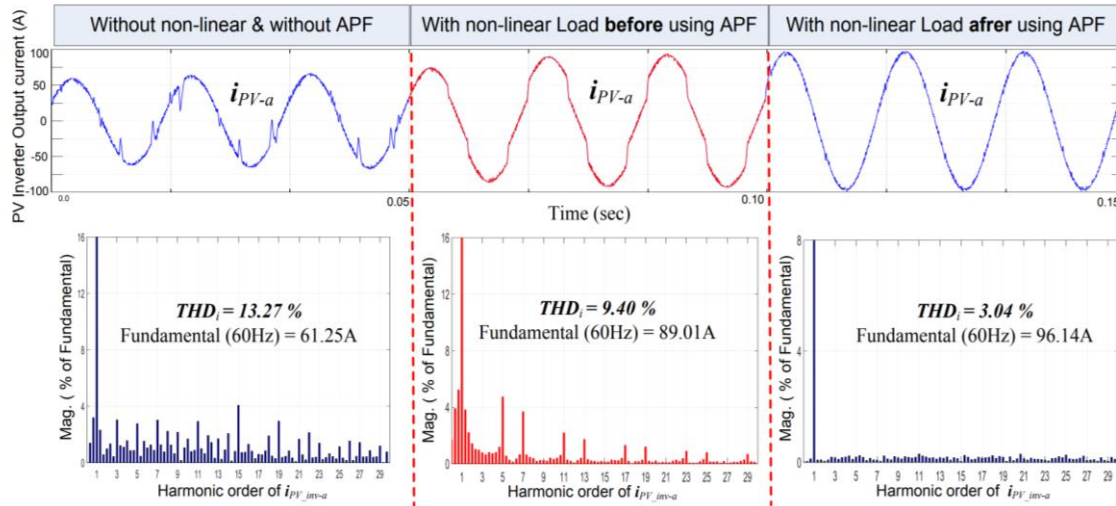


A través de este análisis de la forma de onda y del espectro armónico como se muestra en la gráfica VI.4 se puede observar que con la carga encendida y el filtro apagado el THD<sub>i</sub> es del 36.93%. Cuando esta corriente atraviesa el filtro, como se muestra en el último caso de estudio en el tiempo  $t=0.10$  seg, la forma de onda cambia drásticamente, acercándose a lo que conocemos como onda senoidal con un THD<sub>i</sub> del 4.98% aproximadamente, logrando casi estar en fase con el voltaje en el bus PCC-Bus que se muestra en la gráfica VI.1 [25].

La corriente de salida proporcionada por el inverso fotovoltaico en el bus fotovoltaico se muestra en la gráfica VI.5 Esta corriente se considera como fuente para alimentar la carga no lineal. Al igual que en el grafico anterior se compara con el espectro de armónicos en cada uno de los casos a estudiar [25].

## “DISEÑO DE UN FILTRO ACTIVO DE ARMONICOS PARA INVERSOR FV CONECTADO AL SEN”

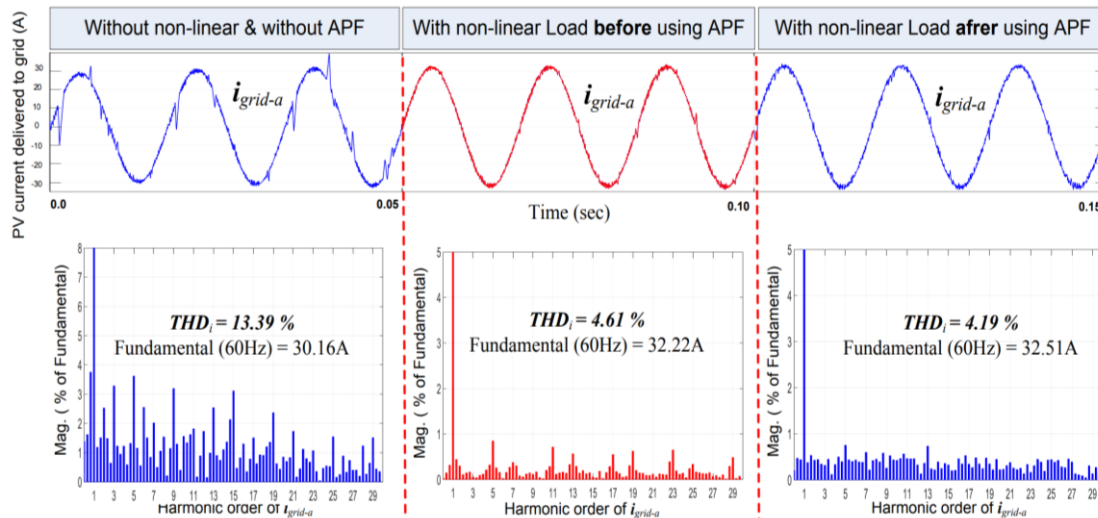
Gráfica VI. 5 forma de onda de corriente de salida en Bus PV-Bus y su análisis de espectro de armónicos



En la gráfica VI.5 se observa que antes de conectar tanto la carga no lineal como el APF, El THD de la corriente de salida entregada por el inversor es incluso mayor que cuando se conecta la carga no lineal, con un porcentaje del 13.27%, una vez conectada la carga pero de igual manera sin prender el filtro se observa que el porcentaje es del 9.40%, una vez encendido el filtro se observa un notable descenso en el porcentaje armónico llegando hasta un 3.04% aproximadamente, además logra apreciar en la gráfica del espectro armónico en el último periodo estudiado, que solo se nota el espectro de la frecuencia fundamental, todos los demás se redujeron drásticamente [25].

