

E.T.S. de Ingeniería Industrial,  
Informática y de Telecomunicación

# Estudio de un SAI para aerogeneradores: estado del arte y lazos de control de tensión de carga.



Grado en Ingeniería  
en Tecnologías Industriales

Trabajo Fin de Grado

Fco. Javier Seller Asín

Ernesto Luis Barrios Rípodas

Pamplona, 28/06/2017





## ABSTRACT

This Project is about the design, sizing and analysis of the conversion structure and the control loops chosen for an UPS. To do this, firstly, the state of the art of the UPS will be done, establishing the suitable UPS to meet the requirements of design.

Secondly, the cut-off of the control loops will be sized, as well as the elements that compose it, its operation will be analyzed for different loads and its possible solutions will be verified for critical loads. Finally, the test will be simulated as provided in the standard of the UPS.

## RESUMEN

El presente trabajo tiene por objeto el diseño, dimensionamiento y análisis de la estructura de conversión y los lazos de control elegidos para un SAI (sistema de alimentación ininterrumpida). Para ello, en primer lugar se realizará el estado del arte de los SAI, determinando el SAI idóneo para cumplir con los requerimientos de diseño.

En segundo lugar se dimensionarán las frecuencias de corte de los lazos de control, así como los elementos que lo componen, se analizará su funcionamiento ante diferentes cargas y se comprobarán las posibles soluciones ante cargas críticas. Por último, se simularán ensayos conforme a lo estipulado en la normativa relativa a SAI.

**Palabras clave:** SAI, topología, almacenamiento de energía, estructura de conversión, lazos de control.

# ÍNDICE GENERAL

1.	Introducción .....	1
2.	Estado del arte.....	3
2.1	Introducción.....	3
2.1.1	Perturbaciones en la red eléctrica.....	3
2.1.2	Parámetros de dimensionamiento de una SAI.....	6
2.1.3	Campos de aplicación .....	6
2.2	Clasificación de los SAI.....	8
2.2.1	Componentes de los SAI .....	8
2.2.2	Topologías de los SAI .....	8
2.2.3	Configuración de un SAI .....	13
2.3	Conexiones entre SAI.....	18
2.3.1	Bus de salida único .....	18
2.3.2	SAI en paralelo.....	19
2.3.3	SAI de doble bus .....	21
2.4	Sistemas de almacenamiento de energía.....	23
2.4.1	Sistemas de almacenamiento de energía en un SAI .....	23
2.4.2	Configuraciones habituales en un SAI .....	28
2.4.3	Generación fotovoltaica en SAI .....	33
3.	Estructura y control de la etapa de conversión de potencia .....	36
3.1	Introducción.....	36
3.2	Estructura de conversión.....	36
3.2.1	Elementos de los convertidores electrónicos .....	36
3.2.2	Estructura elegida.....	38
3.2.3	Lazo de control .....	43

3.2.4 Determinación frecuencias de corte .....	50
3.2.5 Validación estructura de conversión elegida .....	55
4. Análisis de funcionamiento .....	59
4.1 Aproximación lazo de corriente interno.....	59
4.2 Ensayo ante cargas RL serie.....	62
4.3 Ensayo ante cargas RC paralelo.....	63
4.4 Cargas no lineales .....	64
4.5 Soluciones a cargas problemáticas.....	64
5. Simulación de ensayos conforme a normativa .....	69
6. Conclusiones y líneas futuras .....	79
7. Bibliografía.....	83
8. Anexo .....	85
Código Matlab para el cálculo de los diagramas de Bode y los parámetros del controlador PI.....	85

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1: Evolución de la potencia eólica instalada en el mundo [1] .....	1
Figura 1.2: Evolución de la potencia fotovoltaica instalada en el mundo [2] .....	1
Figura 2.1: Efecto del blackout en una fase de la tensión de red [4] .....	3
Figura 2.2: Efecto de la variación de la frecuencia en una fase de la tensión de red [4].	4
Figura 2.3: Hueco de tensión sobre una fase de la tensión de red [2].....	4
Figura 2.4: Sobretensión transitoria sobre una fase de la tensión de red [4].....	4
Figura 2.5: Sobretensión temporal sobre una fase de la tensión de red [4] .....	5
Figura 2.6: Efecto de corrientes parásitas sobre una fase de la tensión de red [4].....	5
Figura 2.7: Efecto del ruido EMI en una fase de la tensión de red [4] .....	5
Figura 2.8: Topología SAI Offline [6].....	9
Figura 2.9: Topología SAI Iterativo [7] .....	10
Figura 2.10: Topología SAI Online [6] .....	11
Figura 2.11: Esquema SAI básica con bus de salida único [5] .....	18
Figura 2.12: Esquema de un SAI con bypass [5] .....	19
Figura 2.13: Esquema de un SAI conectados en paralelo con bypass común [5].....	20
Figura 2.14: Esquema de un SAI conectados en paralelo con bypass distribuido [5]...	20
Figura 2.15: Esquema de un SAI redundante en stand by [5] .....	21
Figura 2.16: Esquema de un SAI de doble bus básico [5].....	22
Figura 2.17: Esquema de un SAI redundante de doble bus en stand-by [5].....	22
Figura 2.18: Estado de madurez de diferentes tecnologías de almacenamiento energético [8] .....	23
Figura 2.19: Pila de combustible de hidrógeno.....	26
Figura 2.20: Esquema de un ultracondensador .....	27
Figura 2.21: Conexión de un sistema de almacenamiento de energía a un SAI [6].....	29
Figura 2.22: SAI con baterías y ultracondensadores [6].....	30
Figura 2.23: Conexión pila de combustible y batería electroquímica, opción 1 [11].....	31
Figura 2.24: Conexión pila de combustible y batería electroquímica, opción 2 [11].....	31
Figura 2.25: Conexión pila de combustible y batería electroquímica, opción 3 [11].....	32

Figura 2.26: Conexión pila de combustible y batería electroquímica, opción 4 [11]....	33
Figura 2.27: Evolución temporal de la generación fotovoltaica en el mundo [14].....	34
Figura 2.28 : Conexión SAI a generación fotovoltaica [6].....	35
Figura 3.1: Rebote de un interruptor mecánico [16] .....	37
Figura 3.2: Característica estática de un diodo de potencia .....	38
Figura 3.3: Esquema convertidor boost .....	39
Figura 3.4: Circuito de señal convertidor boost .....	40
Figura 3.5: Esquema inversor puente en H .....	41
Figura 3.6: Circuito de señal inversor puente en H .....	42
Figura 3.7: Esquema general lazos de control.....	44
Figura 3.8: Diagrama de bloques lazo de corriente elevador .....	45
Figura 3.9: Diagrama de bloques lazo de tensión elevador .....	46
Figura 3.10: Diagrama de bloques lazo de corriente inversor .....	48
Figura 3.11: Diagrama de bloques lazo de tensión inversor .....	49
Figura 3.12: Bode inversor $f_{cv\_inv}=200$ y $f_{cc\_inv}=1000\text{Hz}$ .....	51
Figura 3.13: Bode inversor $f_{cv\_inv}=400$ Hz y $f_{cc\_inv}=2000\text{Hz}$ .....	51
Figura 3.14: Bode inversor $f_{cv\_inv}=500$ y $f_{cc\_inv}=2500\text{Hz}$ .....	52
Figura 3.15: Bode inversor $f_{cv\_inv}=500$ y $f_{cc\_inv}=1000\text{Hz}$ .....	53
Figura 3.16: Bode inversor $f_{cv\_inv}=500$ y $f_{cc\_inv}=1500\text{Hz}$ .....	53
Figura 3.17: Implementación estructura de conversión completa.....	56
Figura 3.18: Circuito de control .....	56
Figura 3.19: Simulación validación: Forma de onda tensión carga.....	57
Figura 4.1: Bode lazo de tensión elevador con y sin aproximación lazo de corriente ...	60
Figura 4.2: Bode lazo de tensión inversor con y sin aproximación lazo de corriente .....	61
Figura 4.3: Esquema vectorial corrientes del inversor .....	63
Figura 4.4: Diagrama de bloques con efecto corriente de carga .....	67
Figura 5.1: Valor rms de la tensión de salida del SAI.....	69
Figura 5.2: THD de la tensión de salida del SAI. ....	70
Figura 5.3: Valor rms de la tensión de salida del SAI para carga lineal inductiva. ....	71
Figura 5.5: Valor rms de la tensión de salida del SAI para carga lineal capacitiva.....	72

