



**Universidad de Valladolid**



**ESCUELA DE INGENIERÍAS  
INDUSTRIALES**

**UNIVERSIDAD DE VALLADOLID**

**ESCUELA DE INGENIERIAS INDUSTRIALES**

**Grado en Ingeniería Eléctrica**

# **Filtro para la frecuencia de conmutación de un inversor fotovoltaico**

**Autor:**

**Ferrero Delgado, Julio**

**Tutor:**

**Frechoso Escudero, Fernando  
Departamento: Ingeniería Eléctrica**

**Valladolid, Marzo 2018.**



# FILTRO PARA LA FRECUENCIA DE CONMUTACIÓN DE UN INVERSOR FOTOVOLTAICO





## 1. Resumen

El edificio municipal donde se encuentra el Centro Municipal de Acústica de la ciudad de Valladolid consta de dos plantas fotovoltaicas conectadas a red. Al comenzar la realización de ensayos para los cuales está acreditado por la Entidad Nacional de Acreditación (ENAC) se observó que siempre existía un armónico a 8 kHz, aún en el caso en el que se estuviera midiendo en completo silencio. Posteriormente se comprobó que dicho armónico provenía de la instalación fotovoltaica, y más concretamente, del inversor solar. Este ruido eléctrico se introducía a través de la alimentación de los equipos de medida.

El objetivo principal de este trabajo final de grado es estudiar la aplicación de un filtro pasivo pasa - bajo para la eliminación de dicho armónico. Para ello aplicaremos diferentes tipos de filtros y veremos cuál es el filtro más óptimo estudiando la capacidad de atenuación de cada uno de ellos.

## 2. Palabras clave

Armónicos, Inversor, Filtro Pasivo, LCL, TRAP



# ÍNDICE

<b>1. Introducción.....</b>	<b>9</b>
<b>2. Energías renovables.....</b>	<b>13</b>
2.1. Energía solar fotovoltaica.....	14
2.2. Sistema fotovoltaico.....	15
2.3. Componentes de una instalación fotovoltaica.....	16
2.3.1. Panel fotovoltaico.....	16
2.3.2. Acumuladores.....	17
2.3.3. Reguladores.....	17
2.3.4. Inversor.....	17
2.4. Tipos de sistemas fotovoltaicos.....	18
2.4.1. Sistemas fotovoltaicos aislados.....	18
2.4.2. Sistemas fotovoltaicos conectados a red.....	19
<b>3. Inversor.....</b>	<b>21</b>
3.1. Tipos y clasificación.....	22
3.2. Convertidores DC – AC.....	23
3.2.1. Topologías monofásicas.....	25
3.2.2. Topologías trifásicas.....	26
3.3. Requisitos para el inversor en el sistema fotovoltaico.....	27



<b>4. Armónicos.....</b>	<b>31</b>
4.1. Origen de los armónicos.....	33
4.2. Distorsión armónica.....	34
4.3. Problemas causados por los armónicos.....	34
4.4. Normativa y reglamentos.....	35
4.4.1. IEC 61000 – 3 – 2.....	37
4.5. Soluciones para eliminar los armónicos de una instalación.....	38
<b>5. Filtros.....</b>	<b>39</b>
5.1. Tipos de filtros.....	40
5.1.1. Filtro pasivo.....	40
5.1.2. Filtro activo.....	42
5.1.3. Filtro híbrido.....	43
5.2. Respuesta a la frecuencia.....	45
5.3. Filtro pasivo a utilizar. Lugar de ubicación.....	45
5.3.1. Identificación de las anomalías.....	46
5.3.2. Soluciones para el filtrado de perturbaciones.....	46
5.3.3. Lugar de instalación de los equipos de filtrado.....	47
<b>6. Medidas experimentales.....</b>	<b>49</b>
6.1. Objetivo del Trabajo Final de Grado.....	50
6.2. Conclusiones de las pruebas llevadas a cabo.....	56
6.3. Características técnicas del inversor.....	56
6.4. Diseño del filtro.....	58



6.4.1. Filtro LC.....	58
6.4.2. Filtro LCL.....	61
6.4.3. Filtro LCL + “TRAP” .....	67
6.5. Implementación del filtro en el laboratorio.....	69
<b>7. Conclusiones.....</b>	<b>73</b>
<b>8. Bibliografía.....</b>	<b>75</b>
<b>9. Anexos.....</b>	<b>79</b>
9.1. Cálculo de la función de transferencia de un filtro LC.....	80
9.2. Cálculo de la función de transferencia de un filtro LCL.....	81
9.3. Cálculo de la función de transferencia de un filtro LCL + “TRAP” .....	83



# FILTRO PARA LA FRECUENCIA DE CONMUTACIÓN DE UN INVERSOR FOTOVOLTAICO





# ÍNDICE FIGURAS

Figura 1.1 Instalaciones del Centro Municipal de Acústica de Valladolid.....	10
Figura 1.2 Vela solar del Centro Municipal de Acústica de Valladolid.....	10
Figura 2.1 Formación de un generador fotovoltaico.....	16
Figura 2.2 Batería fotovoltaica.....	17
Figura 2.3 Regulador de carga de una instalación fotovoltaica.....	17
Figura 2.4 Inversor fotovoltaico de Onda Pura Victron Energy.....	18
Figura 2.5 Esquema conexión de un sistema fotovoltaico aislado.....	19
Figura 2.6 Esquema conexión de un sistema fotovoltaico conectado a red...	20
Figura 3.1 Tipos de inversores según la forma de conmutación.....	23
Figura 3.2 Forma de onda obtenida por los diferentes tipos de inversores existentes.....	24
Figura 3.3 Esquema inversor de medio puente.....	25
Figura 3.4 Esquema inversor de puente completo.....	25
Figura 3.5 Esquema inversor trifásico de tres ramas.....	26
Figura 3.6 Esquema inversor de cuatro ramas con conexión a neutro.....	26
Figura 3.7 Curva tensión – intensidad.....	27
Figura 4.1 Descomposición de una Onda distorsionada.....	32
Figura 5.1 Funcionamiento de un filtro pasivo.....	42
Figura 5.2 Tipo de filtro a instalar según el armónico producido y el factor de potencia que queremos obtener.....	44
Figura 5.3 Relación entre reducción de armónicos y coste con la aplicación de los distintos tipos de filtros existentes.....	44
Figura 5.4 Distintos tipos de filtros existentes y lugar de colocación.....	48
Figura 6.1 Front – End Brüel & Kjaer 4190 C.....	50
Figura 6.2 Medición con inversor e interruptor en posición ON.....	51
Figura 6.3 Medición con inversor ON e interruptor en posición OFF.....	51



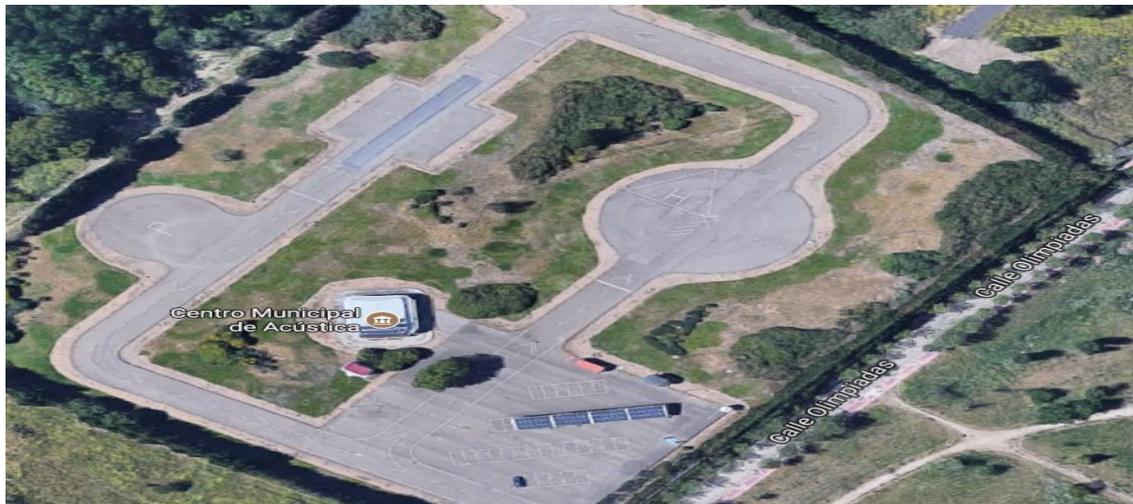
Figura 6.4	Medición con inversor OFF e interruptor en posición OFF.....	52
Figura 6.5	Medición con inversor ON e interruptor en posición ON.....	53
Figura 6.6	Medición con inversor ON e interruptor en posición OFF.....	53
Figura 6.7	Medición con inversor OFF e interruptor en posición ON.....	54
Figura 6.8	Medición con inversor OFF e interruptor en posición OFF.....	54
Figura 6.9	Medición con inversor OFF e interruptor en posición ON.....	55
Figura 6.10	Medición con inversor OFF e interruptor en posición OFF.....	55
Figura 6.11	Inversor utilizado en el CMA.....	56
Figura 6.12	Esquema de un filtro pasivo LC.....	58
Figura 6.13	Diagrama de Bode del filtro LC elegido, obtenido con MATLAB.....	59
Figura 6.14	Respuesta del filtro LC mediante simulación en LTSpice.....	60
Figura 6.15	Esquema de un filtro pasivo LCL.....	61
Figura 6.16	Diagrama de Bode del filtro LCL elegido, obtenido con MATLAB.....	65
Figura 6.17	Respuesta del filtro LCL mediante simulación en LTSpice.....	66
Figura 6.18	Esquema de un filtro pasivo LCL + TRAP.....	67
Figura 6.19	Diagrama de Bode del filtro LCL + TRAP elegido, obtenido con MATLAB.....	68
Figura 6.20	Respuesta del filtro LCL +TRAP mediante simulación en LTSpice.....	69
Figura 6.21	Analizado de armónicos ZES – ZIMMER.....	70
Figura 6.22	Osciloscopio con transformada rápida de Fourier.....	70
Figura 6.23	Implementación para analizar la frecuencia de conmutación del inversor.....	71
Figura 9.1	Filtro LC calculado.....	80
Figura 9.2	Filtro LCL calculado.....	81
Figura 9.3	Filtro LCL + “TRAP” calculado.....	83



# CAPÍTULO 1

# INTRODUCCIÓN

El Centro Municipal de Acústica de la ciudad de Valladolid surge en el año 2002 para hacer realidad un servicio incluido entre los compromisos de la Agenda Local XXI. El edificio que le alberga es prefabricado, y cuenta con una estructura metálica con amplios espacios acristalados [1].



**Figura 1.1** Instalaciones del Centro Municipal de Acústica de Valladolid

En las instalaciones donde se encuentra este centro, se dispone de diverso equipamiento para realizar ensayos de ruido en vehículos y en maquinaria, tanto en parado como en movimiento. También se realizan ensayos de alumbrado tanto interior como exterior.

En dicha instalación existen 2 plantas fotovoltaicas conectadas a red:

La primera planta de generación fotovoltaica de este centro se construyó sobre el edificio prefabricado.



**Figura 1.2** Vela solar del Centro Municipal de Acústica de Valladolid

Esta planta tiene las siguientes características:

- Número de paneles: 48
- Potencia instalada: 5.760 Wp
- Energía generada: 8.640 kWh/año
- Inversión: 34.560 €
- KgCO<sub>2</sub>/año evitados: 7.646

Posteriormente se instaló una nueva planta de generación fotovoltaica, situada en la marquesina del parking.

Tras el montaje de esta última planta, se decide llevar los inversores fuera del edificio, a una distancia aproximada de 150m. Para ello se conectan los paneles solares que se encuentran encima del edificio a través de la correspondiente línea en corriente continua.

En el año 2011, al realizarse unos ensayos para los cuales este centro está acreditado por la Entidad Nacional de Acreditación (ENAC), se detectó que existía un “ruido” a 8 kHz. Realizando una serie de pruebas, que se detallarán en el capítulo 6, se llegó a la conclusión de que el problema derivaba del inversor solar.

Dicho ruido, al sobrepasar los 2 dB con facilidad, provocaba graves problemas a la hora de realizar ensayos, por lo que la instalación fotovoltaica debía apagarse ya que la realización de ensayos entraba en competencia con la generación de energía eléctrica.

Lo interesante de la realización de este trabajo no es la existencia de armónicos, sino la existencia un armónico a elevada frecuencia que “casualmente” se da a la frecuencia de conmutación de los inversores. Todo ello se observó gracias a la utilización de aparatos de gran precisión, pensados para medir frecuencias audibles y no para medir en el rango eléctrico. Si no hubiese sido por este aparato no nos hubiésemos percatado porque en el mundo de la electricidad se consideran los primeros 49 armónicos y a partir de ahí no suele realizarse ningún tipo de estudio.

El objetivo de este Trabajo Final de Grado es dar una solución a este problema de ruido eléctrico en la instalación del Centro Municipal de Acústica del Ayuntamiento de Valladolid, para que se puedan realizar los ensayos que se deseen sin la necesidad de apagar la planta fotovoltaica.



Este Trabajo Final de Grado se dividirá en 5 apartados:

- Energías renovables: en este apartado se verán qué tipos de sistemas fotovoltaicos existen, cuales son los componentes que componen una instalación fotovoltaica, etc.
- Inversor: se detallarán los diferentes tipos de inversores existentes para instalaciones fotovoltaicas.
- Armónicos: se dará una breve descripción de los problemas que causan los armónicos eléctricos de baja frecuencia en las instalaciones, y unas soluciones con las cuales podemos evitar estos fenómenos.
- Filtros: en este apartado se verán los diferentes tipos de filtros existentes, lugares de conexión de estos, etc.
- Medidas experimentales: aquí se tratara en detalle cómo se encontró el problema, y cuál es la solución adoptada.

Por último, daré una serie de conclusiones que he obtenido tras la realización de este Trabajo Final de Grado.



# CAPÍTULO 2

# ENERGÍAS RENOVABLES

Energía Renovable se define como energía que se obtiene de fuentes naturales, en principio inagotables, bien sea por la inmensa cantidad de energía que contiene, o bien porque son capaces de regenerarse por medios naturales a una velocidad igual o superior a la de consumo.

Las energías renovables provienen de la energía solar directamente, como es el caso de la luz y el calor procedente de la radiación solar, o indirectamente, como las energías eólica, mareomotriz, etc.

Este tipo de energía es un tipo de energía limpia debido a que no contaminan, como si lo hace su alternativa, las energías no renovables (carbón, petróleo, gas natural, etc.).

Otra de las ventajas de la utilización de las energías renovables es el impulso del empleo y la economía regional, ya que las inversiones en proyectos de estas energías utilizan materiales y recursos humanos para construir y mantener las instalaciones, además de proveer de suministro energético a la región. Así, si aumenta el uso de las fuentes renovables, disminuirá la dependencia energética en los países exportadores de energía [4].

Hay diferentes tipos de energía renovables:

- Energía eólica
- Energía de la biomasa
- Diferencia de Temperatura Oceánica (OTEC)
- Energía mareomotriz
- Energía hidráulica

## 2.1 Energía solar fotovoltaica

La energía solar fotovoltaica pertenece al grupo de las energías renovables. Es un tipo de energía que se obtiene gracias al uso de celdas fotoeléctricas, donde se convierte la luz proveniente del sol en energía eléctrica.

Algunos ejemplos de utilización de energía solar fotovoltaica son los siguientes:

- Alimentación de sistemas de energía
- Alimentación alumbrado aislado
- Venta de electricidad a compañías eléctricas

## Ventajas de la energía solar fotovoltaica

La energía solar fotovoltaica presenta numerosas ventajas frente a otros tipos de obtención de energía [4]:

- Combustible gratis
- Simplicidad de obtención de energía
- Modularidad
- Versatilidad
- Escaso tiempo de montaje
- Refuerzo de la red eléctrica
- Seguridad
- Electrificación rural o áreas remotas
- Protección climática
- Inserción visual y ahorro de espacio
- Mantenimiento sencillo

## 2.2 Sistema Fotovoltaico

Un sistema fotovoltaico se define como un conjunto de elementos (mecánicos, eléctricos y electrónicos) que trabajando en conjunto son capaces de captar y transformar la energía solar, transformándola en energía eléctrica.