En la gráfica VI.6 muestra la corriente enviada a la red de bus infinito Grid-Bus, al igual que el caso anterior se muestra las gráficas del espectro armónico [25].

Gráfica VI. 6 Forma de onda de corriente de salida entregada en el bus Grid-Bus y su analisis de espectros asociado

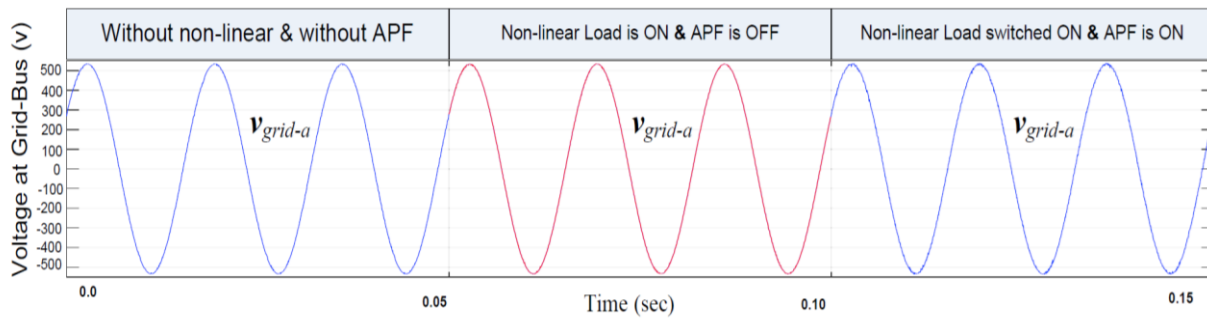


## “DISEÑO DE UN FILTRO ACTIVO DE ARMONICOS PARA INVERSOR FV CONECTADO AL SEN”

En la gráfica VI.6 se muestra que antes de conectar tanto la carga no lineal como el filtro activo de armónicos, el THD de corriente fotovoltaica entregada a la red por medio del bus infinito es del 13.39 % el cual es un porcentaje incluso mayor de cuando se conecta la carga no lineal, una vez conectada la carga no lineal, pero con el filtro apagado, se tiene un porcentaje menor que el caso anterior, con un porcentaje del 4.61%. Una vez encendido el filtro, se logra ver aún más la reducción de las corrientes armónicas hasta un 4.19% aproximadamente [25].

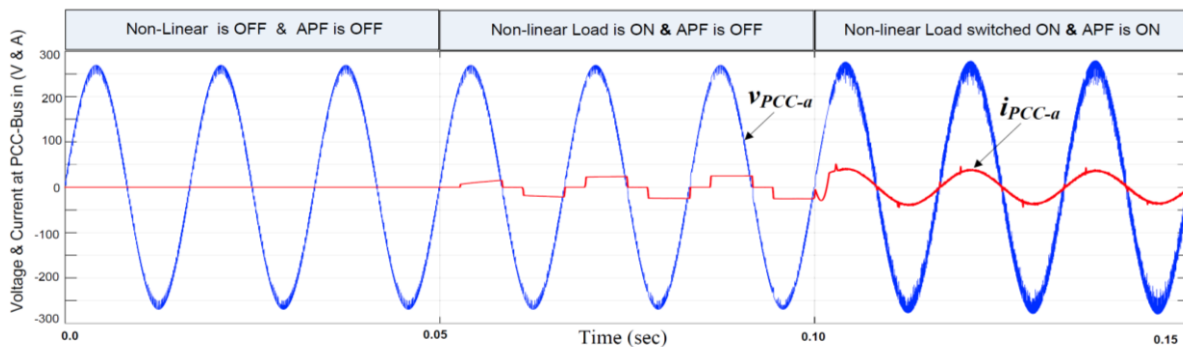
La gráfica VI.7 muestra la forma de onda de voltaje medida en GRID-BUS, se observa que las formas de onda de voltaje son siempre sinusoidales puras sin distorsión, independientemente de que el filtro este o no encendido y de que exista o no carga no lineal [25].