Figura 5.6: THD de la tensión de salida del SAI para carga lineal capacitiva.....	72
Figura 5.7: Tensión de salida del SAI cuando se produce una sobrecarga a 0.2s. ....	74
Figura 5.8: Transitorio de tensión ante cambios de carga lineal inductiva.....	75
Figura 5.9: Transitorio de tensión ante cambios de carga lineal capacitiva. ....	75
Figura 5.10: Valor rms de la tensión de salida del SAI para carga no lineal.....	76
Figura 5.11: THD de la tensión de salida del SAI para carga no lineal.....	77
Figura 5.12: Transitorios de la tensión de salida ante cambios de carga no lineal.....	78



## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2.1: Aplicaciones de los SAI.....	7
Tabla 2.2: Comparación parámetros de diferentes SAI [5] .....	17
Tabla 2.3: Ventajas y desventajas de una batería de plomo ácido [9].....	25
Tabla 2.4: Ventajas y desventajas de una batería de ion-litio [8] .....	26
Tabla 2.5: Comparación sistemas de almacenamiento de energía para SAI [9] .....	28
Tabla 3.1: Datos de diseño .....	39
Tabla 3.2: Frecuencias de corte elevador .....	50
Tabla 3.3: Frecuencias de corte del inversor .....	54
Tabla 3.4: Parámetros PI simulación validación .....	57
Tabla 3.5: Valores obtenidos simulación validación .....	57
Tabla 4.1: Parámetros obtenidos ante distintas cargas RL .....	62
Tabla 4.2: Parámetros obtenidos ante distintas cargas RC.....	63
Tabla 4.3: Control adaptativo de las cargas RL críticas .....	65
Tabla 4.4: Control adaptativo de las cargas RC críticas .....	66



## 1. Introducción

En la actualidad, la conciencia a nivel global de la importancia que tienen las energías renovables está aumentando considerablemente. Con ello no sólo se logra prevenir el cambio climático, sino también proporciona independencia energética, tanto a escala global (una nación), como a pequeña escala (sistema aislado). Además, se logran beneficios sociales en los países en desarrollo donde el acceso a la energía se considera un privilegio.

Esto ha provocado que en la última década se haya dado un incremento de la potencia instalada de energías renovables a nivel mundial, en especial de energía eólica y energía fotovoltaica. En la Figura 1.1 y en la Figura 1.2 se ve cómo la potencia instalada de estas dos tecnologías se incrementa año a año.

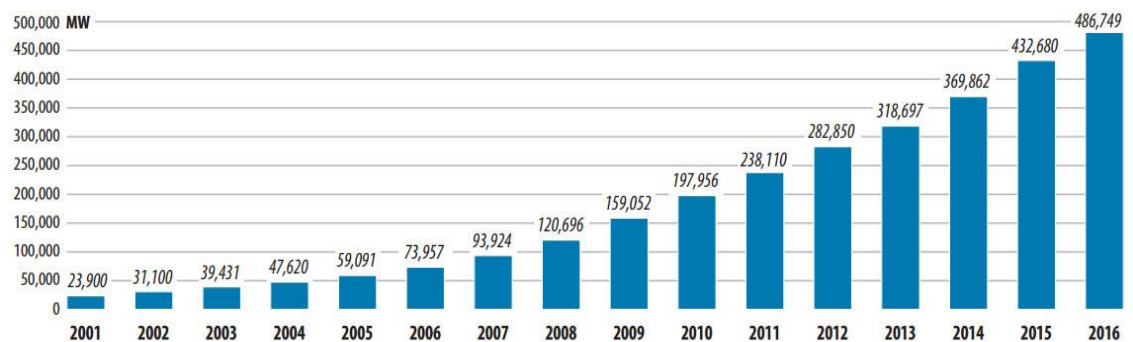


Figura 1.1: Evolución de la potencia eólica instalada en el mundo [1]

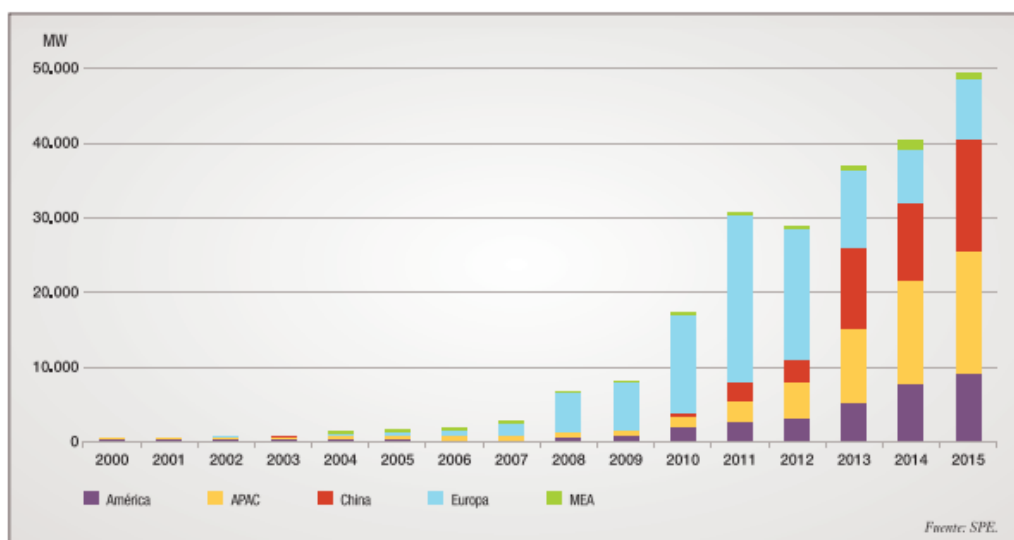


Figura 1.2: Evolución de la potencia fotovoltaica instalada en el mundo [1]

Este incremento trae consigo no solo un desarrollo de la tecnología para aumentar su eficiencia, sino que también trata de conseguir sistemas cada vez más fiables y seguros que garanticen el suministro de energía.

Por otro lado, cada vez se instalan más parques eólicos y plantas fotovoltaicas en países con peor calidad de red, es decir, con un nivel de perturbaciones mayor. Al ser la red la encargada de alimentar a algunas de las cargas de estos parques, estas pueden quedar dañadas, afectando al funcionamiento del sistema de generación.

Para disminuir el efecto de estas perturbaciones, la empresa Saprem decidió diseñar un sistema de alimentación ininterrumpida, SAI, generalmente conocidos como UPS en inglés (Uninterruptible Power Supply), que se encargue de alimentar algunas de las cargas de un aerogenerador, como pueden ser la baliza o el sistema de orientación de las palas, control de Pitch (en el caso de que este sea eléctrico), cuando se produce un hueco de tensión en la red.

Se pretende conocer en profundidad en qué estado se encuentra la tecnología, por lo que en el presente trabajo se va a realizar un estudio detallado del estado del arte de los SAI, en el que se diferenciarán las clasificaciones más habituales, las conexiones entre ellos y los distintos tipos de sistemas de almacenamiento existentes. Una vez realizado, se diseñará una estructura de conversión válida, así como su control; también se analizará su comportamiento, tratando de buscar los puntos fuertes de la misma, sus puntos débiles y los aspectos a mejorar, marcando, de esta forma, posibles líneas futuras de trabajo.

---

## 2. Estado del arte

### 2.1 Introducción

Cada vez es mayor la dependencia a la energía eléctrica y la necesidad de proteger equipos más sofisticados y sensibles a las perturbaciones, con un nivel de procesamiento de datos crucial para el usuario. Surge por tanto la necesidad de utilizar un aparato capaz de proporcionar seguridad a las cargas ante posibles fallos que ocurran en la red eléctrica; simulando su comportamiento.