Independientemente de su utilización y su tamaño de potencia, podemos distinguir dos categorías:

- Conectado a red
- Aislados

## 2.3 Componentes de una instalación fotovoltaica

Una instalación fotovoltaica, tanto conectada a red, como aislada, se compone de los siguientes componentes:

- Panel fotovoltaico
- Acumuladores o baterías
- Regulador
- Inversor

### 2.3.1 Panel fotovoltaico

Los paneles fotovoltaicos o módulos fotovoltaicos son grupos de células solares, incorporados en una misma unidad. Generalmente estas células se sueldan unas con otras bajo una lámina de vidrio.

El tamaño del panel fotovoltaico puede adaptarse fácilmente al emplazamiento propuesto, y su instalación es rápida. Los paneles fotovoltaicos son sólidos, fiables y resistentes al agua.

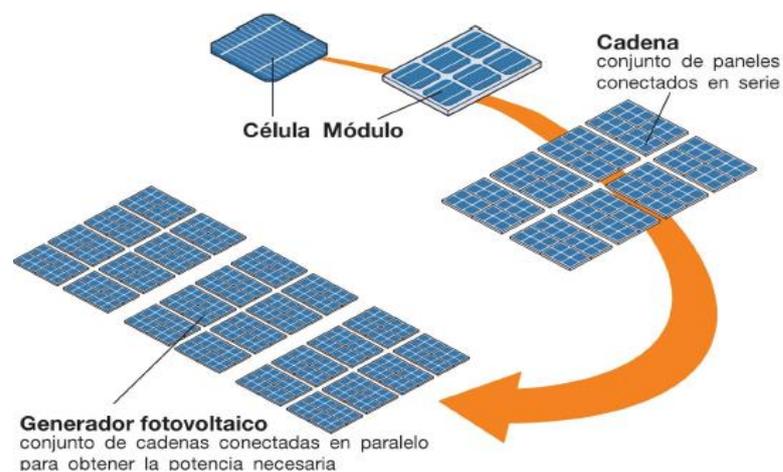


Figura 2.1 Formación de un generador fotovoltaico. Fuente [11]

## 2.3.2 Acumuladores

Un acumulador es un dispositivo capaz de transformar una energía potencial química en energía eléctrica. La misión de estos dispositivos es almacenar la energía producida por los módulos fotovoltaicos, o bien, cuando la situación lo requiera, proveer de energía a las cargas.



Figura 2.2 Batería fotovoltaica. Fuente [11]

## 2.3.3 Reguladores

El regulador de carga sirve para preservar a los acumuladores de un posible exceso de descarga debido al exceso de uso de cargas, o bien, de un posible exceso de carga por parte del generador. Ambas circunstancias son nocivas para el correcto funcionamiento de las baterías.



Figura 2.3 Regulador de carga de una instalación fotovoltaica. Fuente [11]

## 2.3.4 Inversor

El inversor es el dispositivo que transforma la corriente continua (DC) producida por los generadores fotovoltaicos en corriente alterna (AC) para poder utilizar todos los aparatos eléctricos y electrónicos de los que se dispongan. Es un aparato fundamental para los sistemas fotovoltaicos conectados a red, debido a que para poder transportar la energía producida por los generadores fotovoltaicos a la red, esta tiene que cumplir con ciertos

requisitos. Posteriormente hablaremos mas en profundidad de este dispositivo.



Figura 2.4 Inversor fotovoltaico de Onda Pura Victron Energy. Fuente [11]

## 2.4 Tipos de sistemas fotovoltaicos

### 2.4.1 Sistemas fotovoltaicos aislados

Estas instalaciones fotovoltaicas son ideales en regiones donde la conexión a la red eléctrica no es posible, o bien no está prevista la construcción de una red eléctrica debido a los altos costes de desarrollo de la construcción de esta. También se utilizan normalmente para proporcionar electricidad a usuarios con pequeños consumos de energía, para los cuales no les compensa pagar el coste de conexión a la red eléctrica. Según algunos estudios, a partir de distancias de más de 3 km de la red eléctrica existente, podría ser conveniente la instalación de este tipo de sistema.

Los sistemas fotovoltaicos aislados están compuestos por:

- Módulos fotovoltaicos
- Regulador de carga
- Batería de acumulación
- Inversor fotovoltaico

El funcionamiento de este tipo de sistema es el siguiente:

La energía producida por los módulos fotovoltaicos es almacenada en la batería de acumulación. La carga demandada por el consumidor es alimentada a través de un regulador de carga, el cual protege a las baterías de acumulación de los posibles excesos de carga por parte del generador fotovoltaico, como de la posible descarga por exceso de uso. Tanto el exceso de carga como la excesiva descarga de los acumuladores son nocivos para el correcto funcionamiento de las baterías. La carga que atraviesa el regulador

de carga es en corriente continua, pero para poder alimentar algunos aparatos del usuario (tv, cargadores, microondas, etc.) necesitamos corriente alterna. Esta transformación es llevada a cabo gracias a los inversores. El inversor ha de estar dimensionado para poder alimentar directamente la carga que se le quiere conectar. Si se quisiera alimentar cargas que se alimenten en corriente continua, como las bombillas, no sería necesario la existencia de un inversor.

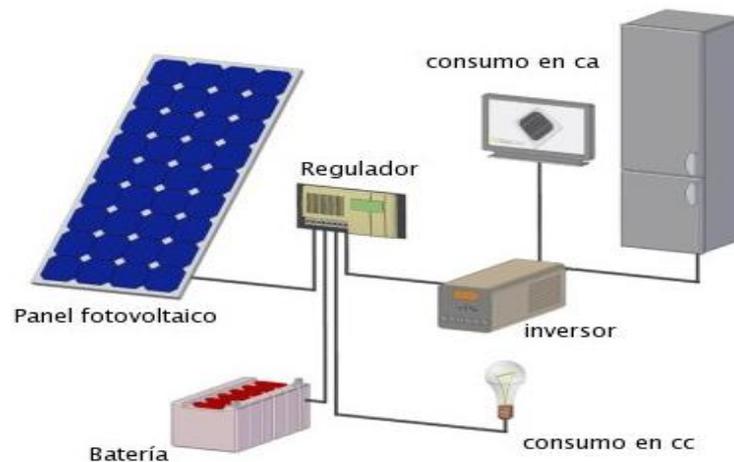


Figura 2.5 Esquema conexión de un sistema fotovoltaico aislado. Fuente [11]

### 2.4.2 Sistemas fotovoltaicos conectados a red

Este tipo de sistema fotovoltaico vierte a la red parte, o la totalidad de la energía que genera en sus paneles solares. No es necesario la existencia de acumuladores en estos sistemas debido a que siempre vamos a tener el respaldo de la red eléctrica tradicional.

Las principales ventajas de este sistema son las siguientes:

- Permiten una generación distribuida:

Con esto conseguimos minimizar pérdidas en el transporte y ahorrar en nuevas instalaciones y más contaminantes.

- La producción es máxima en las horas centrales del día:

Introducimos gran cantidad de energía en esas horas, y eso nos permite obtener mayores beneficios económicos.

En estos sistemas es necesario conectar las líneas de distribución, cumpliendo con la normativa de la compañía eléctrica. También será necesario la inclusión de un sistema de medición, mediante el cual el

propietario, una vez dispone del Régimen Especial de Producción de Energía (REPE), factura la energía introducida en la red eléctrica de la planta fotovoltaica.

Los principales componentes que conforman un sistema fotovoltaico conectado a red son los siguientes:

- Módulos fotovoltaicos
- Inversor para conexión a red
- Dispositivo de intercambio con la red eléctrica
- Contador de energía bidireccional



Figura 2.6 Esquema conexión de un sistema fotovoltaico conectado a red.  
Fuente [11]



# CAPÍTULO 3

# INVERSOR

El inversor fotovoltaico es uno de los componentes que mayor importancia tiene en las instalaciones fotovoltaicas, pero mayor aun en los sistemas conectados a red, ya que maximiza la producción de corriente del dispositivo fotovoltaico. Es capaz de controlar y optimizar el paso de energía entre el modulo y la carga, además de transformar la energía continua producida por el generador fotovoltaico, en energía alterna (generalmente 220V), para alimentar el sistema y/o introducirla en la red.

En un sistema fotovoltaico con conexión a la red eléctrica, la corriente continua (DC) generada por el equipo fotovoltaico debe ser convertida a corriente alterna, para posteriormente poder ser inyectada a la red eléctrica. Por ello es imprescindible el uso de un inversor que realice dicha función, con especial atención a que cumpla con las características de amplitud, frecuencia y fase que la corriente de la red.

Los inversores para la conexión a la red eléctrica están equipados por dispositivos electrónicos que permiten obtener la máxima potencia del generador fotovoltaico. Este dispositivo tiene la función de adaptar las características de producción del campo fotovoltaico a las exigencias de la carga.

Los inversores utilizados para utilizar en instalaciones conectadas a red tendrán una potencia de entrada variable, para ser capaz de extraer en todo momento la máxima potencia que el generador fotovoltaico puede producir [4].

### 3.1 Tipos y clasificación

Los semiconductores de potencia utilizados en los inversores fotovoltaicos actualmente son los Transistores de potencia: MOSFETs e IGBT [12]:

A mayor frecuencia de conmutación se obtiene una onda de salida mucho más cercana a la onda senoidal ideal, con un menor contenido en armónicos y factores de potencia enormemente buenos, eliminando de este modo la necesidad de filtrados a la salida del inversor.

Los transistores IGBT llegan a unas frecuencias de conmutación de  $10^5$  Hz, mientras que los MOSFET llegan a frecuencias de conmutación de  $10^8$  Hz.

Los inversores más utilizados en la actualidad son los inversores autoconmutados. Estos inversores pueden funcionar tanto como fuente de tensión como fuente de corriente. Además, pueden variar la frecuencia en función de la potencia de entrada y la carga de salida. La regulación de tensión mediante este tipo de inversores suele realizarse mediante modulación del ancho de pulso PWM, conmutando a alta frecuencia. La señal de salida suele ser muy sinusoidal con contenidos de armónicos de muy alta frecuencia, fácilmente filtrables. Los armónicos que aparecen son debidos a la frecuencia de conmutación (típicamente de 1kHz a 20kHz).

### 3.2 Convertidores DC-AC

Los inversores también pueden clasificarse dependiendo de la topología de sus circuitos de potencia.

Los dispositivos electrónicos reales suelen conducir la corriente solo en una dirección, y es usual encontrarse con corrientes negativas (cuando hay cargas R-L) por lo que se disponen diodos en paralelo con los interruptores para garantizar una continuidad de la corriente [4] [13].

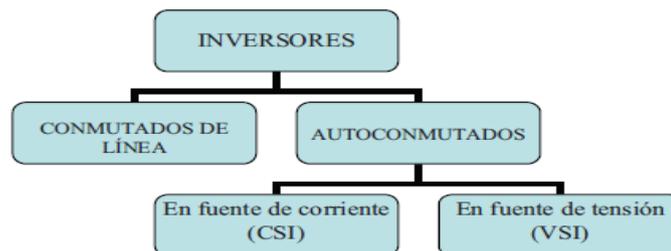


Figura 3.1 Tipos de inversores según la forma de conmutación. Fuente [4]

- INVERSORES DE ONDA CUADRADA

Este tipo de inversores se basan en un simple “chopeado” de la potencia DC de entrada, con muy poca modulación o filtrado. Estos inversores son los más baratos, pero también los menos eficientes. Producen demasiados armónicos que generan interferencias (ruidos) y pérdidas de potencia. Su rendimiento está en torno a 50-60% y producen una distorsión armónica elevada. Son válidos para alimentar pequeñas cargas resistivas o inductivas. En la actualidad apenas son utilizados.

- INVERSORES DE ONDA MODIFICADA O QUASI-SENOIDAL

Este tipo de inversores utilizan técnicas de modulación de ancho de pulso. El ancho de la onda es modificada para acercarla lo más posible a una onda senoidal. El contenido en armónicos es mucho menor que en un inversor de onda cuadrada. Son los que mejor relación calidad/precio ofrecen para la conexión de iluminación, televisión o variadores de frecuencia. En la actualidad apenas son utilizados.

- INVERSORES DE ONDA SENOIDAL

Este tipo de inversores contiene una electrónica más elaborada, con la que se puede conseguir una onda senoidal pura. Los rendimientos de estos inversores rondan el 90%, dependiendo de la potencia. El inconveniente de este tipo de inversores es el precio. En la actualidad son los inversores que más se utilizan.

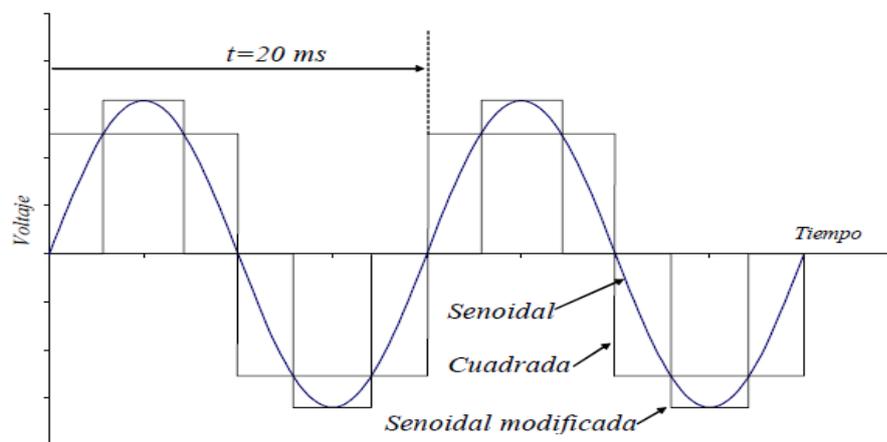


Figura 3.2 Forma de onda obtenida por los diferentes tipos de inversores existentes. Fuente [13]

### 3.2.1 Topologías monofásicas

- ❖ Puente inversor de una rama o medio puente

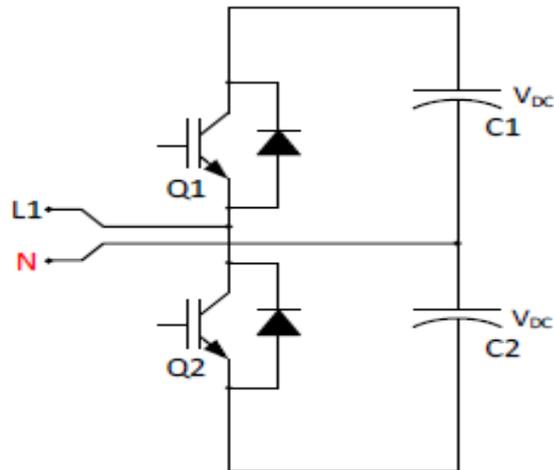


Figura 3.3 Esquema inversor de medio puente. Fuente [14]

- ❖ Puente inversor de dos ramas o de puente completo

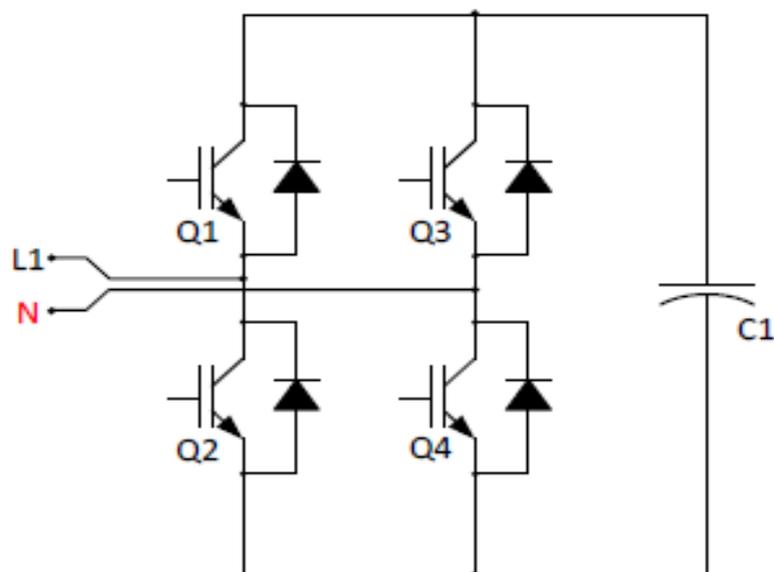


Figura 3.4 Esquema inversor de puente completo. Fuente [14]