**Gráfica VI. 7 Forma de onda de tensión medida en el GRID-BUS**



En la gráfica VI.8 se muestra la onda de voltaje y corriente, donde en el tiempo 0.05 la carga no lineal es encendida y el filtro aun se encuentra apagado, por lo que la forma de onda se distorsiona y se desfasa aproximadamente 16 grados. Una vez encendido el Filtro se logra apreciar la forma de onda se vuelve sinusoidal y en fase con el voltaje, lo que provoca que el factor de potencia este cerca de la unidad, demostrando de esta manera que el filtro logra compensar los armónicos generados, además de la corrección del factor de potencia [25].

**Gráfica VI. 8 Medición del factor de potencia usando formas de onda de voltaje y corriente**





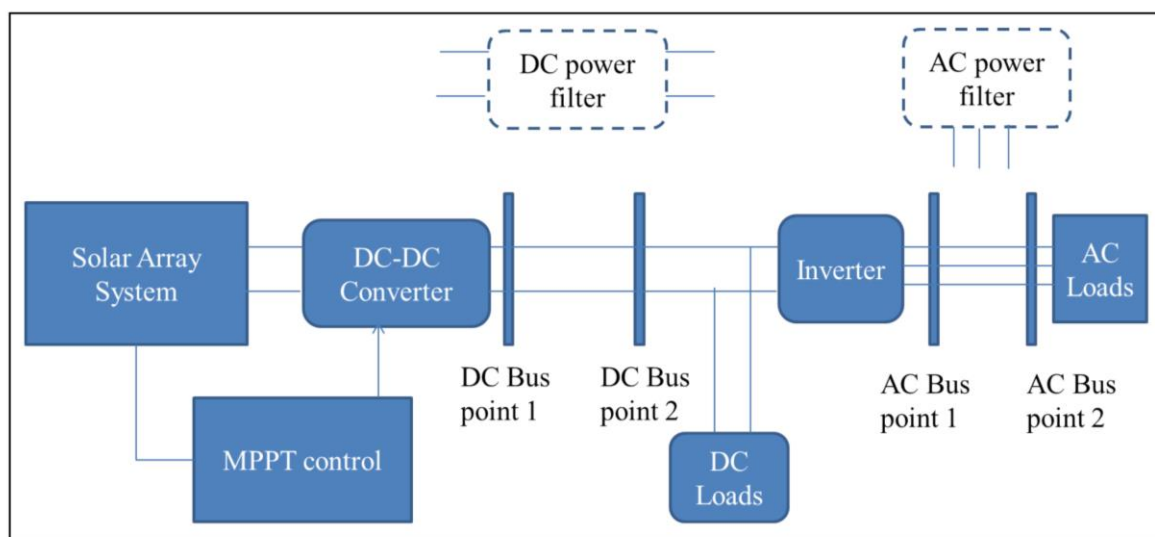
## “DISEÑO DE UN FILTRO ACTIVO DE ARMONICOS PARA INVERSOR FV CONECTADO AL SEN”

### VI.3 caso 2

Para el segundo caso tomaremos como referencia el artículo “DC and AC Active Power filters for Distibuted Photovoltaic Grid System”, el cual centra su estudio en filtros activos de potencia CD y CA, donde se ha modelado todo el sistema que consta del conjunto generador de energía solar, las cargas CC, el inversor trifásico y las cargas de CA para revisar el rendimiento del filtro en presencia de cargas variables. El filtro de Corriente continua es un filtro activo controlado por un conjunto PI para estabilizar el voltaje de CC, para el filtro de corriente alterna es un filtro basado en un rectificador PWM trifásico donde la Conmutación se controla en función de la referencia de corriente generada [26].

El sistema se conforma de la fuente de generación fotovoltaica, el cual consta de distintas partes iniciando por un convertidor DC-DC que se controla por un algoritmo de seguimiento del punto máxima potencia (MPPT), el cual busca siempre generar la máxima potencia del panel solar, la cual va variando con los cambios de irradiación, la temperatura y sombras, de esta manera el MPPT logra que la generación de energía a través de los paneles sea siempre la máxima posible independientemente de las variables externas, en la figura VI.3 se muestra que después del punto del convertidor CC-CC es el punto de bus, en el cual delante de este se conectan las cargas de CC y el inversor trifásico. El inversor se conecta de igual manera cargas de CA. De esta manera existen tantas cargas CC y cargas CA, por lo tanto se esperan armónicos, el filtro de CC activo propuesto está diseñado para colocarse en serie entre los puntos 1 y 2 del bus de CC, mientras que el filtro de CA es un filtro de derivación y se coloca entre los puntos 1 y 2 del bus de CA, esta configuración se muestra en la figura VI.3 [26].