#### 2.1.1 Perturbaciones en la red eléctrica

Cualquier desviación en los valores nominales de la red eléctrica se define como una perturbación eléctrica, y puede provocar la parada, el deterioro o el malfuncionamiento de un equipo.

Son múltiples los efectos que se producen en la red [2]:

- Variaciones de tensión de larga duración: En este grupo se incluyen tanto las interrupciones de suministro o blackout, con ausencia total de tensión, y las variaciones lentas de tensión, con variaciones de tensión superiores a la banda  $\pm 10\%$ , en MT y BT, una duración superior a 1 min.

La fig. 2.1 muestra este fenómeno:

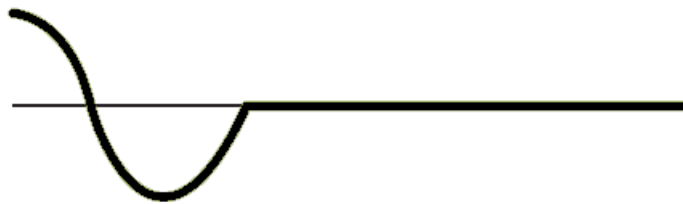


Figura 2.1: Efecto del blackout en una fase de la tensión de red [3]

- Variaciones de frecuencia: Son variaciones del valor nominal de la frecuencia de la red, de 50 o 60 Hz. Puede provocar variaciones en la velocidad de giro de motores conectados a red, alteración de equipos electrónicos, o modificación de la

frecuencia de los armónicos, entre otros. La modificación de la onda de la red se ve en la fig. 2.2:

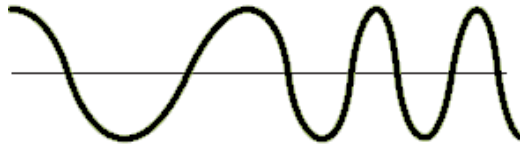


Figura 2.2: Efecto de la variación de la frecuencia en una fase de la tensión de red [3]

- Huecos de tensión: Se define como la caída de tensión de una o más fases a un valor que oscila entre el 90% y el 1% de la tensión nominal durante un tiempo que va de 10 ms. a 1 min. Dicho efecto queda reflejado en la fig. 2.3:

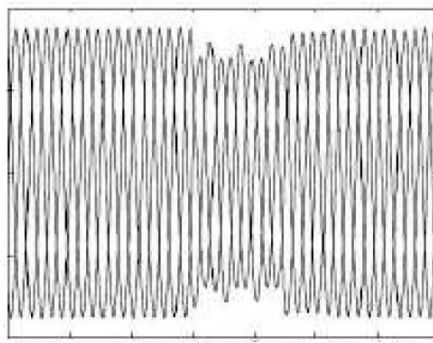


Figura 2.3: Hueco de tensión sobre una fase de la tensión de red [2]

- Sobretensión transitoria: Aumento de tensión de corta duración (no supera unos pocos milisegundos). En la fig. 2.4 queda reflejada su efecto sobre la red:

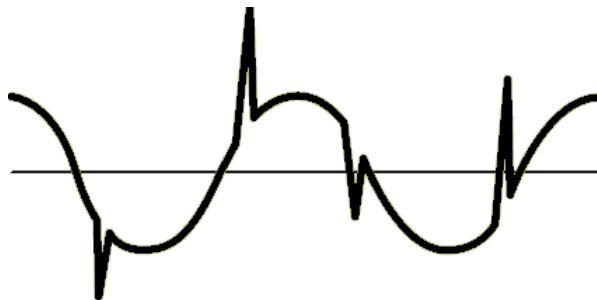


Figura 2.4: Sobretensión transitoria sobre una fase de la tensión de red [3]

- **Sobretensión temporal:** Consiste en un aumento de tensión, de duración relativamente larga (comparada con una sobretensión transitoria), que puede ser no amortiguada o débilmente amortiguada. En la fig. 2.5 se muestra su comportamiento:

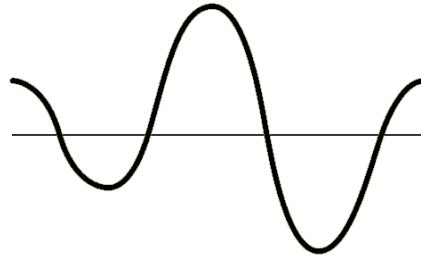


Figura 2.5: Sobretensión temporal sobre una fase de la tensión de red [3]

- **Corrientes armónicas y parásitas:** Corresponden a los términos no deseados que aparecen en la corriente de red (senoidal) a una frecuencia múltiplo de la frecuencia nominal de red. En la fig. 2.6 aparece el efecto de añadir armónicos a la red:

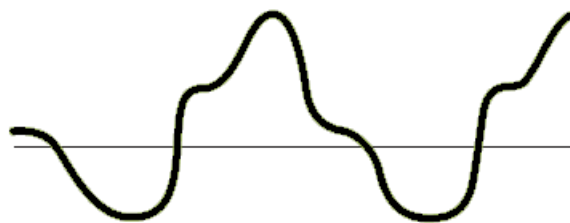


Figura 2.6: Efecto de corrientes parásitas sobre una fase de la tensión de red [3]

- **Ruido EMI:** El ruido de interferencia electromagnética altera la onda senoidal que proporciona la red eléctrica, pudiendo provocar error en tomas de datos de equipos. Su efecto queda reflejado en la fig. 2.7:



Figura 2.7: Efecto del ruido EMI en una fase de la tensión de red [3]

### 2.1.2 Parámetros de dimensionamiento de una SAI

Todos estos efectos no deseados ocurren de forma inevitable y periódica en la red eléctrica. Aunque muchos de ellos se puedan mitigar, eliminarlos por completo es utópico, por lo que un SAI es una buena solución para proteger de estos efectos a las cargas a las que van conectadas y será el objeto de estudio de este trabajo.

Las características más importantes que definen un SAI son:

- Potencia nominal activa: Corresponde con la potencia máxima que se puede suministrar a la salida del SAI.
- Factor de potencia: Determina la potencia reactiva que se suministrará a la salida.
- Calidad de la tensión generada: Son varios los factores que la determinan, como la cantidad de armónicos (THD), o la diferencia en la amplitud de la tensión ( $\Delta V$ ) en un periodo de tiempo, que viene delimitado en el apartado 5.3.4 de [4].
- Autonomía: Depende del sistema de almacenamiento utilizado, aunque suelen abarcar un rango de 10s. a varias horas.
- Tiempo de respuesta: Depende de factores como la topología del SAI, así como del control utilizado. El abanico de posibilidades va desde los 4ms. (pudiendo ser menor) hasta tiempos de más de 10 ms.

### 2.1.3 Campos de aplicación

Los sistemas de alimentación ininterrumpida son ampliamente utilizados para suministrar energía segura y continua a cargas críticas conectadas a ésta, como ordenadores, centros de datos, sistemas de comunicación o centros hospitalarios.

En la tabla 2.1 se pueden diferenciar aplicaciones típicas de los SAI, en función del tipo utilizado (se explicarán las diferencias de estos en el apartado 2.2):



OFFLINE	LINE-INTERACTIVE	ONLINE
Ordenadores personales	Networking de empresas	Red IT empresarial.
Puestos de trabajo de Internet	Sistemas de seguridad	Telecomunicaciones.
Centralitas telefónicas	Sistemas de emergencia	Equipos electro medicina
Cajas registradoras	Sistemas de iluminación	Automatización industrial.
Terminales POS	Automatización domótica e industrial	Instalaciones de emergencia.
Fax		Protección de líneas dedicadas.
Pequeños grupos de lámparas de emergencia		Aplicaciones críticas en los sectores industrial/público.
Automatización industrial y doméstica		Sistemas de control en energías renovables

Tabla 2.1: Aplicaciones de los SAI

Es necesario hacer una mención especial a su uso para alimentar sistemas de control y operación en energías renovables; en concreto su uso en aerogeneradores eólicos, para el control de los equipos de procesamiento de datos y del cambio del ángulo de pitch eléctrico de las palas del aerogenerador, encargado de llevar a las palas a la posición de bandera y frenar así el aerogenerador. El uso del SAI es fundamental para eliminar el efecto de los huecos de tensión: El problema principal se da cuando no se puede alimentar el sistema de pitch, ya que al no poder frenar el aerogenerador, el rotor se acelera, haciendo que se tenga que usar el freno mecánico (no es su función), provocando chispas y/o fuego, y pudiendo destruir el aerogenerador.