### 3.2.2 Topologías trifásicas

El puente inversor puede implementarse de diferentes formas, según el número de niveles que puede generar a la salida. Existen 2 tipos:

- ❖ Puente inversor trifásico de tres ramas

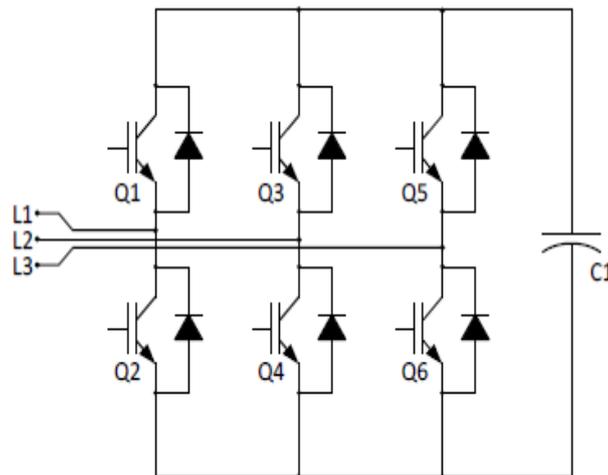


Figura 3.5 Esquema inversor trifásico de tres ramas. Fuente [14]

- ❖ Puente trifásico de cuatro ramas con conexión a neutro

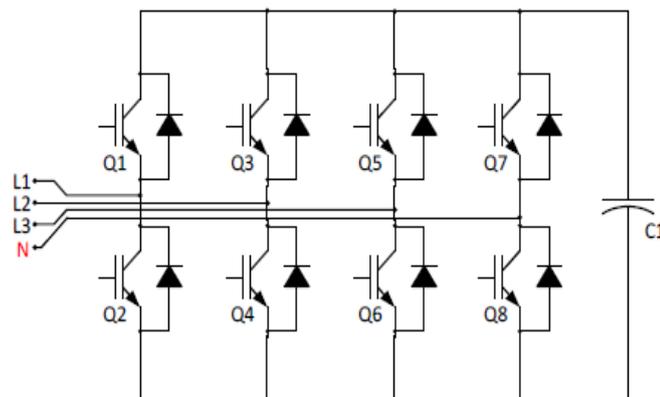


Figura 3.6 Esquema inversor de cuatro ramas con conexión a neutro.  
Fuente [14]

### 3.3 Requisitos para el inversor en el sistema fotovoltaico

Las características de los inversores serán las siguientes [4] :

- Principio de funcionamiento autoconmutado con fuente de corriente.
- No funcionará en isla o en modo aislado
- Disponer de sistema de seguimiento automático del punto de máxima potencia del generador

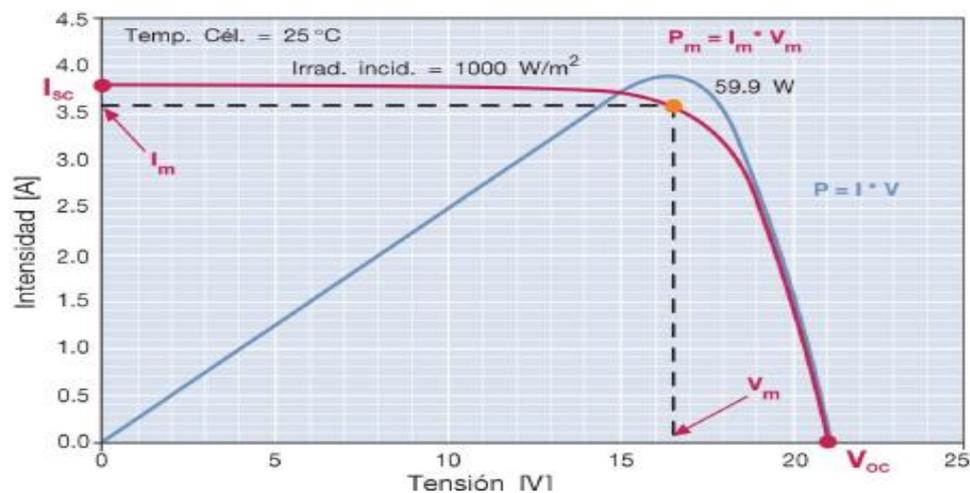


Figura 3.7 Curva tensión – intensidad. Fuente [11]

Los inversores, bajo el punto de vista de la seguridad, deben cumplir con las directivas comunitarias de Seguridad Eléctrica y compatibilidad electromagnética, incorporando protecciones frente a [15]:

- Cortocircuito en alterna
- Tensión de red fuera de rango
- Frecuencia de red fuera de rango
- Sobretensiones mediante varistores o similares

- Perturbaciones presentes en la red como microcortes, pulsos, defectos de ciclos, ausencia y retorno de la red, etc.

Cada inversor dispondrá de las señalizaciones necesarias para su correcta operación, e incorporará los controles automáticos imprescindibles que aseguren su adecuada supervisión y manejo.

En lo que respecta a su manejo, cada inversor dispondrá de, al menos, los controles manuales siguientes:

- Encendido y apagado general del inversor
- Conexión y desconexión del inversor a la interfaz AC

Las características de rendimiento de los inversores, vienen especificadas en el pliego de Condiciones Técnicas para Sistemas Fotovoltaicos del I.D.A.E.:

- El inversor seguirá entregando potencia a la red de forma continuada en condiciones de irradiación solar de un 10% superiores a las CEM. También deberá soportar durante periodos de hasta 10 segundos picos de un 30% superior a las CEM.
- Para inversores de potencia inferior de 5kW, los valores de eficiencia al 25% y 100% de la potencia de salida nominal deberán ser superiores al 85 y 88% respectivamente, incluyendo el transformador de salida si lo hubiere, En caso de potencias superiores a 5 kW estos valores aumentan hasta el 90 y 92% respectivamente.
- El consumo propio de los equipos (perdidas en vacío) en "stand-by" o "modo nocturno" deberá ser inferior a un 2% de su potencia de salida nominal.
- El factor de potencia de la potencia generada deberá ser superior a 0,95 para valores comprendidos entre el 25 y el 100% de la potencia nominal.
- El inversor ha de inyectar energía a la red, siempre y cuando la potencia sea mayor del 10% de su potencia nominal.
- El grado de protección mínima (IP) varia, según el lugar donde se pretendan instalar:



- Inversores en el interior de edificios y lugares inaccesibles: IP22
- Inversores instalados a la intemperie: IP65
- En cuanto a las condiciones de trabajo, los inversores han de estar garantizados para poder operar en las siguientes condiciones ambientales: entre 0°C y 40°C de temperatura, y entre 0% y 85% de humedad relativa.



## FILTRO PARA LA FRECUENCIA DE CONMUTACIÓN DE UN INVERSOR FOTOVOLTAICO



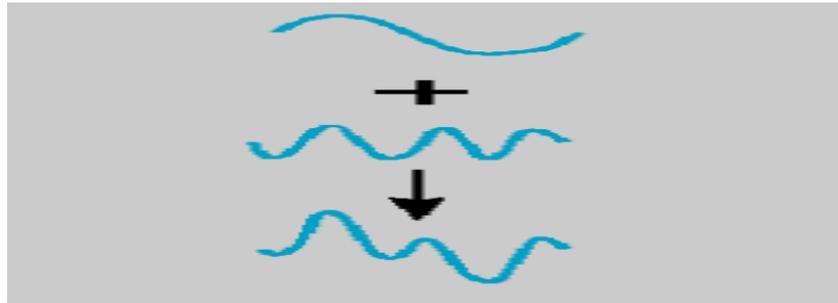


# CAPÍTULO 4

# ARMÓNICOS

Los armónicos se pueden definir, según la Comisión Electrotécnica Internacional (IEC 60050), como un componente de orden superior a 1 de la serie de Fourier de una cantidad periódica. Es decir, en sistemas eléctricos de corriente alterna, los armónicos oscilan senoidalmente a frecuencias múltiplo de la frecuencia fundamental de trabajo (50 Hz en Europa) [4] [9].

La transformación de Fourier permite descomponer una onda periódica en la suma de ondas senoidales con diferentes frecuencias y amplitudes.



**Figura 4.1 Descomposición de una Onda distorsionada**

Los datos más importantes de los armónicos son los siguientes:

- Amplitud: Hace referencia al valor de la tensión o intensidad del armónico. Normalmente se expresa en un porcentaje del fundamental.
- Orden: Hace referencia al valor de su frecuencia referido al fundamental (en España 50 Hz)

En electricidad, cuando se habla de armónicos, nos referimos a armónicos de corriente, debido a que son los más problemáticos. Estos se originan como corrientes, siendo sus mayores efectos negativos debidos a estas corrientes.

Para obtener conclusiones útiles, es necesario conocer el espectro de las corrientes armónicas presentes. Para ello es conveniente trabajar únicamente con valores que correspondan a la distorsión armónica total (THD).

Cuando estos armónicos se propagan por un sistema de distribución, es decir, por partes del circuito en el cual no se transportan corrientes armónicas, lo hacen en forma de tensión. Por esto es muy importante que se midan tanto los valores de tensión, como los de corriente. Normalmente las medidas de distorsión suelen identificarse mediante el sufijo “I” para distorsiones de corriente, o “V” para distorsiones de tensión

A continuación se explica el origen y los problemas de la existencia de armónicos en la red eléctrica.

## 4.1 Origen de los armónicos

Las corrientes de carga armónicas las generan un tipo de cargas, denominadas cargas no lineales. Las cargas no lineales a pesar de ser alimentadas con una tensión sinusoidal absorben una tensión no sinusoidal, pudiendo estar la corriente desfasada un ángulo  $\varphi$  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 [4] [9].

Estas cargas no lineales las podemos dividir en 2 grupos:

- Cargas monofásicas
  - Fuentes de alimentación de funcionamiento conmutado
  - Estabilizadores electrónicos de dispositivos de iluminación fluorescente
  - Pequeñas unidades de Sistemas de Alimentación Ininterrumpida (SAI o UPS)
- Cargas trifásicas
  - Motores de velocidad variable
  - Grandes unidades de SAI

En la actualidad, prácticamente todos los equipos eléctricos y electrónicos contienen fuentes de alimentación de funcionamiento conmutado o disponen de alguna forma de control de la alimentación. Estas cargas, por tanto, son cargas no lineales. Las cargas lineales son relativamente raras de encontrar, siendo ejemplos comunes de ellas las lámparas de incandescencia de intensidad no regulable y las estufas no programables.

## 4.2 Distorsión armónica

La distorsión armónica de una onda representa el contenido en armónicos que contiene una señal. La cantidad de distorsión que presenta una forma de onda de tensión o corriente se cuantifica mediante un índice llamado distorsión armónica total (THD), definido tanto para tensiones como para corrientes [16].

Las ecuaciones son las siguientes:

$$THD_v = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} V_h^2}}{v_1}$$

$$THD_I = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} I_h^2}}{I_1}$$

Donde  $THD_v$  es la tasa de distorsión armónica para tensiones y  $THD_I$  es la tasa de distorsión armónica para corrientes.

## 4.3 Problemas causados por los armónicos

Las corrientes armónicas pueden ocasionar problemas tanto dentro de la instalación, como en el sistema de suministro de energía. Los efectos y soluciones a estos problemas son muy distintos en todos los casos y deben abordarse por separado [5].

Los problemas derivados de la presencia de armónicos pueden ser divididos en diversas áreas, las cuáles veremos a continuación:

- ❖ Problemas causados por las corrientes armónicas:
  - Sobrecalentamiento de conductores neutros y transformadores.
  - Disparos intempestivos de Interruptores Automáticos y Diferenciales.
  - Sobrecarga de los condensadores de corrección del factor de potencia.

- Efecto superficial
- Disminución del factor de potencia
  
- ❖ Problemas causados por las tensiones armónicas:
  - Distorsión de la tensión.
  - Motores de inducción.
  - Ruido de paso por cero.
  
- ❖ Problemas que se producen cuando las corrientes armónicas llegan a la fuente de alimentación.
  
- ❖ Etc.

A estos problemas que acarrea la presencia de los armónicos en las instalaciones, hay que añadirle problemas económicos:

- Necesidad de sobredimensionamiento tanto de los conductores, como de la potencia contratada en una instalación.
- Necesidad de sustitución de los aparatos y maquinas dañados por los armónicos.
- Paradas de producción debidas a los disparos intempestivos de los elementos de protección y mando.

## 4.4 Normativa y reglamentos

Para la conexión de una planta fotovoltaica a red, es necesario seguir ciertas normas y reglamentos, de aplicación general para todos los tipos de proyectos. La legislación a cumplir incluye normativa europea, estatal, autonómica y en su caso, también legislación estatal [6].



- Real Decreto 413/2014, de 6 de Junio, por el que se regula la actividad de producción de energía eléctrica a partir de fuentes de energía renovables, cogeneración y residuos.
- Real Decreto 842/2002, de 2 de Agosto, por el que se aprueba el Reglamento Electrotécnico de Baja Tensión.
- Real Decreto 1955/2000 de 1 de Diciembre, por el que se regulan las actividades de transporte, distribución, comercialización, suministro y procedimientos de autorización de instalaciones de energía eléctrica.
- Real Decreto 1699/2011, de 18 de noviembre, por el que se regula la conexión a red de instalaciones de producción de energía eléctrica de pequeña potencia.
- Ley 54/1997 de 27 de Noviembre, del Sector Eléctrico. Establece los principios de un nuevo modelo de funcionamiento basado en la libre competencia, impulsando el desarrollo de instalaciones de producción de energía eléctrica en régimen especial.
- Decreto 352/2001, de 18 de Diciembre, sobre procedimiento administrativo aplicable a las instalaciones de energía solar fotovoltaica conectadas a la red eléctrica.
- Normativa de la compañía IBERDROLA.
- Pliego de Condiciones Técnicas de Instalaciones Solares Fotovoltaicas Conectadas a Red, IDEA.
- Real Decreto 436/2004, de 12 de Marzo, por el que se establece la metodología para la actualización y sistematización del régimen jurídico y económico de la actividad de producción de energía eléctrica en régimen especial.
- UNE – EN 61173:98 “Protección contra las sobretensiones de los sistemas fotovoltaicos productores de energía”.
- UNE – EN 61727:96 “Sistemas fotovoltaicos. Características de la interfaz de conexión a la red eléctrica”.
- Real Decreto 1110/2007, de 24 de agosto, por el que se aprueba el Reglamento unificado de puntos de medida del sistema eléctrico.

De especial importancia es la IEC 61000-3-2, en la cual se establecen los límites para las emisiones de corriente armónica, para equipos con corriente de entrada  $\leq 16$  A [7].

#### 4.4.1 IEC 61000 – 3 – 2

La IEC (International Electrotechnical Commission) y el CENELEC (Comité Europeo de Normalización Europeo) han establecido unas normas que limitan las perturbaciones de baja frecuencia en redes industriales y domésticas, como las normas IEC 61000 y EN 61000.

La serie IEC 61000 es el conjunto de normas por el cual nos tenemos que regir en compatibilidad electromagnética. En el estándar IEC 61000-3-2 se especifican los límites y emisiones de armónicos, para equipamiento que tenga corriente de entrada menor o igual a 16 amperios por fase adecuados para la conexión a la red pública de distribución de corriente alterna de baja tensión.

La normativa distingue entre 4 clases diferentes en la EN 61000-3-2 [7] [16]:

CLASE A: Equipos trifásicos equilibrados, aparatos electrodomésticos (excluyendo equipamiento identificado como clase D), herramientas (excepto portátiles), reguladores para lámparas incandescentes, equipos de audio y todos los demás equipos no indicados en cada una de las siguientes clases).

CLASE B: Herramientas portátiles.

CLASE C: Equipos de iluminación (excepto reguladores de lámparas incandescentes, incluido en clase A).

CLASE D: PC, monitores de PC, receptores de TV. Todo aquello con una potencia de entrada  $P \leq 600$ W.

## 4.5 Soluciones para eliminar los armónicos de una instalación

Existen ciertas técnicas con las cuales se intenta minimizar los daños producidos por armónicos, tales como [5]:

- Sobredimensionamiento de conductores y pletinas.
- Utilización de un neutro para cada fase.
- Utilización de diferenciales superinmunizados, calibrados para soportar altas tasas de THD.