Figura VI. 3 Diagrama del sistema a estudiar

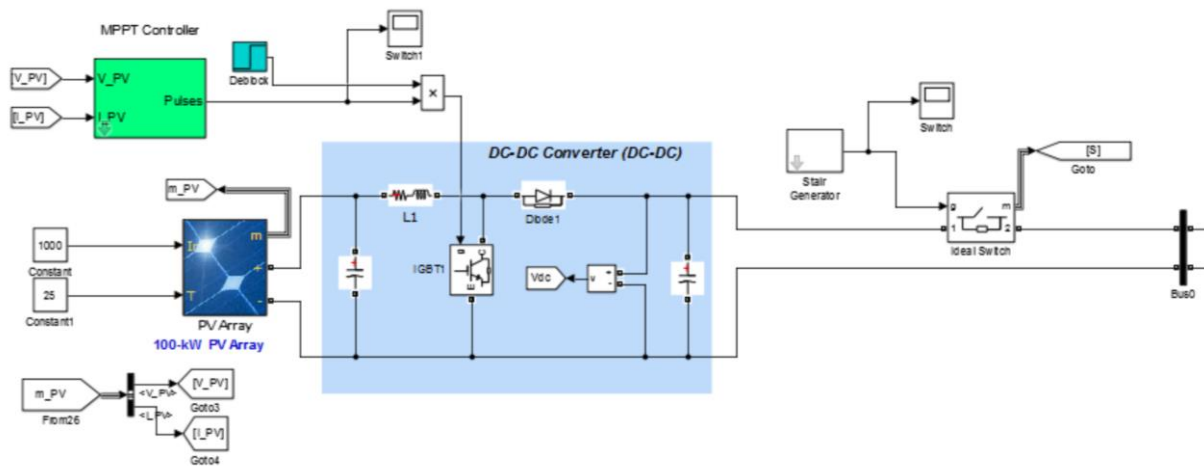


## **“DISEÑO DE UN FILTRO ACTIVO DE ARMONICOS PARA INVERSOR FV CONECTADO AL SEN”**

La simulación del sistema se llevó a cabo con el software MATLAB/Simulink, el cual se modeló en bloques, al igual que la simulación paso a paso [26].

La generación que se ha simulado a través del sistema fotovoltaico es de 100 KW, conectada a un convertidor CC-CC, como se muestra en la figura VI.4. El convertidor CC-CC se ha modelado como un convertidor tipo Buck el cual proporciona a la salida 200 V de corriente directa, el ciclo de trabajo de este convertidor está controlado por el algoritmo MPPT de la matriz fotovoltaica. El Algoritmo MPPT que se ha utilizado es la conductancia incremental y la técnica del regulador incremental. El algoritmo MPPT es de suma importancia ya que las condiciones variables de la radiación solar son inevitables [26].

**Figura VI. 4 Diagrama del sistema a estudiar**



Desde el punto de bus CC se han conectado varias cargas, las cuales se configuran de diferente manera [26].

- La primera carga se modela como una fuente de corriente variable la cual causa variaciones en la línea, la potencia que consume es de 20 KW, figura VI.5
- Una carga resistiva de 1.6 KW, la cual se representa con un foco, figura VI.5
- Cargas no lineales, estas cargas se representan mediante convertidores CC-CC de dos cuadrantes, que están conectados a un motor de CC, la velocidad de los accionamientos de los motores está controlada mediante un controlador de corriente PWM que podría dar lugar a componentes de alta frecuencia, se han modelado tres cargas de este tipo, cada una de 12 KW, como se muestran en las figuras VI.5 y VI.6
- Inversor trifásico con el puente de tres niveles que utiliza un controlador convertidor de fuente de voltaje (VSV) como se muestra en la figura VI.7.

La carga de lado de CA es una carga cíclica que muestra en la figura VI.8. La corriente consumida por el sistema varía, se ha modelado a través de un bloque controlado por corriente donde la forma de onda varía entre -300 a 300 Amp y consume una potencia máxima de 48 KW [26].