También es muy común el uso del SAI junto a generadores fotovoltaicos; más adelante se hablará de este tipo de sistemas.

Por tanto, el uso de los SAI permite mejorar la integración de las energías renovables en la red, y así tratar de alcanzar el plan energético 2020, en el que se debe conseguir un 20% de la energía a partir de fuentes renovables.

## 2.2 Clasificación de los SAI

Los SAI se clasificarán a partir de 3 parámetros; en primer lugar se diferenciarán del tipo de elementos que conforman el sistema de potencia. La segunda clasificación es la más utilizada, y se rigen por la tipología utilizada ya que determina el modo de funcionamiento y, como ya se ha visto en el apartado 2.1.3, determina el campo de aplicación en el que se encontrarán.

En último lugar, según el transformador utilizado.

### 2.2.1 Componentes de los SAI

Esta es la primera clasificación a tener en cuenta, y por tanto la más generalista.

Los tres tipos son [6]:

- SAI estáticos: Utilizan convertidores electrónicos de potencia e inversores para el paso de energía, su almacenamiento y su suministro. Debido al avance de la electrónica de potencia, estos son los más utilizados.
- SAI rotatorios: Para proporcionar las mismas funciones que las descritas anteriormente, utilizan motores y generadores.
- SAI híbridos: En ocasiones se combina los elementos de los dos tipos anteriores, dando lugar a este tipo de SAI.

### 2.2.2 Topologías de los SAI

Se diferencian en la manera en la que suministran energía a las cargas críticas, proporcionando distintos grados de seguridad y distintos valores de potencia.

En las ilustraciones que se muestran a continuación, se utilizan baterías como sistemas de almacenamiento de energía ya que son los más comunes, aunque cualquier otro tipo de sistema es válido.

A continuación se pasa a comparar las diferentes tipologías teniendo en cuenta los siguientes aspectos [2][5][4]:

- Modos de operación:

o SAI Offline:

También conocidos como topología de doble conversión, están compuestos por un rectificador (DC/DC), un interruptor estático, un sistema de almacenamiento de energía y un inversor (DC/AC), como se puede ver en la fig.2.8:

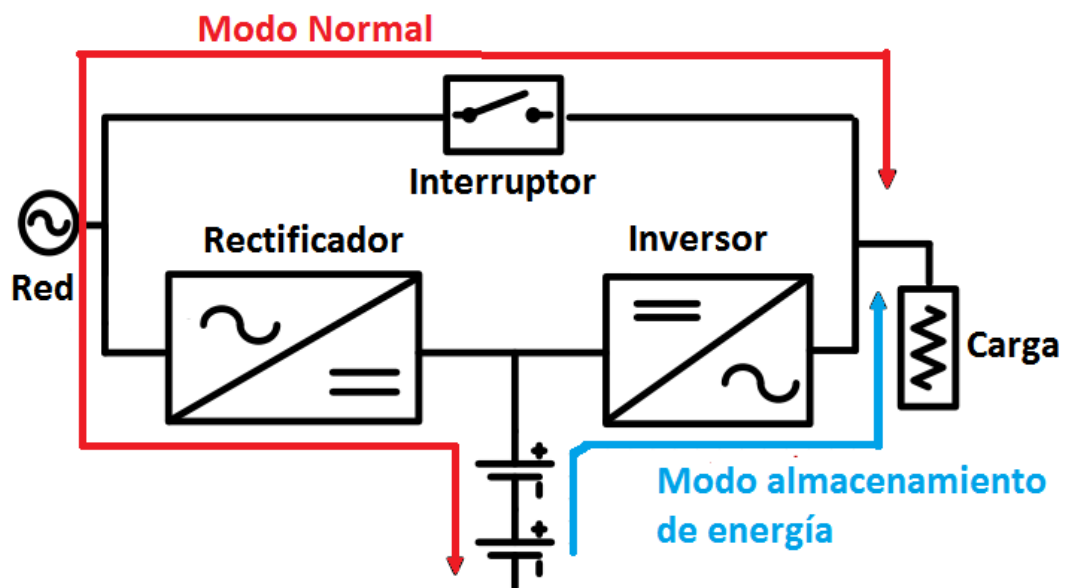


Figura 2.8: Topología SAI Offline [5]

Como se observa en la fig. 2.8, hay dos modos de funcionamiento:

- 1) Modo normal: El interruptor se encuentra cerrado y el inversor apagado. La red es la encargada de alimentar al rectificador, para la carga del sistema de almacenamiento, y a la carga, a la que se le suministra de forma continua.
- 2) Modo almacenamiento de energía o backup: Cuando la tensión del lado de red (AC) se encuentra fuera de los límites tolerables, el sistema de alimentación ininterrumpida cambia a este modo de operación. En este caso, el conjunto formado por el almacenamiento de energía y el inversor continúan suministrando energía a la carga. Este modo finalizará cuando se

supere el límite de duración del modo backup, o cuando la entrada AC vuelva a límites aceptables.

○ SAI Iterativo:

Está formado por un convertidor bidireccional, un interruptor estático y un sistema de almacenamiento de energía.

En la fig. 2.9 queda representada de forma esquemática:

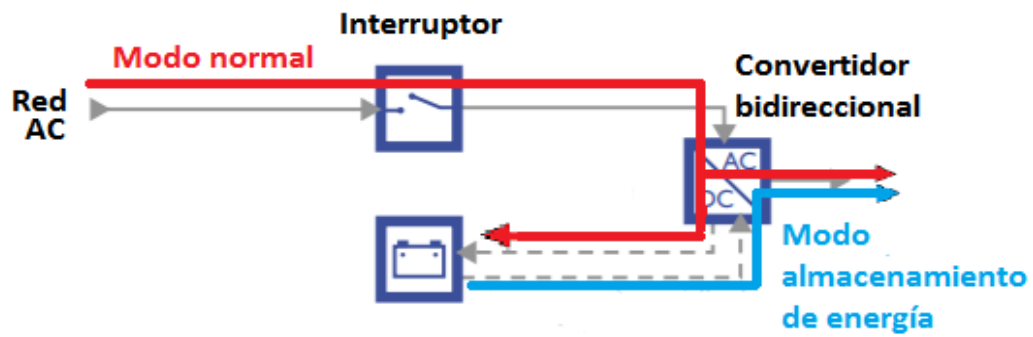


Figura 2.9: Topología SAI Iterativo [6]

Los dos modos de operación de esta topología son:

- 1) Modo normal: Estando el interruptor cerrado, la carga estará alimentada por la conexión entre la red y el almacenamiento de energía. El inversor será el encargado de gestionar la dirección de la energía, pudiendo alimentar a las cargas o alimentar al sistema de almacenamiento.
- 2) Modo backup: Cuando la tensión de la red supera los valores de tolerancia permitidos por el SAI, el interruptor se abrirá. La carga pasará a estar alimentada de forma continua por el almacenamiento de energía. Este modo finalizará en el momento en el que se supere el límite de duración del almacenamiento de energía o si el suministro del lado de red vuelve a los valores aceptables.