Si bien, estas técnicas no eliminan los armónicos. Para proceder a su eliminación, se utilizan una serie de técnicas más especializadas, y por lo tanto más caras. Algunas de estas técnicas son:

- Utilización de transformadores de aislamiento de estrella-triángulo, con secundario en zig - zag o con doble secundario.
- Filtros pasivos como las impedancias antiarmónicas o los llamados "shunt resonantes" formados por elementos pasivos como inductancias y condensadores.
- Filtros activos y convertidores "limpios".
- Separación de los elementos no lineales de las "cargas limpias" en una instalación eléctrica.
- Impedancias de alisado conectadas a las cargas no lineales.



# CAPÍTULO 5

# FILTROS

Los filtros que se fabricaban con resistencias, capacitores e inductores, fueron introducidos tanto en Alemania, como en EEUU en el año 1915. Posteriormente en el año 1955, los investigadores R. P. Sallen y E. L. Key diseñaron otro tipo de filtros, conocidos como filtros Sallen Key, donde los cálculos matemáticos se simplificaron utilizando resistencias, capacitores y amplificadores operacionales [8].

Un filtro es un circuito con el cual se permite el paso de una determinada banda de frecuencias, mientras el resto de señales que no están dentro de esa banda de frecuencias son atenuadas.

## 5.1 Tipos de filtros

Los métodos genéricos para reducir los armónicos se pueden dividir en tres apartados:

- Filtros pasivos
- Filtros activos
- Filtros híbridos

### 5.1.1 Filtro pasivo

Los filtros pasivos se componen de resistencias, inductores o capacitores.

Este tipo de filtros fueron, cronológicamente, los primeros en desarrollarse, ya que a principios del siglo XX no existían filtros activos, o eran muy caros y voluminosos. Son utilizados para establecer un camino de baja impedancia para las corrientes armónicas, de forma que circulen por el filtro y no por la fuente de alimentación [9].

Estos tipos de filtros se suelen utilizar en las siguientes instalaciones:

- Instalaciones que requieren corrección del factor de potencia
- Instalaciones en las que la distorsión de tensión debe reducirse para evitar perturbar las cargas sensibles.
- Instalaciones en las que la distorsión de corriente debe reducirse para evitar sobrecargas.

Suelen instalarse en paralelo con la carga no lineal, absorbiendo los armónicos para evitar que circulen por la red de distribución. Se ajustan al rango de armónicos que se desea eliminar, utilizando ramificaciones de filtros en paralelo para una eliminación más global. Se basan en proporcionar a las corrientes armónicas un camino de impedancia mucho menor que la red exterior, actuando como sumideros de las mismas.

Ventajas:

- Bajo coste
- Reducen tensiones armónicas de la tensión de alimentación
- Corrección del factor de potencia

Inconvenientes:

- Selectividad: no compensan todo el margen de armónicos deseado
- La resonancia entre filtro e impedancia de la fuente puede causar amplificaciones de las tensiones armónicas
- El filtro puede provocar una resonancia paralela con la red de suministro, amplificando las corrientes armónicas
- Los filtros pasivos, debido a su componente resistiva, tienen un consumo de componente fundamental, provocando armónicos de tensión
- El número de secciones del filtro será mayor cuanto más elevado sea el número de armónicos a atenuar.
- El filtro de absorción está adaptado a una configuración concreta de red y estado de cargas. Por lo tanto, no podrán eliminarse ni añadirse cargas a un grupo compensado de esta forma

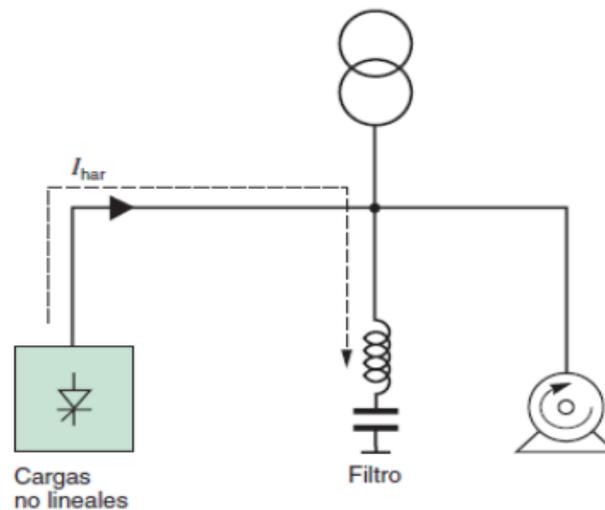


Figura 5.1 Funcionamiento de un filtro pasivo. Fuente [9]

### 5.1.2 Filtro activo

Los filtros activos se componen de los siguientes componentes: amplificadores operacionales, resistencias, inductores y capacitores.

Las desventajas que relacionadas con el uso de filtros pasivos, pueden ser solventadas con la utilización de filtros activos. Los filtros activos están basado en la utilización de IGBT con el fin de reducir los armónicos, y por tanto mejorar el factor de potencia. El filtro activo mide la magnitud de la corriente armónica y crea la misma intensidad armónica en la corriente opuesta a la corriente armónica original. Por tanto, ambas corrientes al ser de la misma magnitud y opuestas, se anulan entre sí, reduciéndose el contenido en armónicos. Este método se aplica con éxito tanto a sistemas monofásicos como a sistemas trifásicos [9].

En este tipo de filtros los inductores no suelen emplearse debido que son componentes muy voluminoso, caros y a veces tienen componentes resistivas de elevada magnitud.

Ventajas:

- Compensa los armónicos de carga más perjudiciales
- Eliminación de armónicos de orden superior e inferior
- Reducción del ancho de banda del control de corriente
- Error relativamente bajo debido a un uso de bucle cerrado

- Amplio rango de tensión de entrada
- Reduce el coste energético
- Protección contra sobretensiones y transitorios
- Fácil de sintonizar
- Tamaño pequeño

Inconvenientes:

- Necesita fuente de alimentación
- Susceptibles de distorsión por intermodulación
- Algoritmo especial para reducir la distorsión proveniente de la tensión de red
- Estudio pormenorizado, para evitar sobrecostes y sobredimensionados

### 5.1.3 Filtro híbrido

Este tipo de filtros es una combinación de los filtros activos y pasivos. Abarca un amplio rango de niveles de potencia y rendimiento, ofreciendo las ventajas de los filtros de los cuales deriva [9].

Este tipo de filtros se utiliza en para los siguientes casos:

- Reducir la distorsión de la tensión para evitar perturbar las cargas sensibles
- Reducir la distorsión de corriente para evitar sobrecargas
- Cumplir de manera muy estricta los niveles de emisiones armónicas

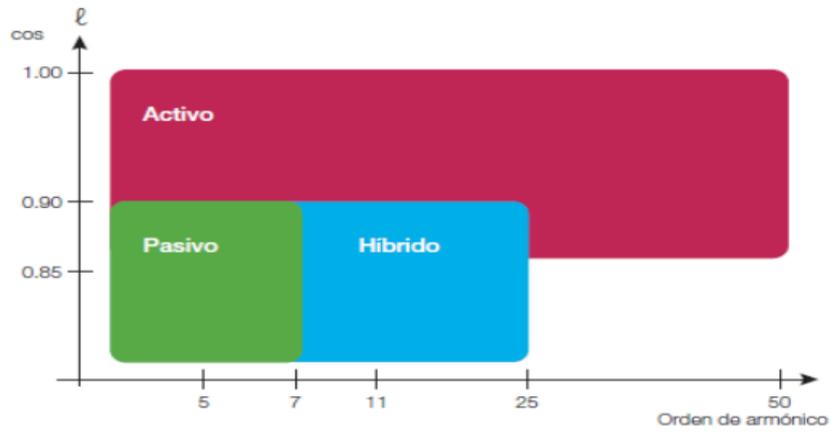


Figura 5.2 Tipo de filtro a instalar según el armónico producido y el factor de potencia que queremos obtener. Fuente: [9]

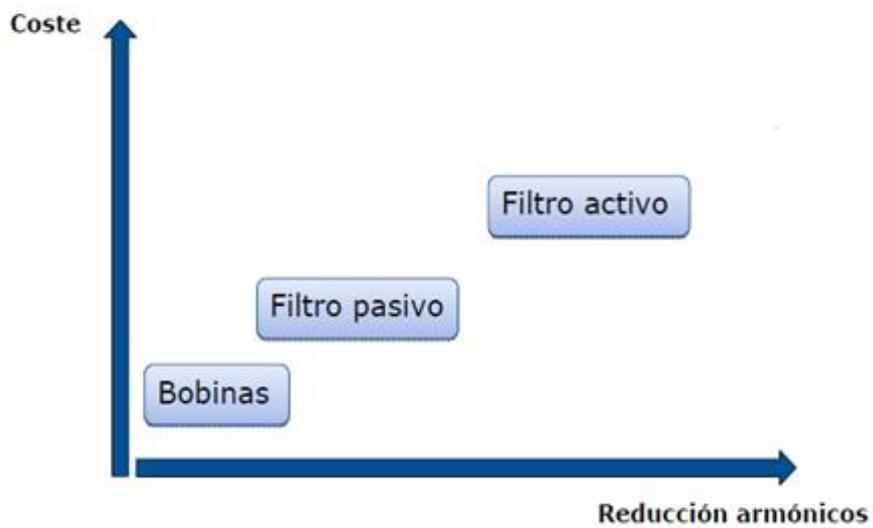


Figura 5.3 Relación entre reducción de armónicos y coste con la aplicación de los distintos tipos de filtros existentes.

## 5.2 Respuesta a la frecuencia

Según su respuesta en frecuencia, los filtros tanto pasivos como activos pueden clasificarse básicamente en cuatro categorías diferentes [17]:

- Filtro pasa bajos:

Son aquellos que introducen muy poca atenuación a las frecuencias que son menores que la frecuencia de corte. Las frecuencias que son mayores que la de corte son atenuadas fuertemente.

- Filtro pasa altos

Este tipo de filtro atenúa levemente las frecuencias que son mayores que la frecuencia de corte e introducen mucha atenuación a las que son menores que dicha frecuencia.

- Filtro pasa banda

En este filtro existen dos frecuencias de corte, una inferior y otra superior. Este filtro solo atenúa las señales cuya frecuencia sea menor que la frecuencia de corte inferior y aquellas cuya frecuencia sea superior a la frecuencia de corte superior. Por tanto, solo permiten el paso de un rango o banda de frecuencias sin atenuar.

- Filtro elimina banda

Este filtro elimina en su salida todas las señales que tengan una frecuencia comprendida entre una frecuencia de corte inferior y otra de corte superior. Por tanto, estos filtros eliminan una banda completa de frecuencias de las introducidas a su entrada.

## 5.3 Filtro pasivo a utilizar. Lugar de ubicación

Nos centraremos en los filtros pasivos, debido a que es sobre lo que se centra este Trabajo Final de Grado.

Para conocer el filtro pasivo que se ha de utilizar en las instalaciones, primero hay que realizar un estudio [10]:

- Medir en la propia instalación
- Proyecto de una instalación. Análisis de los receptores

Posteriormente se identifica el tipo de anomalía y se proponen soluciones para el filtrado de las perturbaciones:

- Según el tipo de equipo de filtrado
- Según el número de equipos

Por último se estudiará el lugar de instalación de los equipos:

- En cuadro general
- En cuadros secundarios
- En cargas perturbadoras

### 5.3.1 Identificación de las anomalías

- Sobrecarga de condensadores
- Problemas con controles electrónicos
- Sobrecarga del neutro
- Disparo de interruptores diferenciales
- Líneas desequilibradas con armónicos en el neutro
- Interferencias en equipos electrónicos

### 5.3.2 Soluciones para el filtrado de perturbaciones

Para los diferentes tipos de anomalías existentes, se necesitan diferentes tipos de equipos que se encarguen de neutralizarlas.

Existen cinco categorías, en las cuales se pueden agrupar todos los equipos según el objetivo perseguido:

- Categoría 1: Compensación de reactiva en redes con corrientes armónicas
- Categoría 2: Filtrado de armónicos
- Categoría 3: Descargas de neutro
- Categoría 4: Filtrado de AF
- Categoría 5: Desequilibrio de fases

### 5.3.3 Lugar de instalación de los equipos de filtrado

Existen tres lugares posibles, en los cuales podemos colocar los equipos, para eliminar las perturbaciones [10]:

- ❖ En bornes de las cargas generadoras de armónicos

Es la colocación de equipos más idónea, ya que elimina las perturbaciones justo en el lugar donde se producen, evitando su distribución a lo largo de las líneas de distribución de la instalación.

- ❖ En cuadros secundarios

Este tipo de colocación es recomendable cuando existen diferentes cargas de pequeña potencia conectadas a los cuadros secundarios de distribución. Su eliminación permite la descarga de las líneas que van al cuadro general.

Ejemplos: líneas de ordenadores o lámparas de descarga en general (sistema de bloqueo TSA o FB3).

- ❖ En el cuadro general de baja tensión

Este lugar de colocación de equipos es recomendable cuando las perturbaciones han sido eliminadas o atenuadas anteriormente (en las propias cargas o en los cuadros secundarios). Permite la total eliminación de los residuos restantes que podían permanecer en la red, garantizando un

correcto estado de la señal eléctrica en el punto de conexión con la compañía suministradora.

Para elegir el punto correcto donde colocar el equipo hay que tener en cuenta:

- Tipo de incidencia existente
- Configuración de la instalación
  - Existencia batería condensadores
  - Existencia de grandes cargas perturbadoras
  - Potencia y localización de líneas de iluminación y ordenadores
  - Existencia de otras cargas tales como hornos de inducción, soldaduras, etc.

	SOLUCIÓN	CUADROS GENERALES DE BT	CUADROS SECUNDARIOS DE BT	INDIVIDUAL
Filtros Rechazo FR/FRE	Compensación de la energía reactiva	●	●	
Filtros Activos Trifásico Monofásico	Compensación de armónicos	●	●	
Filtro de Absorción regulados FAR	Filtrado de armónicos Compensación de reactiva	●	●	
Filtros LCL Reactancias LR	Filtrado de armónicos			●
Filtros EMI (EMR)	Filtrado de altas frecuencias			●
Sistemas de Bloqueo (TSA, FB3)	Descarga del tercer armónico		●	

Figura 5.4 Distintos tipos de filtros existentes y lugar de colocación.  
Fuente [10]



# CAPÍTULO 6

# MEDIDAS EXPERIMENTALES

Como se ha visto anteriormente en el capítulo 5, aquí entraremos a tratar más en profundidad el tema de los filtros pasivos: el problema que se nos plantea y su posible solución. Para la realización de este capítulo, nos hemos apoyado principalmente en el trabajo final de grado [3], además de en el informe [2].

## 6.1 Objetivo del Trabajo Final de Grado

El objetivo de este trabajo final de grado es determinar las causas de la problemática existente en el laboratorio del Centro Municipal de Acústica (CMA en adelante) [1] [2] en referencia al ruido eléctrico producido por los inversores de la vela solar fotovoltaica del centro y solucionarlo.

A la hora de realizar unos ensayos para los cuales este centro se encuentra acreditado por la Entidad Nacional de Acreditación (ENAC), se comprobó la existencia de una anomalía en la serie de espectros medidos con Front - Ends marca Brüel & Kjaer 4190 C (figura 5.1).

Dichos equipos cumplen con la norma AENOR IEC 61672-1, lo cual quiere decir que son aparatos de gran precisión y muy sensibles.



Figura 6.1 Front - End Brüel & Kjaer 4190 C

Se realizaron 2 pruebas en diferentes días y con diferentes condiciones meteorológicas (nublado y soleado).

## PRIMERA PRUEBA

La primera prueba se realizó el día 1 de Abril de 2011. Este día el cielo estaba nublado.