Figura VI. 5 Cargas de CC simuladas

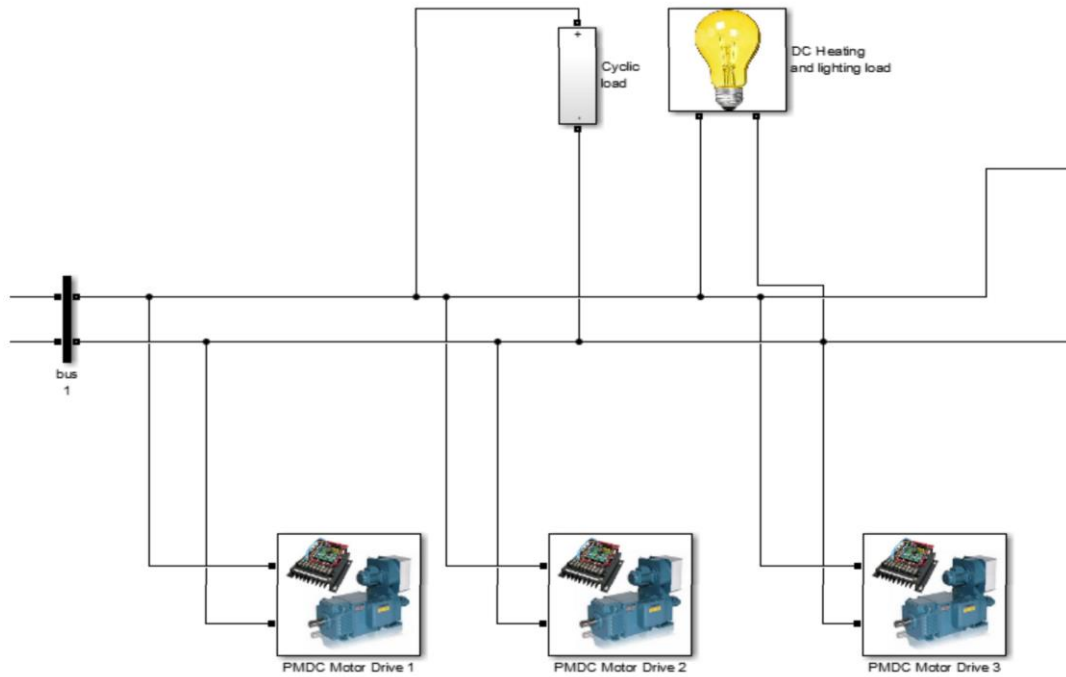
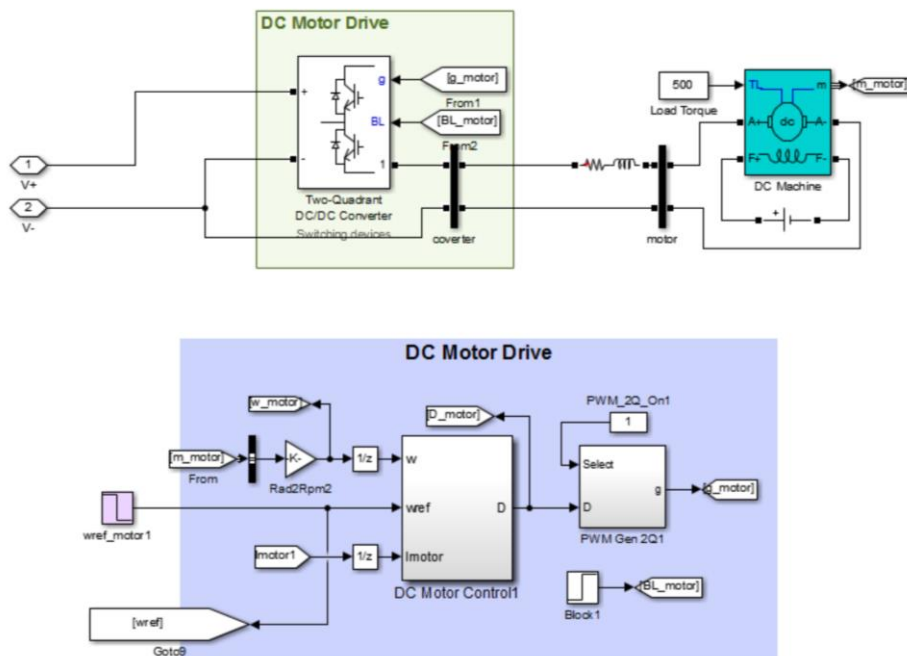


Figura VI. 6 carga de accionamiento del motor



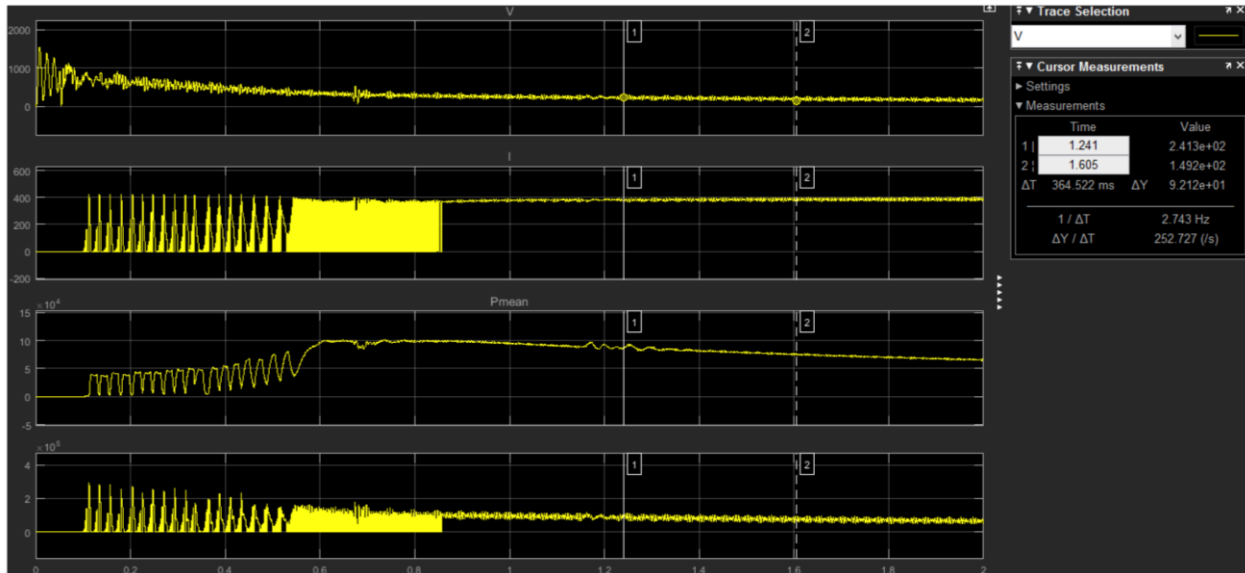
The diagram illustrates a DC-AC Inverter system. On the left, a DC source consisting of three cells is connected to a 3-Level Bridge. The 3-Level Bridge has three output terminals labeled A, B, and C. These terminals are connected to an AC bus on the right. A VSC Control block is connected to the AC bus and outputs control signals to the 3-Level Bridge. The VSC Control block also receives inputs from the AC bus. A Deblock block is connected to the VSC Control block.