○ SAI Online:

También denominado topología stand-by, está conformado por un rectificador, un inversor; lo más habitual es que incorporen un interruptor estático bypass. El esquema de este apartado se muestra a continuación en la fig. 2.10:

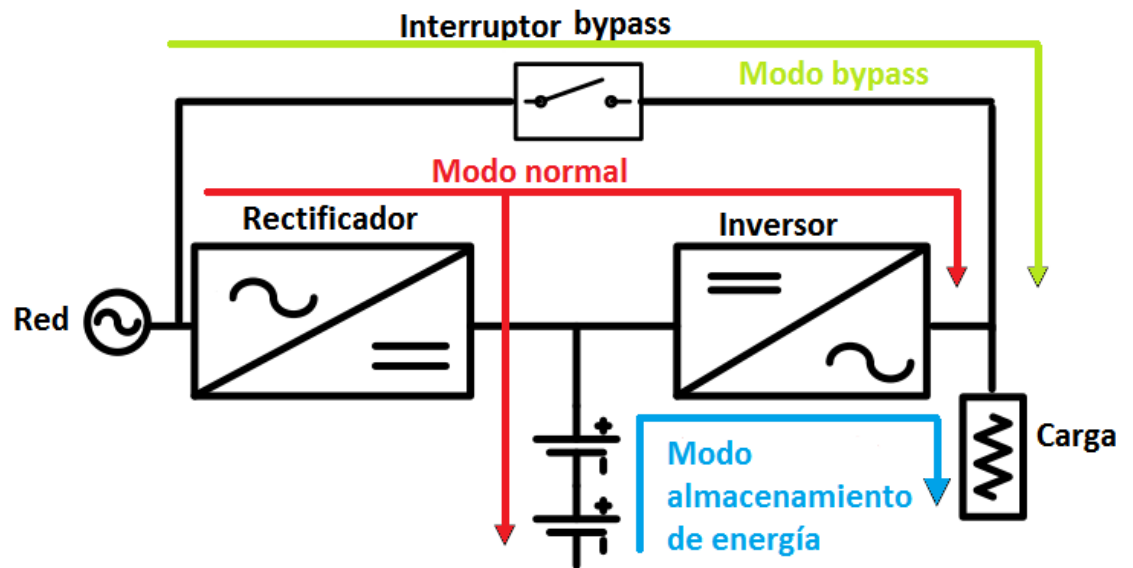


Figura 2.10: Topología SAI Online [5]

Siguiendo el esquema representado (fig. 2.10), se distinguen:

- 1) Modo normal: La carga y el sistema de almacenamiento de energía están alimentados por la red a través de los equipos de potencia.
- 2) Modo backup: En el momento en el que el suministro de red adopta valores intolerables para el SAI, la carga pasa a ser alimentada por el sistema de almacenamiento de energía a través del inversor. El conjunto inversor/almacenamiento permitirá que las cargas estén alimentadas de forma continua. Este modo de operación finalizará en el momento que se supere el límite de duración del almacenamiento de energía o si el suministro del lado de red vuelve a los valores aceptables.
- 3) Modo bypass: En las topologías anteriores se ha tenido en cuenta un comportamiento anómalo de la red de suministro, activando el modo de alimentación de energía. Sin embargo, no se ha tenido en cuenta un

malfuncionamiento del propio sistema de alimentación SAI; esta topología sí lo tiene en cuenta, lo que proporciona un alto nivel de protección. Se activa cuando el SAI sufre una sobrecarga, un fallo, o se encuentra en tareas de mantenimiento; en ese momento se cierra el interruptor estático bypass, permitiendo que la carga pase a ser alimentada directamente de la red.

- Pérdidas/rendimiento:

- SAI Offline: Las pérdidas de conducción del sistema son bajas, al circular energía por el inversor únicamente cuando se produce el hueco. El rectificador únicamente conducirá en la carga del sistema de alimentación.
- SAI Iterativo: En este caso el convertidor bidireccional conduce en cualquier modo de operación, funcionando como rectificador cuando se cargue el sistema de alimentación, y como inversor en el modo backup, siendo por tanto las pérdidas similares al SAI Offline.

Es el que mayor rendimiento posee, siendo normalmente mayor al 97%.

- SAI Online: Exceptuando los momentos en los que el SAI se encuentra en mantenimiento (modo bypass), las pérdidas de conducción serán las más altas de las tres tipologías, ya que durante el modo normal conducen dos convertidores (rectificador e inversor) y en el modo backup lo hará el inversor.

- Rapidez de respuesta:

El SAI Offline es el que mayor tiempo de respuesta entre un modo de operación y otro posee, oscilando entre 4 ms. a 20 ms.

El SAI Iterativo y el Online poseen tiempos de respuesta muy bajos, siendo normalmente menores a 4 ms.

- Coste:

El precio del SAI depende de los parámetros elegidos (véase apartado 2.1.2), así como de la empresa que los distribuye. No obstante, sí se puede afirmar que los SAI Offline e iterativos tienen un coste bajo, siendo los SAI Online los de mayor precio [6].

- Tamaño:

- SAI Offline: Es utilizado normalmente para cargas pequeñas, de unos 600VA, siendo el dispositivo de menor tamaño. Además, es el que posee el diseño más simple.
- SAI Iterativo: Generalmente conectado a cargas cuyas potencias varían entre 0.5 y 3 kVA, pudiendo llegar a 5 kVA.
- SAI Online: Es el dispositivo de mayor tamaño, alimentando a cargas de más de 3kVA.

- Calidad de la energía:

El SAI Online se diferencia del resto por sus buenas prestaciones tanto en el lado de red como en el lado de carga. Durante el modo de operación normal toda la potencia de la red pasa por el rectificador, permitiendo absorber la potencia reactiva de la red (que no produce trabajo y por tanto no es deseada). A su vez, el inversor permitirá que la demanda de la carga no afecte a la red (p. ej. armónicos de corriente) mediante la generación de las baterías.

Una vez conocidas las distintas formas de operar que ofrece un SAI, queda por conocer qué circuitos se van a utilizar. Para ello, lo más común es clasificarlos en función del transformador que incorporan.

### **2.2.3 Configuración de un SAI**

Esta categoría es la que más abanico de posibilidades ofrece, ya que se determina en gran medida según el tipo de aplicación que se requiera. Por ello, se diferenciarán las tres configuraciones principales comparando entre sí, de forma breve, los SAI más comunes de cada una de ellas [5].

Los tipos de configuraciones son:

- Sistema SAI con transformador convencional:

Una configuración típica consiste en incorporar un transformador reductor a la salida del suministro de red, para poder trabajar a menor tensión y así poder alimentar al

sistema de almacenamiento de energía, y un transformador elevador situado a la entrada de la carga para poder alimentarla a tensiones mayores.

Las ventajas de este tipo de configuraciones son:

- Aislamiento galvánico ante picos y transitorios de la red
- Alta robustez
- Se pueden utilizar en aplicaciones que requieran de altas potencias

Por el contrario, presenta las siguientes desventajas:

- Comparado con otra configuración de la misma potencia, requieren de mayor peso, tamaño y coste
- Al conmutar a tensiones bajas (altas corrientes) se disminuye la eficiencia del proceso

Los SAI más utilizadas en este apartado son[5]:

- SAI con transformador de baja frecuencia
- Convertidor de 3 patillas (TRINITY)

- Sistema SAI con transformador de alta frecuencia:

La gran disponibilidad de interruptores y diodos de conmutación a frecuencias altas con características casi ideales ha propiciado el uso de trafos a frecuencias cada vez mayores.

Las ventajas que posee son:

- Comparado con un sistema tradicional (con trafeo de baja frecuencia), para la misma potencia, poseen menos peso y tamaño.
- Aislamiento galvánico

Sin embargo, su uso provoca:

- Reducción del rendimiento global
- Incremento del coste del sistema



Los SAI comúnmente utilizadas son [5]:

- SAI de tensión de entrada 110/220V y trafo de alta frecuencia
- SAI con convertidor BIFRED
- SAI de 2 etapas con corrección del factor de potencia

- Sistema SAI sin transformador:

Esta configuración cada vez está alcanzando más popularidad debido al avance tecnológico de la electrónica de potencia.