## 1. INVERSORES ON INTERRUPTOR GENERAL ON

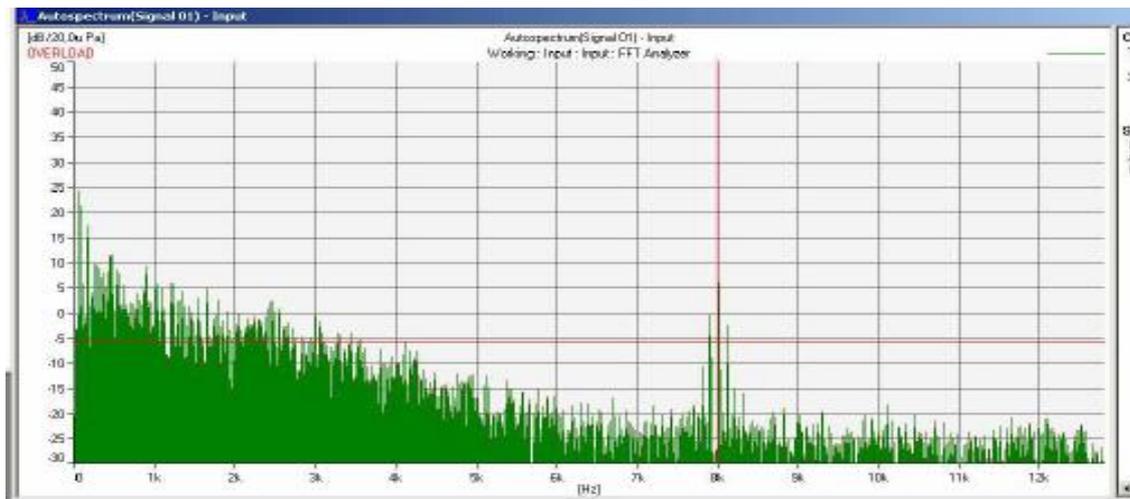


Figura 6.2 Medición con inversor e interruptor en posición ON. Fuente [2]

Como se puede observar, se aprecia claramente que existe ruido a 8kHz.

## 2. INVERSORES ON INTERRUPTOR DIFERENCIAL OFF

Esta medición se realizó conectando el aparato de medición al sistema de alimentación independiente (SAI) del Centro Municipal de Acústica.

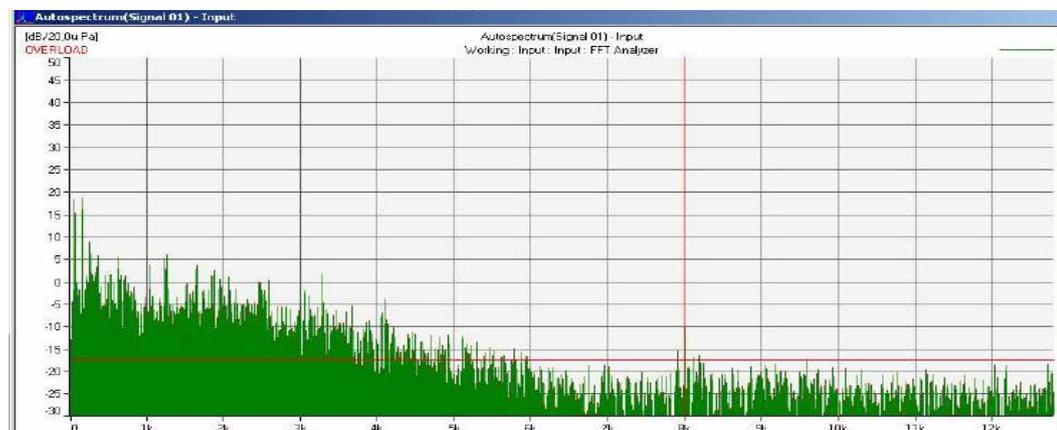
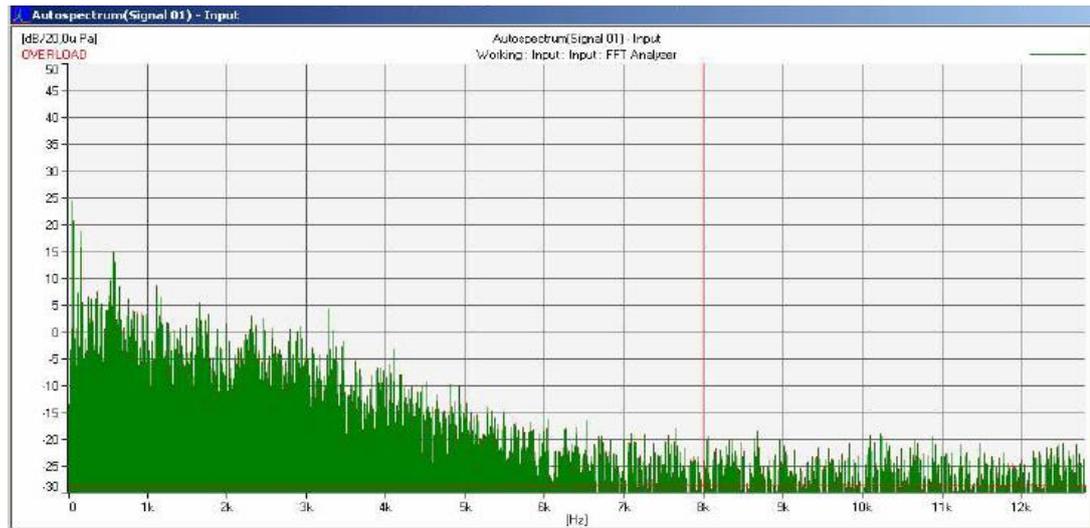


Figura 6.3 Medición con inversor ON e interruptor en posición OFF.  
Fuente [2]

Con el interruptor general del edificio apagado, se puede observar que existe algo de ruido a 8kHz, aunque se ha reducido significativamente.

### 3. INVERSORES OFF INTERRUPTOR GENERAL EDIFICIO OFF

Esta medición se realizó conectando el aparato de medición al sistema de alimentación independiente (SAI) del Centro Municipal de Acústica.



**Figura 6.4** Medición con inversor OFF e interruptor en posición OFF.  
Fuente [2]

Se puede ver que no existe ruido extraño a la frecuencia de 8kHz.

## SEGUNDA PRUEBA

Esta prueba se realizó el día 5 de Abril de 2011. Este día era soleado.

## 1. INVERSORES ON INTERRUPTOR GENERAL EDIFICIO ON

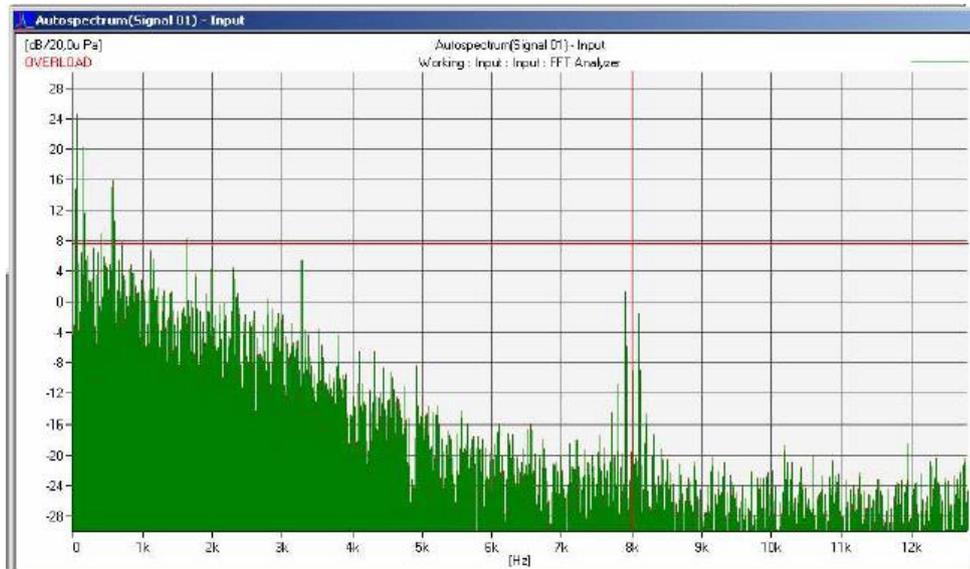


Figura 6.5 Medición con inversor ON e interruptor en posición ON. Fuente [2]

Podemos observar que hay ruido a 8kHz claramente.

## 2. INVERSORES ON INTERRUPTOR GENERAL EDIFICIO OFF

Esta medición se realizó conectando el aparato de medición al sistema de alimentación independiente (SAI) del Centro Municipal de Acústica.

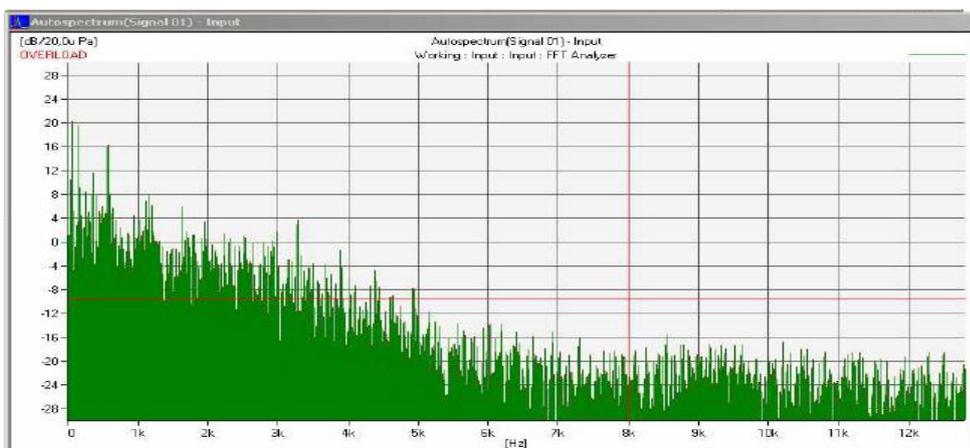


Figura 6.6 Medición con inversor ON e interruptor en posición OFF.  
Fuente [2]

Se puede ver que con el interruptor general del edificio el ruido sigue existiendo, pero es casi imperceptible.

### 3. INVERSORES OFF INTERRUPTOR GENERAL EDIFICIO ON

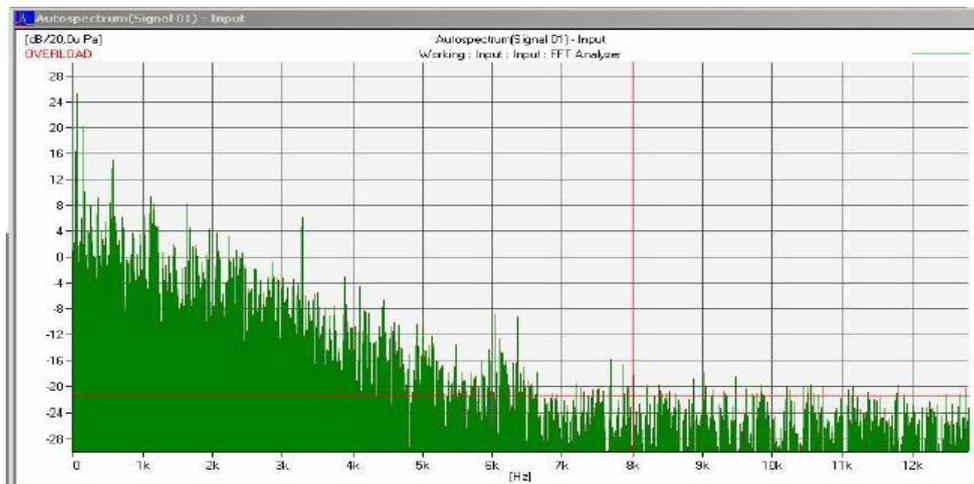


Figura 6.7 Medición con inversor OFF e interruptor en posición ON.

Fuente [2]

En este caso desaparece el ruido completamente a la frecuencia de 8 kHz

### 4. INVERSORES OFF INTERRUPTOR GENERAL EDIFICIO OFF

Esta medición se realizó conectando el aparato de medición al sistema de alimentación independiente (SAI) del Centro Municipal de Acústica.

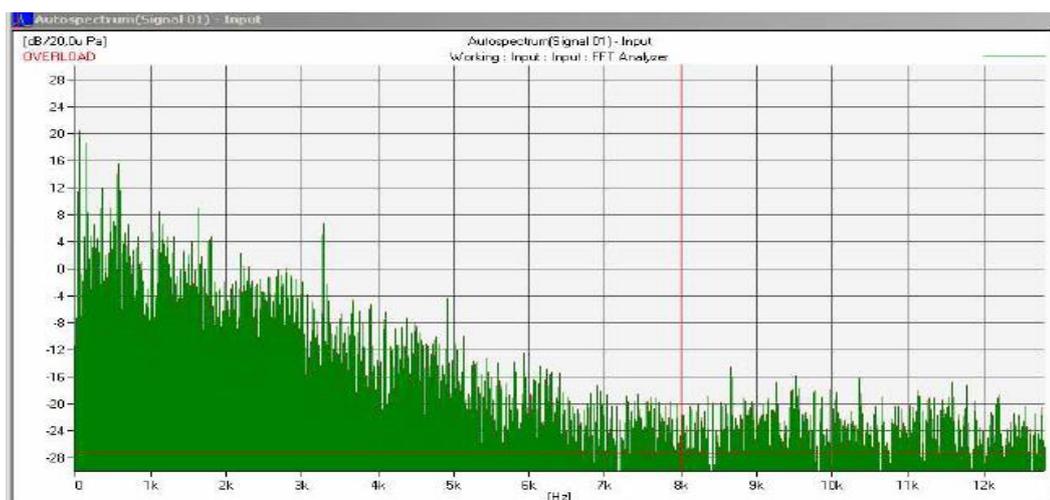


Figura 6.8 Medición con inversor OFF e interruptor en posición OFF.

Fuente [2]

En este caso desaparece el ruido completamente a la frecuencia de 8 kHz.

## 5. INTERRUPTOR INVERSORES OFF INTERRUPTOR GENERAL EDIFICIO ON

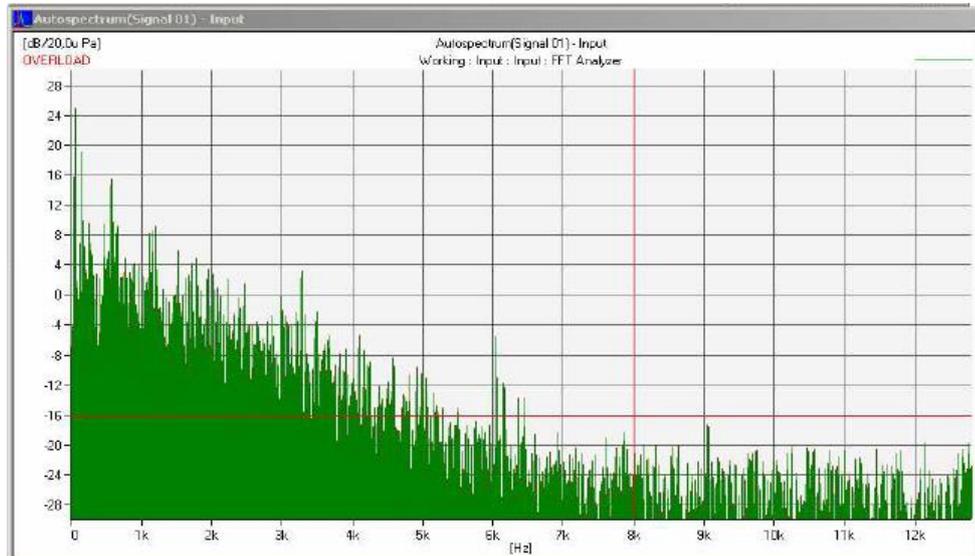


Figura 6.9 Medición con inversor OFF e interruptor en posición ON.

Fuente [2]

En este caso desaparece el ruido completamente a la frecuencia de 8 kHz.

## 6. INTERRUPTOR INVERSORES OFF INTERRUPTOR GENERAL EDIFICIO OFF

Esta medición se realizó conectando el aparato de medición al sistema de alimentación independiente (SAI) del Centro Municipal de Acústica.