79

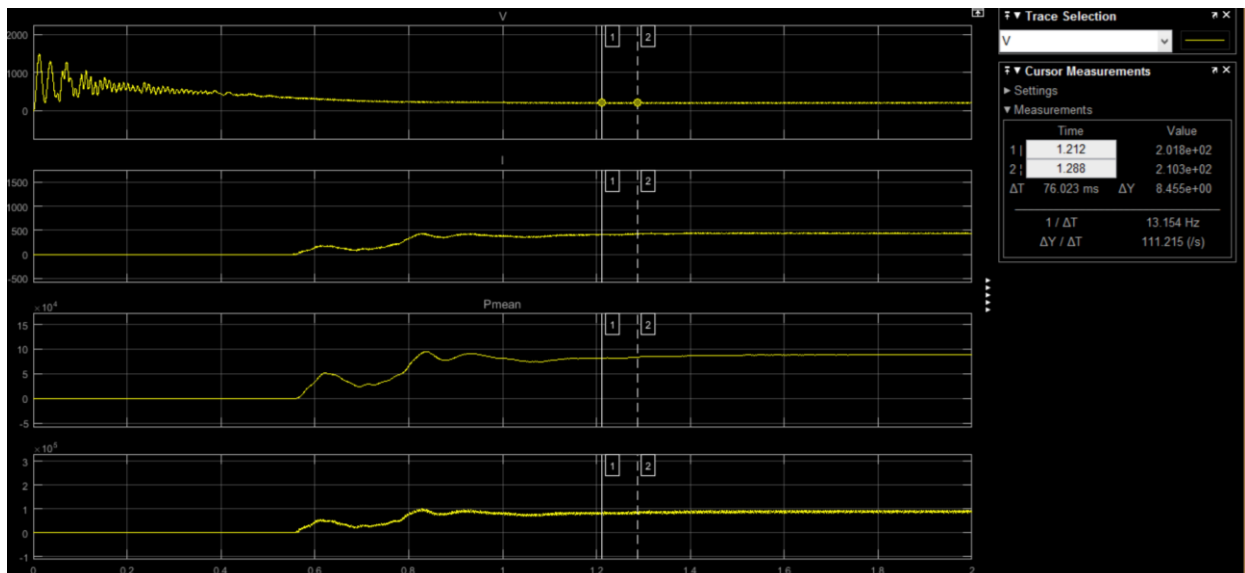


## “DISEÑO DE UN FILTRO ACTIVO DE ARMONICOS PARA INVERSOR FV CONECTADO AL SEN”

Gráfica VI. 9 Ondulación del Voltaje en el Bus 1 (de arriba para abajo: Voltaje, Corriente, potencia media y potencia instantánea)



Gráfica VI. 10 Ondulación del Voltaje en el Bus 1 con el filtro activo encendido (de arriba para abajo: Voltaje, Corriente, potencia media y potencia instantánea)