Las ventajas que poseen, con respecto a un SAI con transformador de la misma potencia, son:

- Más baratos
- Rendimientos mayores
- Menor tamaño

Su uso también acarrea consecuencias negativas, como son:

- Poco robusto ante picos y transitorios
- Requiere de sistemas de alimentación (normalmente bancos de baterías) de grandes tensiones, encareciendo el coste y disminuyendo la fiabilidad del sistema
- No hay aislamiento galvánico, provocando problemas de seguridad (p. ej. en operaciones de mantenimiento)

Los SAI más utilizadas son [5]:

- SAI sin trafo de 4 patillas
- SAI de voltaje entrada-salida 110/220V
- SAI basado en el inversor de canal Z

Con las características descritas, se observa que en la actualidad los SAI sin transformador están desbancando a las que sí llevan trafo, con mejores eficiencias, poco peso y tamaño.

No obstante, elegir el SAI más adecuada dependerá de la aplicación que se utilice, tratando de adecuar los requerimientos del uso específico a los que ofrece la configuración del SAI.

A modo de resumen, en la tabla 2.2 se comparan las principales características de los SAI más utilizados. Cabe destacar que no es posible parametrizar el THD, ni la respuesta, ni el tiempo de cambio de modo, ya que éstos dependen también del tipo de control que se realice sobre el SAI.

Topología	Tipo de configuración SAI	Eficiencia	Factor de potencia	Ratios de potencia	Banco de baterías	Peso y tamaño
SAI con trafo convencional	On line	<90%	0,8-0,9	> 750 kVA	360 V	Muy alto
Convertidor de 3 patillas	On line	87%	0,99	3 kVA	192 V	Alto
SAI 110/220 V de entrada y trafo asilado HF	On line	86	0,7	2 kVA	96 V	Medio
SAI con convertidor BIFRED	Interactivo	<90%	≈ 1	< 1 kVA	48 V	Bajo
SAI de 2 etapas con PFC	Off line	0,84	0,99	< 500 VA	48 V	Bajo
SAI sin trafo de 4 patillas	On line	96%	0,99	3 kVA	192 V	Bajo
SAI no aislado,110/220V entrada-salida	On line	0,86	0,9	2.6 kVA	108 V	Medio
SAI basado en inversor canal Z	On line	>90%	0,9	3 kVA	360 V	Bajo

Tabla 2.2: Comparación parámetros de diferentes SAI [5]

## 2.3 Conexiones entre SAI

En el apartado 2.2 se ha definido claramente un SAI, sin embargo, pueden utilizarse varios SAI para la protección de una determinada carga, ya sea para alcanzar distintos valores de potencia en el lado de carga, para aumentar el grado de seguridad y/o para aumentar la potencia en el lado de carga.

Surge por tanto la necesidad de clasificar las distintas posibles conexiones entre cargas. A continuación se describen las distintas posibilidades [4]:

### 2.3.1 Bus de salida único

En este apartado se incluyen las distintas configuraciones que se pueden dar con un único SAI y un bus AC a la salida, que irá conectado a la carga. Se diferencian:

- SAI básica:

Esta SAI se caracteriza por no incorporar ningún circuito auxiliar. En caso de fallo en el SAI; no se puede asegurar el suministro continuo de energía a las cargas. En la fig. 2.11 se puede apreciar este comportamiento:

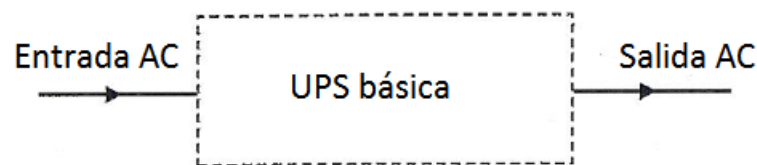


Figura 2.11: Esquema SAI básica con bus de salida único [5]

En caso de fallo en la red, será el sistema de almacenamiento el encargado de alimentar a las cargas hasta que la tensión a su salida sea demasiado baja para la carga. En consecuencia, el tiempo de funcionamiento ante fallo vendrá determinado por el tipo de alimentación y su capacidad de almacenamiento.

- SAI con bypass:

Consiste en un SAI básico a la que se le ha conectado un circuito en paralelo, asegurando un suministro continuo al lado de carga. Se utilizará en caso de:

- Fallo en el SAI
- Corrientes transitorias en el lado de carga. Puede ser mayor a la que soporte el SAI, pero no a la del circuito bypass.

El esquema de esta configuración queda representado en la fig. 2.12:

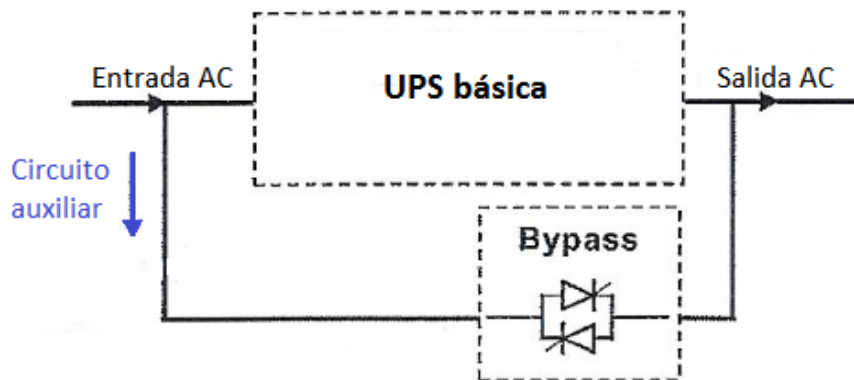


Figura 2.12: Esquema de un SAI con bypass [5]

El bypass se implementará con semiconductores, como triac-diac o tiristores, y/o dispositivos electromecánicos, como relés o contactores; todos ellos deberán estar correctamente dimensionados conforme a las especificaciones del SAI.

### 2.3.2 SAI en paralelo

En esta categoría, dos o más SAI se conectan entre sí (en modo de operación normal) compartiendo su salida en AC a la del bus común.

Los SAI que se conectarán en paralelo pueden ser:

- SAI redundantes: Se compone del número de SAI necesarios para respaldar a la carga, y un SAI adicional o redundante. Se utiliza cuando se pretende suministrar energía de forma continua, consiguiendo seguir trabajando con normalidad aunque se desconecte un SAI (por fallo o mantenimiento del mismo).
- SAI en paralelo: No incorpora SAI redundantes, presentando un coste menor, pero una disponibilidad de suministro menor que en el caso anterior. Esta es una opción muy interesante para aerogeneradores.

Con esto, se diferencian tres configuraciones:

- SAI conectados en paralelo con interruptor bypass común:

Se conectarán los SAI que se consideren oportunos (con o sin SAI redundante) compartiendo un interruptor bypass, como se muestra en la fig.2.13:

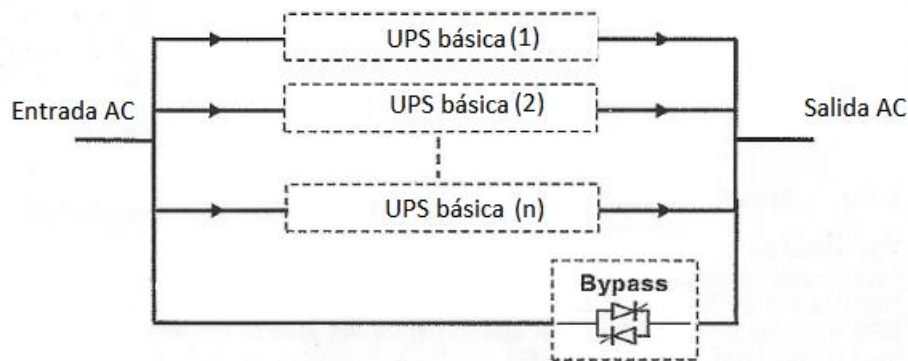


Figura 2.13: Esquema de un SAI conectados en paralelo con bypass común [5]

Siendo (n), el número total de SAI conectados en paralelo.

El bypass marca el circuito auxiliar.