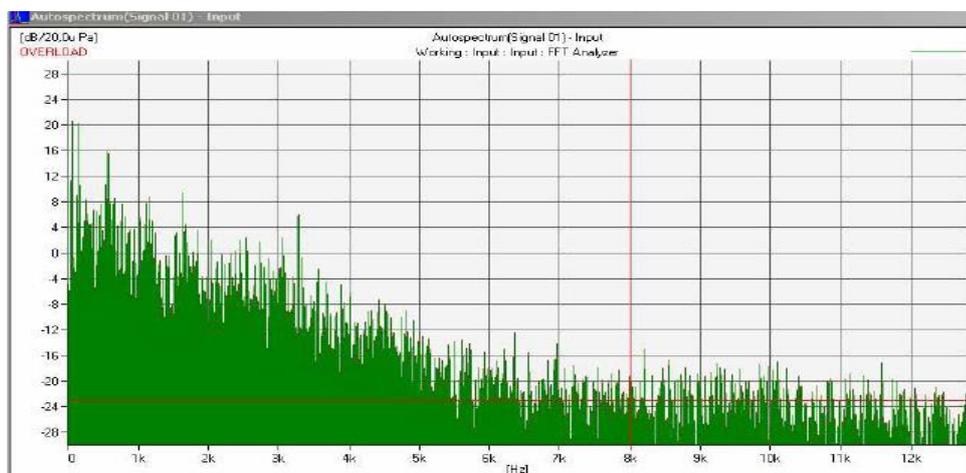


Figura 6.10 Medición con inversor OFF e interruptor en posición OFF.

Fuente [2]

En este caso desaparece el ruido completamente a la frecuencia de 8 kHz.

## 6.2 Conclusiones de las pruebas llevadas a cabo

Del estudio de las gráficas anteriores, cedidas amablemente por el Ayuntamiento de Valladolid [2], se pueden obtener las siguientes conclusiones:

- El ruido es producido por los inversores
- El ruido se introduce en los equipos de medición por los cables de alimentación.
- El ruido eléctrico entra por la parte de alterna de alimentación del edificio, debido a que cuando se apaga el interruptor general del edificio el ruido desaparece. Excepcionalmente aparece algo de ruido algún día nublado.

## 6.3 Características técnicas del inversor

El inversor que se utiliza en dicha planta fotovoltaica es el siguiente:



Figura 6.11 Inversor utilizado en el CMA. Fuente [2]



### **Características técnicas**

MODELO INGECON Sun 2.5

Rango de tensión de entrada (V): 125 – 450

Intensidad max. (A): 16

Tensión de salida ( $V_{ac}$ ): 220/230

Consumo en operación (w): <10

Rendimiento óptimo (%): 96

Frecuencia (Hz): 50

Pot. Nominal a 25°C (w): 2500

Pot. Max (w): 2700

Interface usuario: LEDs indicadores de estado

Tª ambiente (°C): de 10°C a 65°C

Humedad ambiente: de 0 a 95%

### **Características mecánicas**

Dimensiones (mm): 420 x 420 x 272

Peso (Kg): 25

Transformador AC de aislamiento galvánico incluido

### **Protecciones**

Protección contra sobrecarga: Sí

Protección contra cortocircuito: Sí

Índice de protección envolvente: IP65

## 6.4 Diseño del filtro

Según se observó en el capítulo 4 lo primero que hay que hacer para diseñar el filtro es identificar las anomalías que se producen. Una vez conocemos la anomalía existente, armónico a la frecuencia de 8 kHz, procederemos a escoger el equipo para eliminar dicha anomalía.

En este caso realizaremos una comparación entre 3 tipos de filtros, observando el comportamiento de la onda de salida, en la cual hay que tener en cuenta que no pueden observarse armónicos que sobrepasen los 2 dB.

Para la realización de este apartado nos hemos ayudado del documento [3].

### 6.4.1 Filtro LC

En primer lugar estudiaremos un filtro simple, tal y como es un filtro LC.

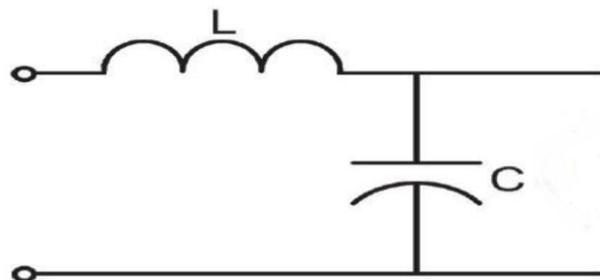


Figura 6.12 Esquema de un filtro pasivo LC

El filtro LC es un filtro pasivo compuesto por una bobina L y un condensador C. En este tipo de filtros hay una frecuencia en la cual se produce un fenómeno de resonancia eléctrica, momento en el que la reactancia inductiva (parte imaginaria de la impedancia de la bobina) es igual a la reactancia capacitiva (parte imaginaria del condensador).

$$X_L = X_C$$

Esto provoca que la impedancia del circuito sea mínima, y solo se tenga en cuenta la resistencia óhmica del circuito.

La función de transferencia de un filtro LC es la siguiente:

$$\frac{V_2}{V_1} = \frac{1}{LCs^2 + 1}$$

Con la anterior ecuación, sustituyendo  $s=j\omega$ , e igualando el denominador a 0, se obtiene la frecuencia a la cual el circuito tiene resonancia eléctrica.

$$1 - LC\omega^2 = 0$$

$$\omega_{res} = \sqrt{\frac{1}{LC}}$$

En Herzios:

$$f_{res} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{1}{LC}}$$

En este caso queremos atenuar los armónicos que se producen a la frecuencia de 8 kHz, por lo que será esa frecuencia a la cual queremos que se haga resonante el circuito.

Los valores de L y C son los siguientes:

$$L = 0.13 \text{ mH}$$

$$C = 3 \text{ }\mu\text{F}$$

La función de transferencia en nuestro caso es:

$$\frac{V_2}{V_1} = \frac{1}{3.9 \cdot 10^{-10} s^2 + 1}$$

Veamos su diagrama de bode:

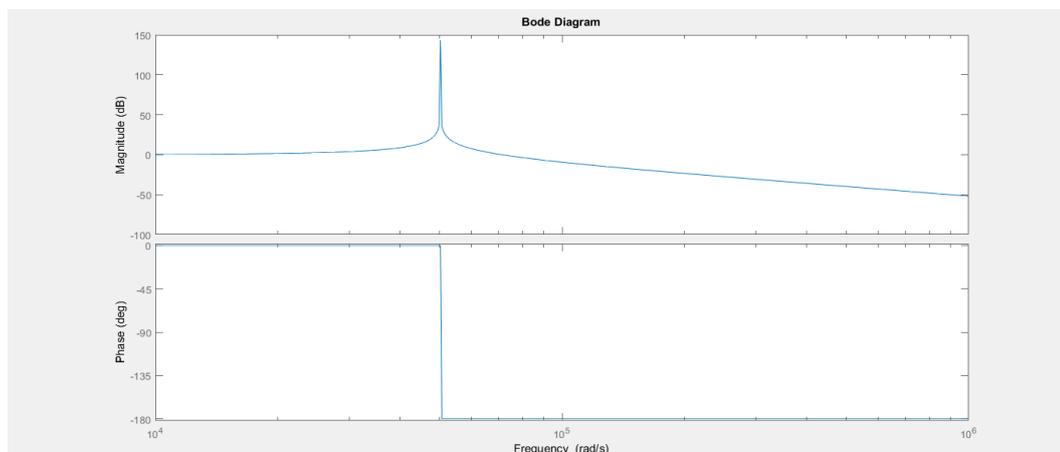


Figura 6.13 Diagrama de Bode del filtro LC elegido, obtenido con MATLAB

Se observa que con la aplicación de este tipo de filtro se obtiene una gran amplificación del armónico que se produce por la conmutación del inversor a 8 kHz. Debido a esta amplificación, obtendremos valores de tensión superiores a los 230V, tensión a la cual inyectamos a la red.

Este tipo de filtros solo son capaces de eliminar los armónicos cuando se tienen bobinas enormes, de miles de Henrios. Por tanto se requiere mucho espacio y una inversión elevada, dado que las bobinas de esos valores son muy caras.

Veamos la simulación con el programa LTSpice:

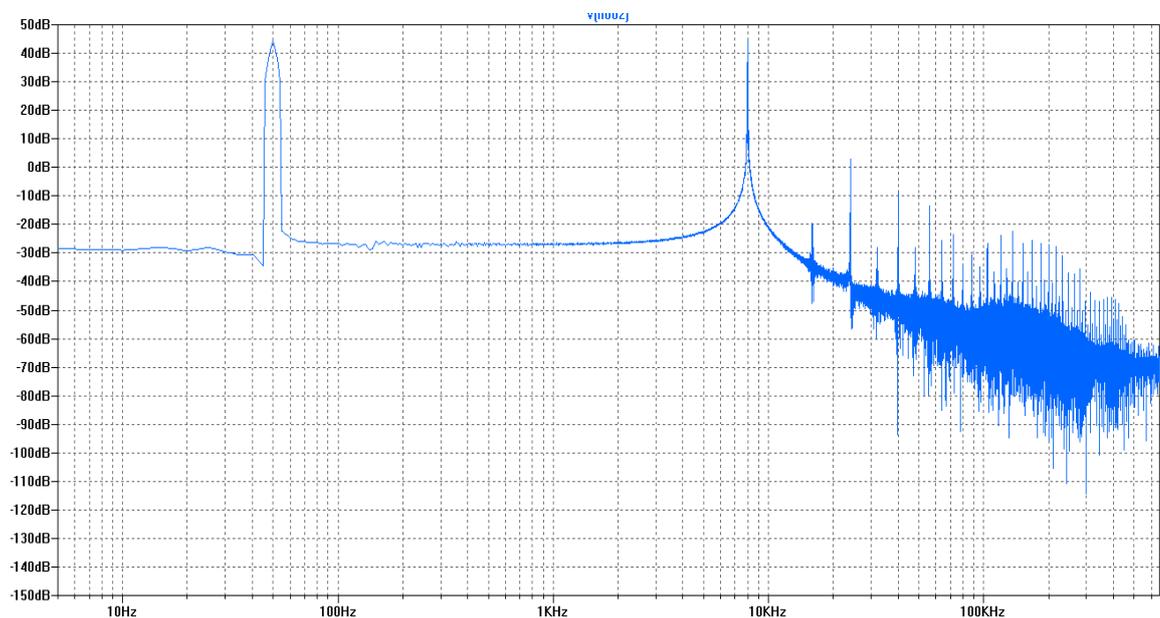


Figura 6.14 Respuesta del filtro LC mediante simulación en LTSpice

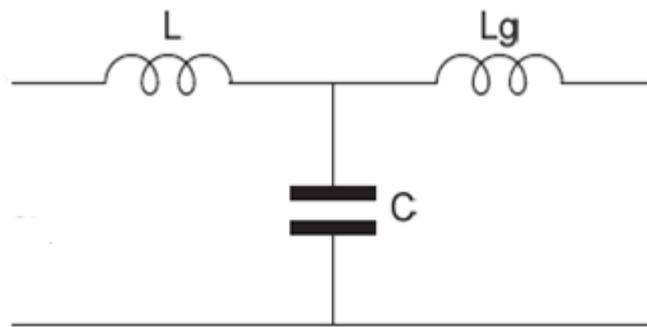
En esta imagen se aprecia que existe un armónico en la frecuencia de conmutación del inversor no atenuado, tal y como se apreciaba que iba a suceder en el diagrama de bode anterior. Esto provoca que este tipo de filtro no sirva para la aplicación para el cual está orientado este trabajo final de grado.

## 6.4.2 Filtro LCL

En este apartado estudiaremos el comportamiento de la señal de salida cuando aplicamos un filtro LCL a la salida del inversor fotovoltaico.

Los filtros LCL son filtros pasivos, a base de una combinación serie – paralelo de inductancias y condensadores. Este tipo de filtros están especialmente recomendados para eliminar los armónicos de la corriente absorbida por convertidores de 6 pulsos, tales como:

- Variadores de frecuencia para motores
- SAI



**Figura 6.15** Esquema de un filtro pasivo LCL

Estos filtros son complejos en cuanto a su diseño, ya que todos los elementos, tanto inductivos como capacitivos, están sujetos a varias restricciones para poder asegurar la calidad de la potencia eléctrica que se inyecta a la red.

Debemos prestar especial atención a los siguientes requisitos:

- La capacidad del condensador está limitada por el consumo de la potencia reactiva máxima que permite el inversor.
- El valor de las inductancias ha de ser inferior a 0.1 p.u. para limitar la caída de tensión (A.C.) durante su funcionamiento.
- A la hora de dimensionar las bobinas del filtro es importante tener en cuenta la saturación de estas, ya que de alcanzarse dicho estado se producen gran cantidad de pérdidas.
- La frecuencia de resonancia del filtro ha de estar situada en un rango de entre 10 veces la frecuencia de la red, y la mitad de la frecuencia de conmutación. Matemáticamente:

$$10 \omega_{red} \leq \omega_{res} \leq \frac{1}{2} \omega_s$$

- Para evitar resonancias en este tipo de filtros, se puede colocar una resistencia de amortiguación en serie con el condensador. Con ello se consigue evitar oscilaciones en la señal de corriente.

Los filtros LCL presentan las siguientes características:

- Atenuación de 60 dB/década a partir de la frecuencia de resonancia
- Baja producción de potencia reactiva
- Pueden llegar a causar distorsión de la corriente de entrada debido a la resonancia que presenta este tipo de filtros.
- Presentan baja amortiguación a la frecuencia de resonancia.

A la frecuencia fundamental el condensador debe absorber poca potencia reactiva del armónico fundamental, con lo que la corriente que circula por el inductor conectado del lado del inversor apenas se ve afectada por el condensador. Sin embargo, a la frecuencia de los armónicos de conmutación, el condensador debe absorber los armónicos de la corriente del inductor.

Procedemos a realizar el diseño del filtro LCL:

**Potencia aparente nominal del inversor:**

$$S = \frac{P}{\cos \varphi} = \frac{2500 \text{ W}}{0.8} = 3125 \text{ VA}$$

**Corriente nominal de salida del inversor:**

$$I_0 = \frac{S}{V} = \frac{3125 \text{ VA}}{230 \text{ V}} = 13.58 \text{ A}$$

**Condensador:**

El valor del condensador está limitado al consumo máximo de la potencia reactiva que permite el inversor. En este caso, se requiere que la corriente máxima en el condensador sea inferior al 5% de la corriente nominal.

$$I_C \leq 0.05 I_0$$

La magnitud de la impedancia del condensador es la siguiente:

$$Z_C = \frac{V_0}{I_C} = \frac{230 \text{ V}}{0.05 \cdot I_0} = 338.73 \Omega$$

El valor de C se obtiene despejando la siguiente ecuación:

$$C = \frac{1}{\omega_1 \cdot Z_C} = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot f \cdot Z_C} = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot 50 \cdot 338.73} \leq 9.4 \mu\text{F}$$

**Inductancia lado inversor:**

Esta es posible calcularla en términos de la caída de tensión máxima permitida sobre el inversor, en condiciones nominales de funcionamiento.