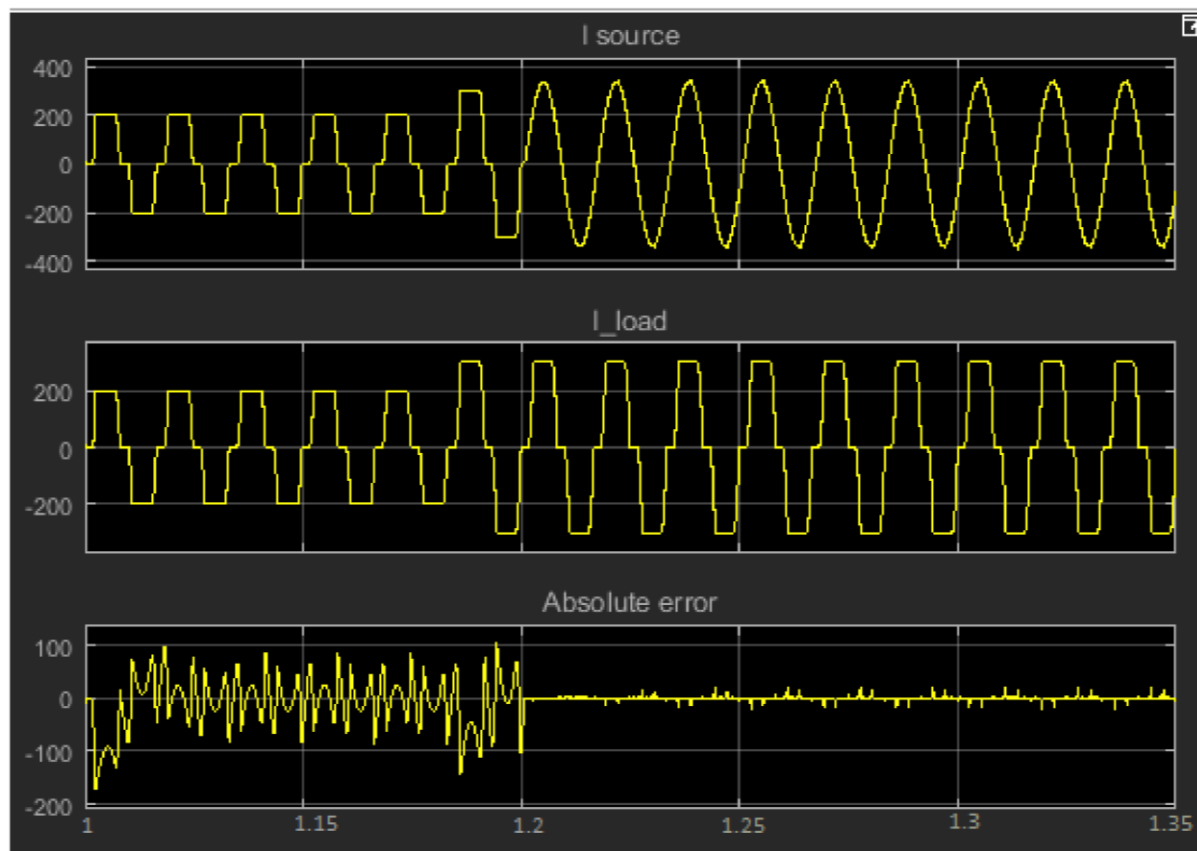
## “DISEÑO DE UN FILTRO ACTIVO DE ARMONICOS PARA INVERSOR FV CONECTADO AL SEN”

La grafica VI.10 muestra el voltaje del bus cuando el filtro de alimentación de CC se coloca en línea, se observa que se a reducido a un máximo e 6.2 V, lo que corresponde a un porcentaje de ondulación de tensión del 3,1%, lo que provoca una mejora del 17.7% en el porcentaje de ondulación del voltaje debido a la instalación del filtro de alimentación de CC [26].

Se tuvieron que realizar dos simulaciones separadas para el filtro de potencia de CC porque se trata de un filtro en serie, caso contrario para el filtro de CA, ya que este se encuentra en derivación, por lo tanto la simulación se puede llevar en una sola simulación [26].

La grafica VI.11 muestra esta simulación del filtro AC, el cual se enciende a los 1.2 seg, observándose una gran diferencia en la forma de onda de la corriente. Antes de encender el filtro, se observa que la onda de la fuente y la de la carga es prácticamente la misma, cuando el filtro se enciende el contenido armónico es prácticamente nulo, en el estudio se realizó un análisis Matlab FFT para saber el contenido armónico total. Se encontró que el  $THD_i$  era de 20.1% antes de encender el filtro y cuando se enciende el filtro, se encontró que el  $THD_i$  era del 0.51%, logrando una mejora del 19.59% en  $THD_i$  [26].

Gráfica VI. 11 Comportamiento de la corriente antes y después del filtro activo en CA





## ***“DISEÑO DE UN FILTRO ACTIVO DE ARMONICOS PARA INVERSOR FV CONECTADO AL SEN”***

---

# **CAPÍTULO VII**

## **Conclusiones**

El aumento de la generación fotovoltaica distribuida tiene muchos retos a superar para lograr ser un suministro de energía confiable, ya que como se estudió su dependencia de la irradiancia lo hace propensa a provocar disturbios en la red eléctrica, pero, es una gran oportunidad para depender cada vez menos de las energías tradicionales que están provocando daños severos a nuestro planeta.

La gran cantidad de plantas fotovoltaicas distribuidas que se encuentran funcionando más las que se construirán, pueden provocar daños en la calidad de la energía sino se toman acciones concretas, haciendo que el sistema eléctrico de potencia sea vulnerable. Pero con los estudios y tecnología actual podemos lograr superar estos retos.

Como se logró apreciar en el capítulo anterior, el filtro activo es un gran recurso para ayudar con la calidad de potencia en los sistemas de generación fotovoltaica, ya que puede ayudar a corregir tanto los disturbios en las ondas de corrientes armónicas como ayudarnos a corregir el factor de potencia, siendo un elemento completo para la buena calidad del sistema eléctrico de potencia, logrando tener mejor fiabilidad, continuidad y calidad por parte de la generación fotovoltaica.