- SAI conectados en paralelo con bypass distribuido:

En esta ocasión, se conectará cada SAI con su interruptor bypass asignado para asegurar que durante el modo bypass, la corriente circula por el interruptor asignado y no por ningún otro. Nuevamente, el número total de SAI podrá ser con o sin SAI redundante. El esquema de esta configuración es el que aparece en la fig. 2.14:

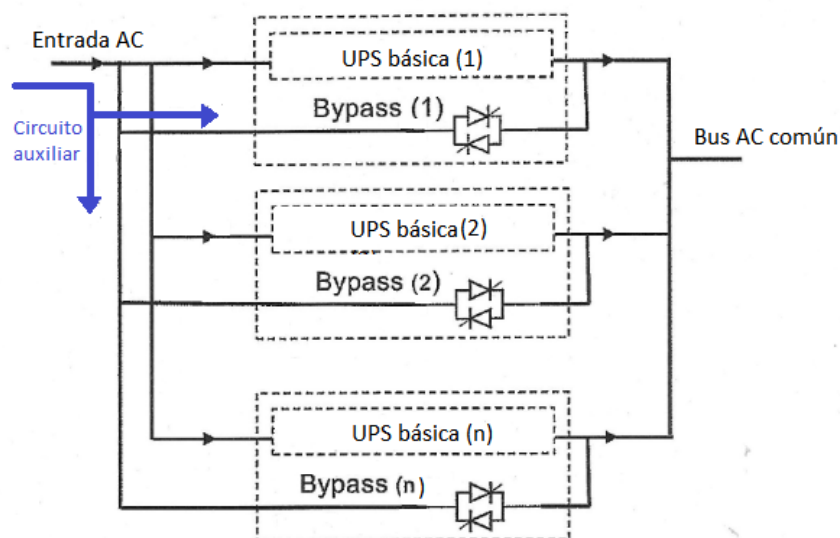


Figura 2.14: Esquema de un SAI conectados en paralelo con bypass distribuido [5]

Nuevamente, los bypass marcarán el circuito auxiliar.

- SAI redundante en stand-by:

Esta configuración requiere de la conexión de mínimo 2 SAI con bypass.

La entrada del bypass del SAI en funcionamiento (que suministra energía a la carga), está alimentada por la salida AC del SAI en pausa. En caso de fallo del SAI en funcionamiento, se activará su bypass, y por tanto pasará a ser alimentada por el SAI restante. En la fig. 2.15 se muestra esta configuración:

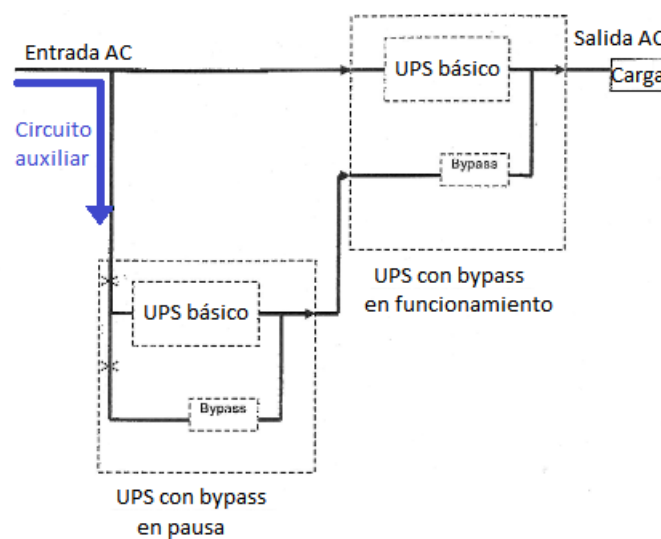


Figura 2.15: Esquema de un SAI redundante en stand by [5]

### 2.3.3 SAI de doble bus

Se diferencian dos configuraciones diferentes:

- SAI de doble bus básico:

Este diseño se utiliza principalmente para cargas que aceptan un suministro de entrada de doble canal; está formado por dos SAI cuyas salidas están conectadas a buses diferentes.

Normalmente, cada SAI es capaz de suministrar energía a la totalidad de la carga, por lo que son considerados como un conjunto formado por un SAI y otra redundante. En este caso, el SAI redundante posee una mayor disponibilidad mayor que los vistos anteriormente, ya que el fallo en un bus no afectará al otro bus.

El esquema aparece representado en la fig. 2.16:

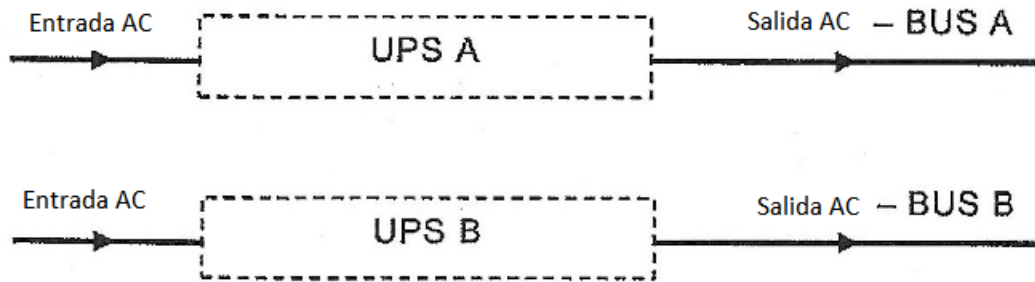


Figura 2.16: Esquema de un SAI de doble bus básico [5]

- SAI redundante de doble bus en stand-by:

Esta tecnología se utiliza para cargas que aceptan un único suministro de energía; para ello se utilizará un sistema de transferencia, encargado de que sólo se utilice uno de los dos buses, pudiendo hacer funcionar al SAI en pausa, en caso de que falle la primera.

En la fig. 2.17 se detalla esta configuración:

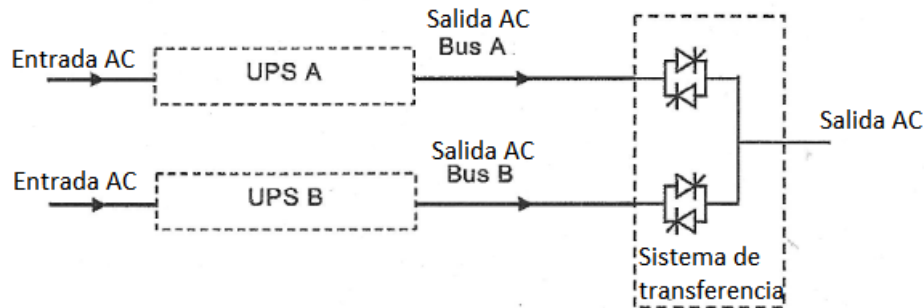


Figura 2.17: Esquema de un SAI redundante de doble bus en stand-by [5]



## 2.4 Sistemas de almacenamiento de energía

Uno de los aspectos más importantes de un SAI es el sistema de almacenamiento, ya que es el encargado de proporcionar energía cuando la red no está disponible. La elección de una tecnología determinada marcará el modo de operación del SAI, así como otros aspectos como su tiempo de vida, o la profundidad de descarga permitida.

### 2.4.1 Sistemas de almacenamiento de energía en un SAI

A lo largo del tiempo, se han desarrollado múltiples tecnologías para alcanzar mejores eficiencias energéticas y prestaciones diversas. No obstante, el estado de madurez de todas ellas es muy diferente, como se observa en la fig.2.18:

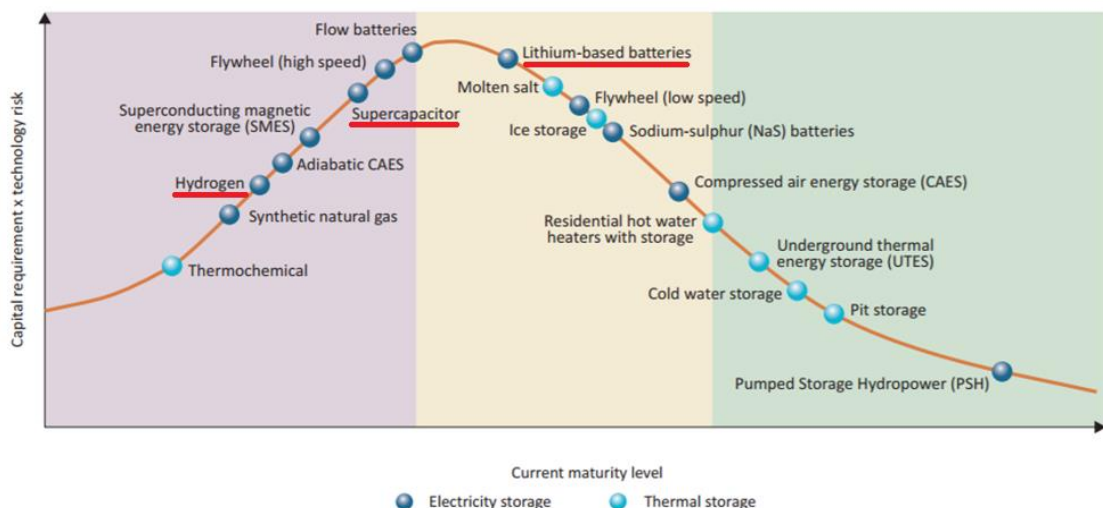


Figura 2.18: Estado de madurez de diferentes tecnologías de almacenamiento energético [7]