Se asume que se quiere una impedancia del conductor igual o inferior al 5% de la impedancia nominal de la carga.

$$Z_L \leq 0.05 \cdot Z_{\text{LOAD}}$$

Donde

$$Z_{\text{LOAD}} = \frac{V^2}{P} = \frac{(230 \text{ V})^2}{2500 \text{ W}} = 21.16 \Omega$$

La magnitud de la impedancia del inductor se define como:

$$L = \frac{Z_L}{\omega_1} = \frac{0.05 \cdot Z_{\text{LOAD}}}{2 \cdot \pi \cdot 50} \leq 3.36 \text{ mH}$$

**Inductancia lado red:**

La frecuencia de resonancia en los filtros LCL, tal y como se ha visto anteriormente, ha de estar localizada en un rango determinado.

$$10 \omega_{\text{red}} \leq \omega_{\text{res}} \leq \frac{1}{2} \omega_s$$

En nuestro caso:

$$f_{\text{red}} = 50 \text{ Hz} \implies \omega_{\text{red}} = 2 \cdot \pi \cdot f_{\text{red}} = 100\pi$$

$$f_s = 8000 \text{ Hz} \implies \omega_{\text{red}} = 2 \cdot \pi \cdot f_s = 16000\pi$$

Por lo tanto, la frecuencia de resonancia ha de estar situada en el siguiente rango

$$1000\pi \leq \omega_{\text{res}} \leq 8000\pi$$

Para la realización del experimento de simulación, he considerado una frecuencia de resonancia de 1780 Hz.

$$f_{\text{res}} = 1780 \text{ Hz} \implies \omega_{\text{res}} = 2 \cdot \pi \cdot f_{\text{res}} = 3560\pi$$

Para poder obtener el valor de la inductancia del lado de la red, es necesario utilizar la siguiente ecuación.

$$\omega_{\text{res}} = \sqrt{\frac{L + L_g}{L \cdot L_g \cdot C}}$$

Para la obtención de  $L_g$  se han utilizado unos valores de inductancias y condensadores que son comercializados industrialmente.

$$L = 2 \text{ mH}$$

$$C = 8 \mu\text{H}$$

Con estos valores, y sustituyendo en la anterior ecuación obtenemos  $L_g$

$$L_g = 2 \text{ mH}$$

Para evitar la elevada resonancia de este tipo de filtros colocamos una resistencia en la rama paralelo.

$$R_D = 4 \Omega$$

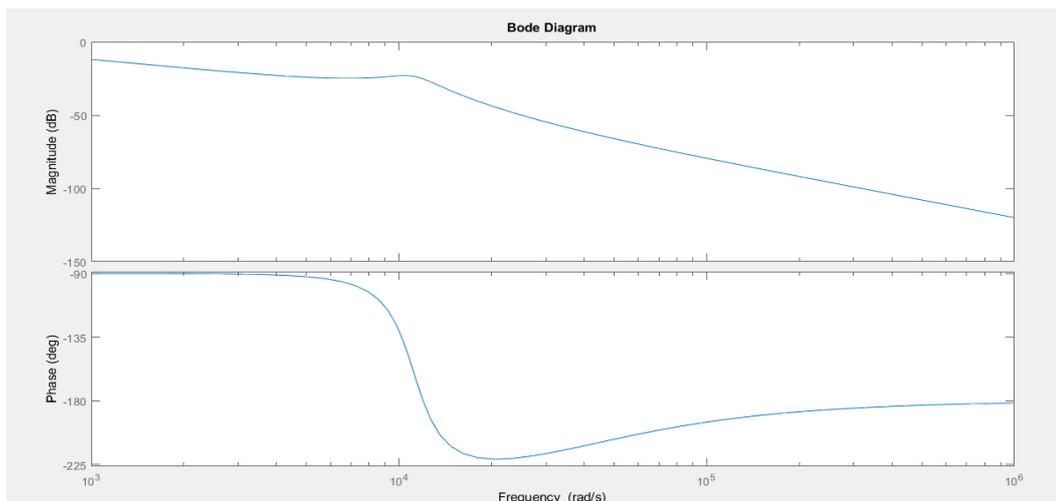
La función de transferencia de un filtro LCL es la siguiente:

$$\frac{i_2}{V_1} = \frac{R_D C s + 1}{L L_g C s^3 + R_D C (L + L_g) s^2 + (L + L_g) s}$$

Con los valores anteriores, la función de transferencia de dicho filtro es la siguiente:

$$G = \frac{3.2 \cdot 10^{-5} s + 1}{3.2 \cdot 10^{-11} s^3 + 1.28 \cdot 10^{-7} s^2 + 4 \cdot 10^{-3} s}$$

Obtenemos el siguiente diagrama de bode:



**Figura 6.16 Diagrama de Bode del filtro LCL elegido, obtenido con MATLAB**

Como se puede apreciar, el filtro LCL se comporta como un filtro pasa – bajo, en el cual los armónicos producidos a frecuencias inferiores a la frecuencia de resonancia elegida ( $f_{res} = 1780$  Hz) no son atenuados, mientras que los armónicos que se producen para las altas frecuencias si son atenuados.

Una de las ventajas que nos ofrecen los filtros LCL es que con bobinas y condensadores de menor tamaño, obtenemos un filtrado de armónicos mucho mejor que usando un circuito LC.

Veamos la respuesta que obtenemos al simular el filtro LCL con el programa LTSpice:

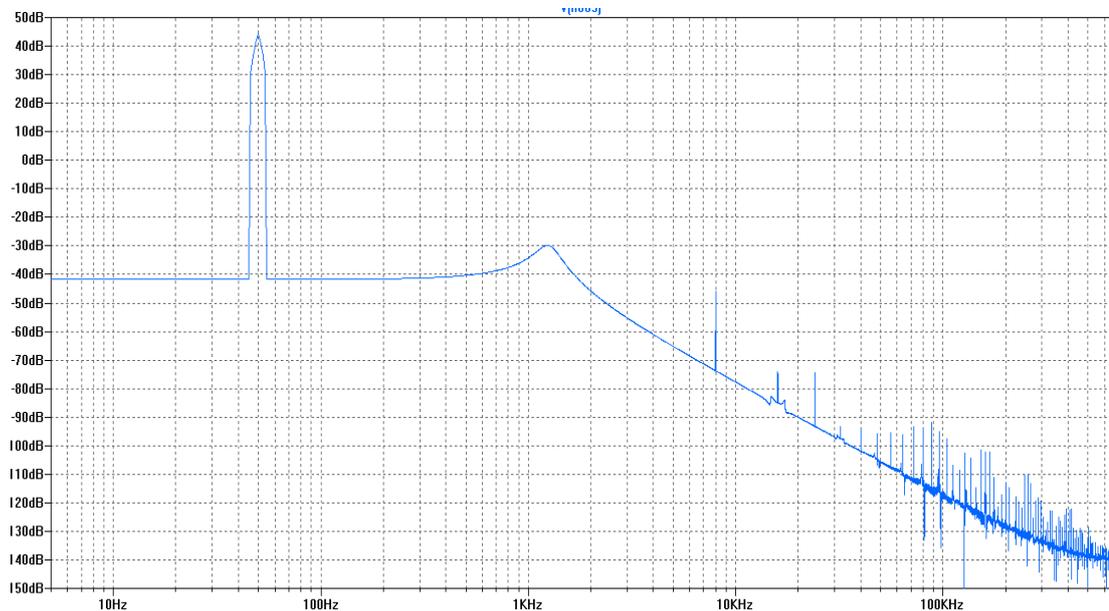


Figura 6.17 Respuesta del filtro LCL mediante simulación en LTSpice

Como se puede observar en esta imagen, el único armónico que sobrepasa los 0dB es el armónico fundamental. Por lo tanto el resto de los armónicos superiores han sido atenuados satisfactoriamente. En la frecuencia a la cual el conmuta el inversor (8000 Hz), se aprecia que el armónico ha sido reducido notablemente (de 8dB que teníamos en las pruebas que nos cedió el CMA a -46dB).

### 6.4.3 Filtro LCL + “TRAP”

Este filtro es una combinación de los filtros estudiados en los apartados 6.4.1 y 6.4.2.

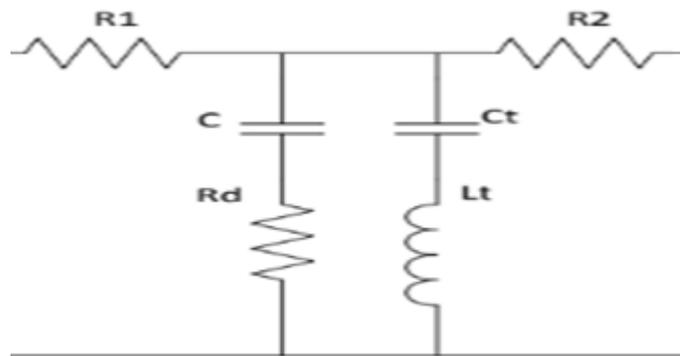


Figura 6.18 Esquema de un filtro pasivo LCL + TRAP

El filtro LCL nos da la seguridad de proveer al sistema de una buena atenuación de los armónicos desde la frecuencia a la cual hemos sintonizado el filtro LCL para conseguir la resonancia.

La componente “TRAP” es un filtro LC normal y corriente. Se utiliza para atenuar totalmente los armónicos que aparecen a la frecuencia de conmutación. Para ello es necesario sintonizarle a dicha frecuencia (en nuestro caso 8000 Hz).

Para la simulación de este filtro utilizaremos los datos que hemos usado en los apartados anteriores, para calcular tanto el filtro LC, como el filtro LCL, y veremos cómo se modifica el filtro.

$$L=2 \text{ mH}$$

$$L_t = 0.13 \text{ mH}$$

$$L_2 = 2 \text{ mH}$$

$$C= 8 \text{ } \mu\text{F}$$

$$C_t = 3 \text{ } \mu\text{F}$$

$$R_D = 4 \text{ } \Omega$$

La función de transferencia de un este tipo de filtro es la siguiente:

$$\frac{i_2}{V_1} = \frac{C C_t R_D L_t s^3 + C_t L_t s^2 + C R_D s + 1}{L_1 L_2 L_g C C_t s^5 + C_t C R_D (L_t L_1 + L_t L_2 + L_1 L_2) s^4 + (L_1 L_2 C + L_1 L_2 C_t + C_t L_t L_1 + C_t L_t L_2) s^3 + C C_t R_D L_t s^3 + C_t L_t s^2 + C R_D s + 1}$$

$$\frac{C C_t R_D L_t s^3 + C_t L_t s^2 + C R_D s + 1}{+ C R_D (L_1 + L_2) s^2 + (L_1 + L_2) s}$$

Para nuestro caso

$$J = \frac{1.25 \cdot 10^{-14} s^3 + 3.9 \cdot 10^{-10} s^2 + 3.2 \cdot 10^{-5} s + 1}{1.24 \cdot 10^{-20} s^5 + 4.34 \cdot 10^{-16} s^4 + 4.55 \cdot 10^{-11} s^3 + 1.28 \cdot 10^{-8} s^2 + 4 \cdot 10^{-3} s}$$

El diagrama de bode de este filtro es el siguiente:

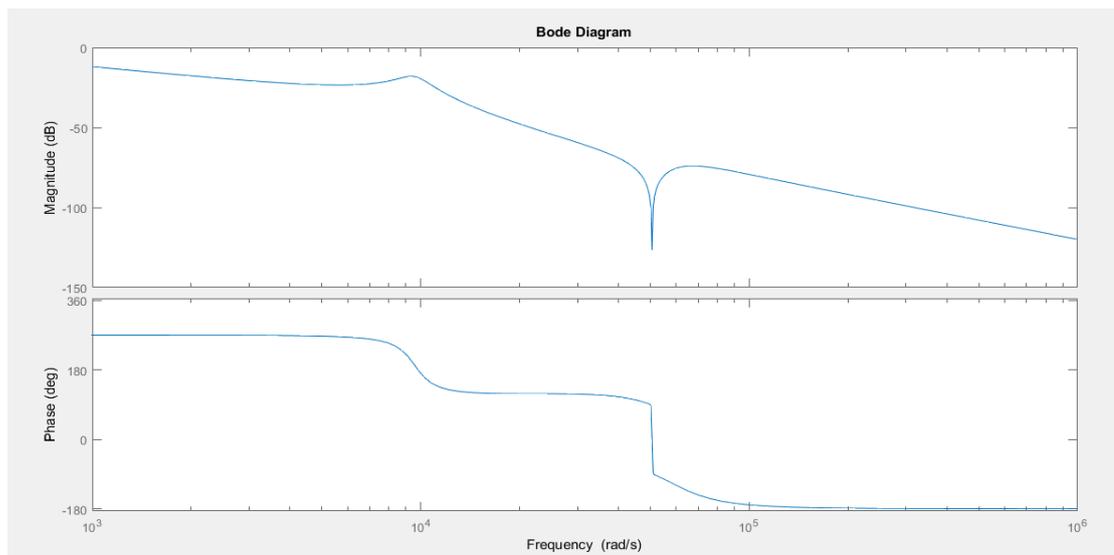
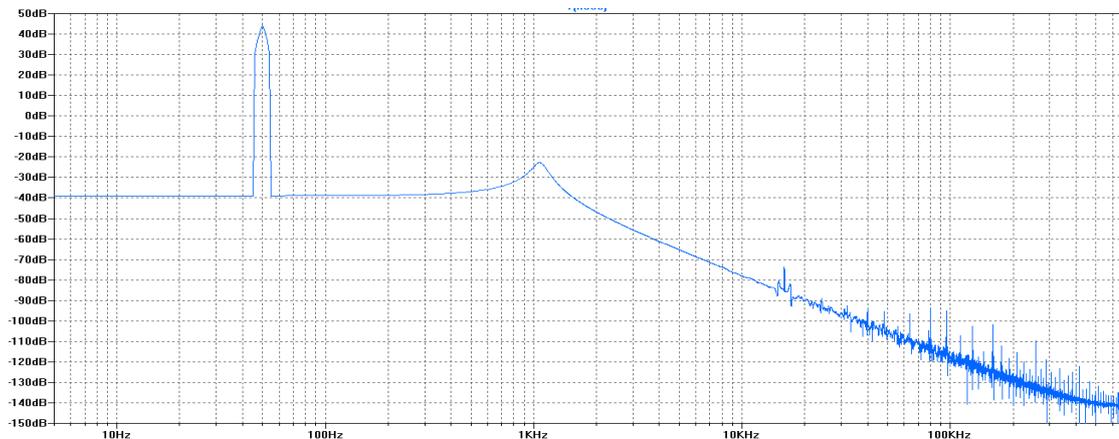


Figura 6.19 Diagrama de Bode del filtro LCL + TRAP elegido, obtenido con MATLAB

En este diagrama se puede observar como a la frecuencia de conmutación ( $\omega_{conm} = 16000\pi \text{ rad/s}$ ) la componente “TRAP” hace atenuar bruscamente cualquier armónico que se produzca a esa frecuencia. La parte del filtro LCL sigue dando un fuerte apoyo en cuanto a la atenuación de los armónicos de orden superior en las bandas laterales.

Veamos la respuesta de este tipo de filtro mediante una simulación en el programa LTSpice.



**Figura 6.20** Respuesta del filtro LCL +TRAP mediante simulación en LTSpice

Como se aprecia en la figura, vemos que con un filtro LCL + “TRAP” obtenemos una magnífica respuesta a frecuencias inferiores a la frecuencia de conmutación del inversor. Se puede ver que el armónico a 8000Hz apenas es perceptible.

La componente “TRAP” nos reduce en un 98% aproximadamente el armónico que existía a la frecuencia de conmutación con respecto a un filtro LCL.

## 6.5 Implementación del filtro en el laboratorio

Para la realización de este trabajo final de grado se intentó realizar una implementación de un filtro. Para ello nos servimos del material que la Universidad de Valladolid dispone en la sede de Francisco Mendizábal de la Escuela de Ingenierías Industriales.

Para la implementación del filtro lo primero es conocer la frecuencia a la cual conmuta el inversor fotovoltaico. Para conocer dicha frecuencia se utilizó un analizador de armónicos ZES-ZIMMER (figura 6.21).



**Figura 6.21 Analizado de armónicos ZES – ZIMMER**

Con este analizador de armónicos no nos fue posible conocer la frecuencia de conmutación del inversor fotovoltaico, dado que solo muestra los 100 primeros armónicos (o lo que es lo mismo hasta 5kHz). También es posible calcular los valores de corriente y potencia de los armónicos en un rango de 0 a 20 kHz.

Como se quería seguir comprobando la eficacia del filtro LCL+”TRAP”, pero desconocíamos la frecuencia de conmutación, utilicemos un osciloscopio con transformada rápida de Fourier (figura 6.22).



**Figura 6.22 Osciloscopio con transformada rápida de Fourier**

Con este osciloscopio tampoco conseguimos obtener unos resultados óptimos, con los cuales pudiésemos conocer la frecuencia de conmutación del inversor.

El montaje realizado para ambos experimentos fue compuesto por una batería, un inversor solar, y una carga (en nuestro caso una bombilla).



**Figura 6.23 Implementación para analizar la frecuencia de conmutación del inversor**

Con los dos métodos para conocer la frecuencia de conmutación fallidos, y no tener ningún otro instrumento con el que poder conseguir dicha frecuencia, se da el experimento por concluido.



## FILTRO PARA LA FRECUENCIA DE CONMUTACIÓN DE UN INVERSOR FOTOVOLTAICO





# CAPÍTULO 7

# CONCLUSIONES



En este trabajo se ha llevado a cabo el estudio de la aplicación de diferentes filtros pasivos de pasa - baja, a la salida de un inversor fotovoltaico, observando que ventajas e inconvenientes se producen en la onda de salida, la cual será enviada a la red de la compañía eléctrica.