Por lo tanto, el filtro activo es un gran aliado para lograr que la generación fotovoltaica sea una fuente óptima para la transición energética que tanta falta le hace a nuestro mundo.



## ***“DISEÑO DE UN FILTRO ACTIVO DE ARMONICOS PARA INVERSOR FV CONECTADO AL SEN”***

---

### **Bibliografía.**

- [1] World Meteorological Organization (WMO), Provisional State of the Global Climate 2022
- [2] José A. C. González; Roque C. Pérez; Antonio C. Santos; Manel-A. C. Gil, Centrales de energías renovables: generación eléctrica con energías renovables, Pearson Educación, Madrid, 2009.
- [3] CRE, Código de Red, Comisión reguladora de energía, 2016.
- [4] Luis C.O. Oliveira; Julio B. de Souza; Ricardo F. Buzo; Juan J. Pérez Álvarez, Harmonic Resonance in Electrical Grids with Photovoltaic Distributed Generation, Department of Electric Engineering, São Paulo, Brazil, 2016.
- [5] Annapoorna Chidurala; tapan Saha; N. Mithulananthan, Harmonic Characterization of Grid Connected PV Systems & Validation with Field Measurements, School of Information Technology and Electrical Engineering, University of Queensland, Brisbane, Australia, 2015.
- [6] Ned Mohan; Tore M. Undeland; William P. Robbins, Electrónica de Potencia convertidores, aplicaciones y diseño, Mc Graw Hill, USA, 2009.
- [7] Linda Hassaine, Implementación de un Control Digital de Potencia Activa y Reactiva para inversores. Aplicación a sistemas fotovoltaicos conectados a Red, Departamento de Tecnología Electrónica de la Universidad Carilo III de Madrid, Leganés, 2010.
- [8] CENACE, Programa de Ampliación y Modernización de la Red Nacional De Transmisión y Redes Generales de Distribución del Mercado Eléctrico Mayorista, Centro Nacional de Control de Energía, México, 2020.
- [9] Diario Oficial de la Federación, Ley General de Cambio Climático, México, 2012.
- [10] Diario Oficial de la Federación, Ley de Transición Energética, México, 2015.
- [11] SENER, Programa de desarrollo del sistema Eléctrico Nacional, México 2022.
- [12] Charles K. Alexander; Mathew N. O. Sadiku, Fundamentos de circuitos eléctricos, Mc Graw Hill, 2006.
- [13] CRE, Energías limpias; oportunidad para lograr la transición energética soberana y cumplir los compromisos internacionales para enfrentar la emergencia climática, Comisión Reguladora de Energía, ciudad de México, 2020.
- [14] AIE, Renewables 2021analysis and forescast to 2026, International Energy Agency, 2021.
- [15] Langlang Gumilar; Wahyu Sapto Nugroho; Stiven Netanel Rumokoy; Dezetty Monika, Photovoltaic (I-PV) Power System Under Harmonic Condition, IEEE, Indonesia, 2020.



## **“DISEÑO DE UN FILTRO ACTIVO DE ARMONICOS PARA INVERSOR FV CONECTADO AL SEN”**

---

- [16] José Manuel B. García; Antonio A. García; Emilio F. Amorós, *Electrónica de Potencia teoría y aplicaciones*, Alfaomega, 2008.
- [17] Muhammad H. Rashid, *Electrónica de potencia*, Prentice Hall INC, Indiana, 1993.
- [18] G. Lemieux, *Power System Harmonic Resonance - A Documented Case*, IEEE Transactions on Industry Applications, 1990.
- [19] G. T. Heydt, *Electric Power Quality*. West LaFayette: Stars in a Circle Publications, 1991.
- [20] J. R. Linders, *Electric Wave Distortions: Their Hidden Costs and Containment*, IEEE Transactions on Industry Applications, 1979.
- [21] J. Arrillaga, D. A. Bradley and P. S. Bodger, *Power System Harmonics*. Chichester UK: John Wiley & Sons, 1985.
- [22] IEEE, *Norma Standard 519, Recommended Practices And Requirements For Harmonic Control In Electric Power Systems*, 1992.
- [23] CFE, *Especificación CFE L0000-45, Desviaciones permisibles en las formas de onda de tensión y corriente en el suministro y consumo de energía eléctrica*, México, 2005.
- [24] Iyo Horikoshi, *Análisis de las componentes armónicas de los inversores fotovoltaicos de conexión a red*, Leganés, 2009.
- [25] Mohamed Amin Moftha; Gaber El-Saady; El-Noby A. Ibrahim, *Active Power Filter For Power Quality Enhancement of Photovoltaic Renewable Energy Systems*, IEEE, Egypt, 2016.
- [26] Abhilash Narasimhan, *DC and AC Active Power filters for Distributed Photovoltaic Grid System*, IEEE, India, 2020.