Para eliminar dicha componente totalmente, se optó por aplicar un filtro LCL más una componente extra de atenuación denominada TRAP (rama en paralelo con el condensador del filtro LCL, idéntica a un filtro LC, que actúa como filtro de absorción). Esta componente será sintonizada a la frecuencia de conmutación del inversor.

Con este filtro lo que se consigue es obtener un buen compromiso entre capacidad de filtrado y estabilidad, ya que con diferentes valores de la bobina del filtro en el lado del inversor, el tiempo de estabilización apenas varía.

El único inconveniente de la realización de este trabajo final de grado ha sido no haber podido realizar un filtro de similares características en el laboratorio, para haber conocido con un poco más de detalle hasta qué punto se modifica en realidad el ruido a la salida del inversor.

Por otro lado, este Trabajo Final de Grado me ha servido para conocer nuevas funciones de la herramienta de simulación electrónica LTSpice, tal y como es la utilización de la Transformada Rápida de Fourier (FFT) en la simulación. Decir que dicha herramienta fue utilizada durante la realización de las prácticas de laboratorio de la asignatura Electrónica de Potencia para aplicaciones en Sistemas Eléctricos.

Con la realización de este Trabajo Final de Grado se espera que en un futuro, si se vuelven a realizar ensayos, pueda utilizarse para su implementación en el Centro Municipal de Acústica del Ayuntamiento de Valladolid.



# CAPÍTULO 8

# BIBLIOGRAFÍA



[1] Centro Municipal de Acústica de Valladolid

<http://www.valladolid.es/es/ciudad/medio-ambiente-salud/servicios/centro-municipal-acustica-cma/instalaciones-equipamiento-servicios>

[última visita: 20/02/2018]

[2] Informe interno del Ayuntamiento de Valladolid (2011)

[3] Olives Camps, J.C. (2013). *Control convertidor DC - AC de 100kW*. Universidad Politécnica de Cataluña.

<http://upcommons.upc.edu/handle/2099.1/22030>

[4] Horikoshi, I. (2009) *Análisis de las componentes armónicas de los inversores fotovoltaicos de conexión a red*. Universidad Carlos III de Madrid.

<https://e-archivo.uc3m.es/handle/10016/6901>

[5] Canabal, E. (2013.) “Los armónicos: causas, consecuencias y soluciones” en el blog de GESTERNOVA.

<https://blog.gesternova.com/los-armonicos-causas-consecuencias-y-soluciones/> [última visita: 20/02/2018]

[6] Condiciones técnicas de la instalación de producción eléctrica conectada a la red de Iberdrola distribución eléctrica. S.A.U (2016).

[https://www.iberdroladistribucion.es/socdis/gc/prod/es\\_ES/contenidos/docs/\\_MT\\_2\\_90\\_01.pdf](https://www.iberdroladistribucion.es/socdis/gc/prod/es_ES/contenidos/docs/_MT_2_90_01.pdf)

[7] AENOR (2014). Compatibilidad electromagnética (CEM). Parte 3-2: Límites. Límites para las emisiones de corriente armónica (equipos con corriente de entrada  $\leq 16$  A por fase). UNE-EN 61000-3-2:2014. Madrid: AENOR.

[8] Capitulo 2. Libro de filtros.

[http://catarina.udlap.mx/u\\_dl\\_a/tales/documentos/lem/rufino\\_a\\_j/capitulo2.pdf](http://catarina.udlap.mx/u_dl_a/tales/documentos/lem/rufino_a_j/capitulo2.pdf)

[9] Rodríguez Luque, J. (2013) *Calidad de suministro eléctrico: Penetración de armónicos: mitigación de sus efectos en las plantas industriales*. Universidad Carlos III de Madrid.

[https://orff.uc3m.es/bitstream/handle/10016/18041/PFC\\_Joana\\_Rodriguez\\_Luque.pdf?sequence=1](https://orff.uc3m.es/bitstream/handle/10016/18041/PFC_Joana_Rodriguez_Luque.pdf?sequence=1)

[10] *Compensación de la Energía Reactiva y Filtrado de Armónicos: R.7 Filtros de armónicos y EMI*. CIRCUTOR.

[http://triber.com.tr/circutor/pdf/catalogo/CA\\_R7\\_01.pdf](http://triber.com.tr/circutor/pdf/catalogo/CA_R7_01.pdf)



[11] Frechoso Escudero, F; Pérez García, J.M. (2016). *Apuntes de la asignatura Energías Renovables*.

[12] *Inversores. El generador FV produce corriente continua*. (2015). YUBA SOLAR

<http://www.yubasolar.net/2015/02/inversores.html>

[última visita: 20/02/2018]

[13] Alonso Abella, M. (2005). *Sistemas Fotovoltaicos*. Centro de Investigaciones Energéticas, Medioambientales y Tecnológicas CIEMAT.

[http://api.eoi.es/api\\_v1\\_dev.php/fedora/asset/eoi:45337/componente45335.pdf](http://api.eoi.es/api_v1_dev.php/fedora/asset/eoi:45337/componente45335.pdf)

[14] Bueno Muñoz, H.A.; Fajardo Muzo, M.V. (2013). La eliminación de armónicos de una red bifásica residencial. Universidad Politécnica Salesiana.

<https://dspace.ups.edu.ec/bitstream/123456789/5145/1/UPS-CT002725.pdf>

[15] Pliego de Condiciones Técnicas de Instalaciones Conectadas a Red (2011). IDAE

[http://www.idae.es/uploads/documentos/documentos\\_5654\\_FV\\_pliego\\_con\\_diciones\\_tecnicas\\_instalaciones\\_conectadas\\_a\\_red\\_C20\\_Julio\\_2011\\_3498e\\_aaf.pdf](http://www.idae.es/uploads/documentos/documentos_5654_FV_pliego_con_diciones_tecnicas_instalaciones_conectadas_a_red_C20_Julio_2011_3498e_aaf.pdf)

[16] Capítulo 2. Armónicos en las redes eléctricas. Universidad Politécnica Salesiana.

[https://www.u-cursos.cl/ingenieria/2011/2/EL5203/1/material\\_docente/bajar?id\\_material=384495](https://www.u-cursos.cl/ingenieria/2011/2/EL5203/1/material_docente/bajar?id_material=384495)

[17] Pérez Vega, C. *Capítulo 3. Circuitos Pasivos*. Universidad de Cantabria.

[http://personales.unican.es/perezvr/pdf/CH3ST\\_Web.pdf](http://personales.unican.es/perezvr/pdf/CH3ST_Web.pdf)



## FILTRO PARA LA FRECUENCIA DE CONMUTACIÓN DE UN INVERSOR FOTOVOLTAICO





# CAPÍTULO 9

# ANEXOS

## 9.1 Cálculo de la función de transferencia de un filtro LC

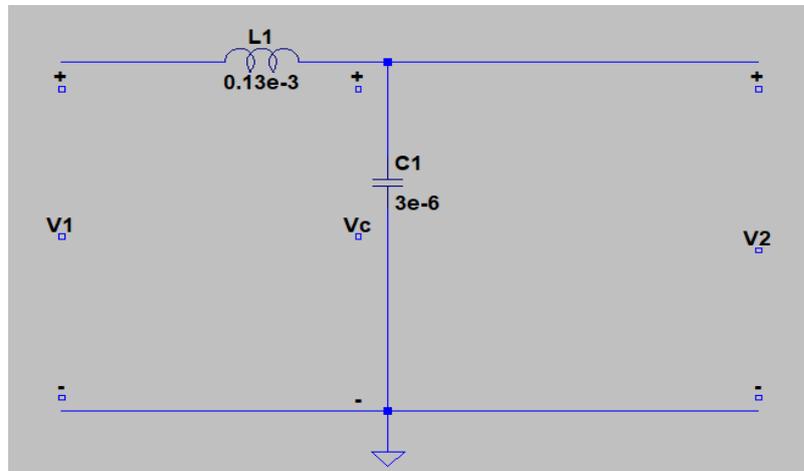


Figura 9.1 Filtro LC calculado

Sabemos que  $I_1 = I_C$

$$\frac{V_1 - V_C}{Ls} = \frac{V_C}{\frac{1}{Cs}}; \quad \frac{V_1}{Ls} = V_C \left( Cs + \frac{1}{Ls} \right)$$

Sabemos que  $V_C = V_2$

$$\frac{V_2}{V_1} = \frac{1}{Ls} \cdot \frac{1}{\left( Cs + \frac{1}{Ls} \right)}$$

$$\boxed{\frac{V_2}{V_1} = \frac{1}{CLs^2 + 1}}$$

## 9.2 Cálculo de la función de transferencia de un filtro LCL

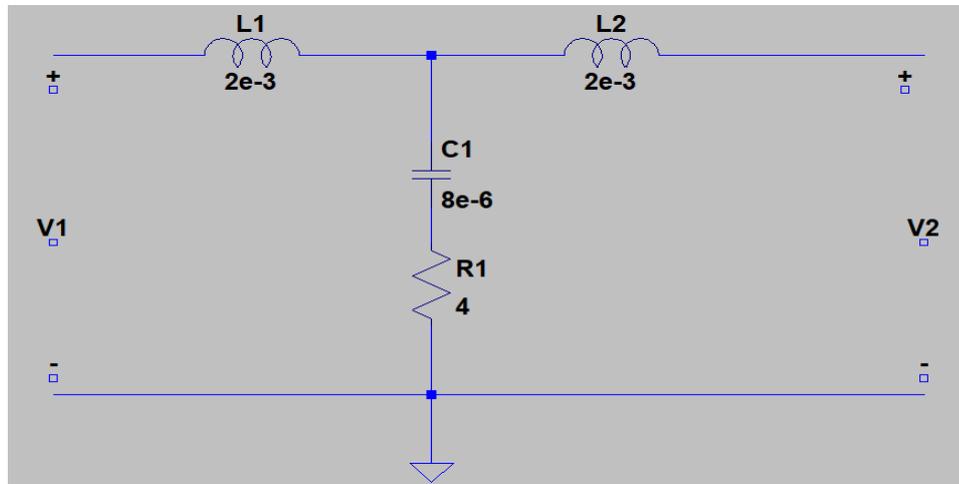


Figura 9.2 Filtro LCL calculado

Sabemos que:

$$I_1 = I_C + I_2$$

Entonces:

$$I_2 = \frac{V_1 - V_C}{L_s} - \frac{V_C}{\frac{1}{C_s} + R_D} \quad (1)$$

$$I_2 = \frac{V_1}{L_s} - V_C \left( \frac{1}{\frac{1}{C_s} + R_D} + \frac{1}{L_s} \right) \quad (2)$$

Si se amplía el anterior esquema, en el lado de red se encontraría una fuente de tensión equivalente a la tensión de red. Dicha fuente se cortocircuitara, ya que solo funciona a 50Hz. Las señales pulsantes de otras frecuencias restantes no se verán afectadas por dicho cortocircuito. Esto equivale a decir que:

$$V_2 = 0 \text{ V}$$

Por tanto:

$$V_C = L_g s I_2 \quad (3)$$

Sustituyendo (3) en (2):

$$I_2 = \frac{V_1}{L_s} - L_g s I_2 \left( \frac{1}{C s} + R_D + \frac{1}{L_s} \right);$$

$$I_2 \left( 1 + \frac{L_g}{L_1} + \frac{L_g C s^2}{1 + R_D C s} \right) = \frac{V_1}{L_s}$$

Operando, finalmente se obtiene la siguiente función de transferencia:

$$\frac{I_2}{V_1} = \frac{R_D C s + 1}{L_1 L_2 C s^3 + R_D C (L_1 + L_2) s^2 + (L_1 + L_2) s}$$

### 9.3 Cálculo de la función de transferencia de un filtro LCL+ “TRAP”

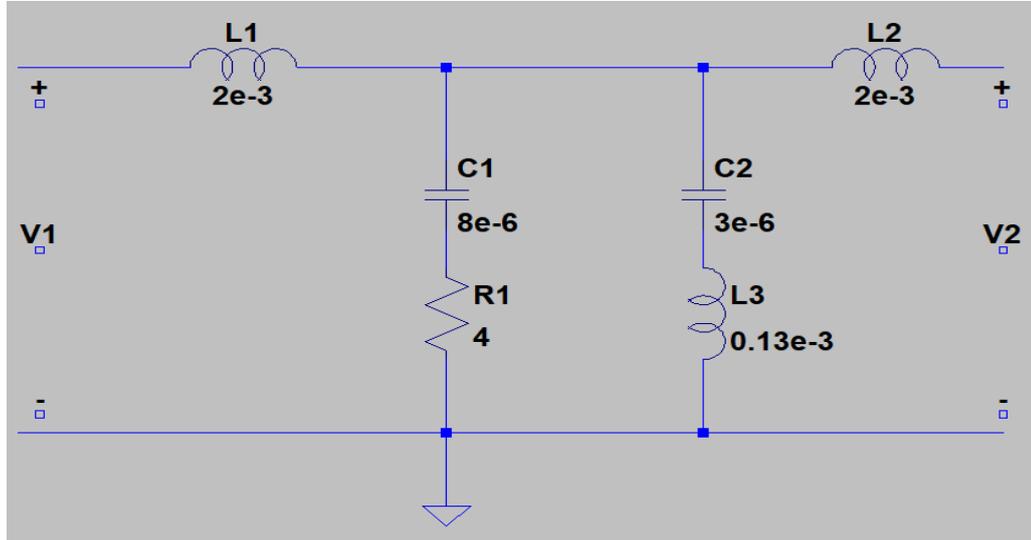


Figura 9.3 Filtro LCL + “TRAP” calculado

Lo primero que tenemos que hacer es calcular la impedancia total de las 2 ramas en paralelo:

$$\left( \frac{1}{C_s} + R_D \right) // \left( \frac{1}{C_t s} + L_t s \right)$$

Realizamos las operaciones:

$$\left( \frac{1}{C_s} + R_D \right) // \left( \frac{1}{C_t s} + L_t s \right) = \frac{\frac{1}{C C_t s^2} + \frac{L_g}{C} + \frac{R_D}{C_t s} + R_D L_g s}{\frac{1}{C_s} + R_D + \frac{1}{C_t s} + L_g s}$$

Operando, obtenemos la siguiente ecuación:

$$a = \frac{C C_t R_D L_t s^3 + C_t L_t s^2 + C R_D s + 1}{L_t C C_t s^3 + R_D C C_t s^2 + (C + C_t) s} \quad (1)$$

Una vez tenemos la ecuación de la impedancia de las ramas en paralelo, empezamos a calcular como un filtro LCL.

Sabemos que:

$$I_1 = I_a + I_2 \quad (2)$$

Entonces:

$$I_2 = \frac{V_1 - V_a}{L_1 s} - \frac{V_a}{a}$$

$$I_2 = \frac{V_1}{L_1 s} - V_a \left( \frac{1}{a} + \frac{1}{L_1 s} \right) \quad (3)$$

Como se ha visto anteriormente, cuando hemos calculado la función de transferencia del filtro LCL:

$$V_2 = 0 \text{ V}$$

Entonces:

$$V_a = L_2 s I_2 \quad (4)$$

Sustituyendo (4) en (3)

$$I_2 = \frac{V_1}{L_1 s} - L_2 s I_2 \left( \frac{1}{a} + \frac{1}{L_1 s} \right)$$

$$I_2 \left( 1 + \frac{L_2}{L_1} + \frac{L_2 s}{a} \right) = \frac{V_1}{L_1 s} \quad (5)$$

Sustituyendo (1) en (5) y operando, llegamos a la siguiente función de transferencia:



$$\frac{I_2}{V_1} = \frac{C C_t R_D L_t s^3 + C_t L_t s^2 + C R_D s + 1}{L_1 L_2 L_t C C_t s^5 + C C_t R_D (L_t L_1 + L_t L_2 + L_1 L_2) s^4 + (L_1 L_2 C + L_1 L_2 C_t + L_1 L_t C_t + L_2 L_t C_t) s^3 + C C_t R_D L_t s^3 + C_t L_t s^2 + C R_D s + 1}$$
$$\frac{C C_t R_D L_t s^3 + C_t L_t s^2 + C R_D s + 1}{+ C R_D (L_1 + L_2) s^2 + (L_1 + L_2) s}$$