Los dispositivos que normalmente se utilizan en los SAI son: baterías electroquímicas, ultracondensadores y pilas de combustible. El precio de las mismas viene determinado por su desarrollo tecnológico: para la misma energía, serán más baratas las que más se han desarrollado. Enlazando lo observado en la fig. 2.18, se muestra un mayor desarrollo de las baterías electroquímicas, seguidos de los ultracondensadores y, por último, de las pilas de combustible.

No obstante, el estado de madurez no es el único parámetro que se tendrá en cuenta a la hora de elegir un sistema de almacenamiento adecuado; a continuación se describen las características principales de cada uno de ellos [8]:

- Baterías electroquímicas:

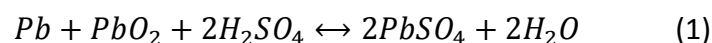
Constituyen el sistema clásico de almacenamiento de energía eléctrica en forma de corriente continua. Se basan en reacciones oxidación-reducción que se dan en los electrodos, separados por un electrolito.

En función del elemento que compone el ánodo y el que compone el cátodo, se diferencian diferentes tipos de baterías (Plomo-Ácido, Níquel-Cadmio, Ion-Litio, Azufre-Sodio, Metal-Litio, etc...). En este trabajo únicamente se describirán los de Plomo-Ácido y de Ion-Litio, debido a su uso en los SAI. A continuación se describen [9]:

o Plomo-Ácido:

Puede ser aireadas (Ca, Sb) o selladas (VRLA, AGM); el ánodo es plomo (Pb) y el cátodo es óxido de plomo (PbO<sub>2</sub>). El electrolito por su parte es ácido sulfúrico (H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>).

Siguen la siguiente reacción; el sentido de la misma determinará si la batería está cargándose o descargándose:



Siendo la carga la reacción que forma agua (de izqda. a dcha.), y la descarga en sentido inverso.

En la tabla 2.3 se muestran las ventajas y desventajas de esta tecnología:

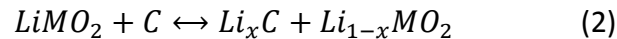
Ventajas	Desventajas
Bajo coste	Energía específica baja
Tecnología conocida	Potencia específica baja
Rápida accesibilidad	Ciclo de vida relativamente corto
Comportamiento aceptable a temperaturas bajas y altas	Mantenimiento elevado
Celdas de voltaje elevado (comparado con otras)	Amenaza medioambiental
Componentes de fácil acceso para su reciclaje	

Tabla 2.3: Ventajas y desventajas de una batería de plomo ácido [9]

o Ion-Litio:

Este tipo de baterías están formadas por celdas que utilizan compuestos con inserciones de litio como electrodos positivo y negativo. Durante las cargas y recargas de la batería, los iones de litio  $Li^+$  circulan entre los electrodos.

La reacción se describe a continuación:



El sentido de carga formará los compuestos  $Li_xC$  y  $Li_{1-x}MO_2$ ; el sentido de descarga es al inverso al de carga.

En la tabla 2.4 se muestran los aspectos negativos y positivos de este tipo de baterías:

Ventajas	Desventajas
Selladas, no requieren mantenimiento	Coste inicial alto
Larga vida útil	Necesidad de un circuito de protección
Amplio rango de temperatura de trabajo	Degradación a altas temperaturas
Baja tasa de auto descarga	Pérdida de capacidad cuando sobrecarga
Capacidad de carga rápida	Daños irreversibles en descargas bajo un límite
Alta energía específica y densidad de energía	
No presenta efecto "memoria"	

Tabla 2.4: Ventajas y desventajas de una batería de ion-litio [8]

- Pilas de combustible[8]:

Es un dispositivo que convierte la energía química de un combustible en energía eléctrica y térmica, a través de una reacción química en presencia de un oxidante, aire u oxígeno.

Para una mejor comprensión, en la fig.2.19 aparece una pila de combustible que utiliza hidrógeno como combustible:

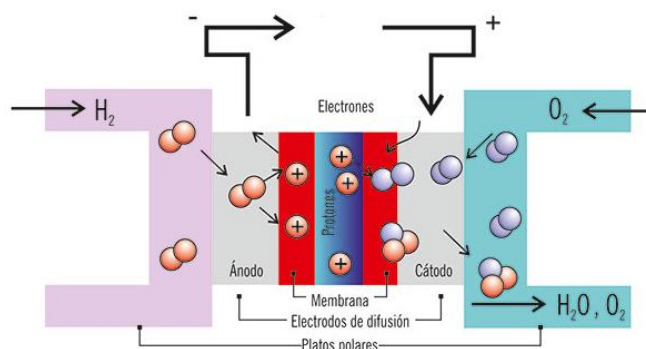


Figura 2.19: Pila de combustible de hidrógeno

Su funcionamiento es muy similar al de las baterías electroquímicas, generando una corriente continua a su salida. Se diferencian de estas en que requieren de un suministro continuo de combustible (normalmente hidrógeno, aunque también se pueden usar hidrocarburos como gas natural o metanol), y oxígeno/aire, para mantener la reacción. Esto puede ser una ventaja, ya que mientras se mantenga el suministro se va a seguir

suministrando energía eléctrica, pudiendo usarse en aplicaciones en las que se requieran consumos prolongados.

También son silenciosas y sus emisiones bajas.

Por contra, poseen un elevado coste; además la degradación del electrolito perjudica gravemente la vida útil del sistema.

- Ultracondensadores [8]:

Los ultracondensadores (también conocidos como supercondensadores), son dispositivos electroquímicos capaces de sustentar una densidad de energía muy alta, presentando una capacidad mucho mayor (del orden de miles de veces) que la de un condensador normal.

Para explicar este fenómeno, es necesario conocer el valor de la capacidad de un condensador, que sigue la fórmula siguiente:

$$C = k * \epsilon_0 * A/d \quad (3)$$

El valor de la capacidad aumenta conforme aumenta el valor del área superficial; por ello, los supercondensadores utilizan carbón activo en su construcción, que poseen valores de área superficial muy altos (pudiendo llegar a los 2500 m<sup>2</sup>/g). En la fig. 2.20 queda esquematizado constructivamente un ultracondensador:

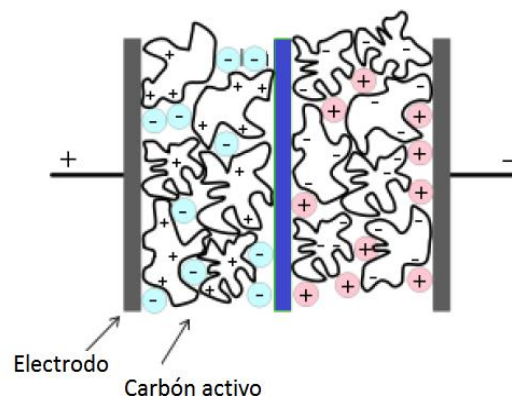


Figura 2.20: Esquema de un ultracondensador

Una vez descritas las distintas tecnologías de almacenamiento utilizadas en los SAI, se pasa a compararlas entre sí, de forma esquemática, en la tabla 2.5 que sigue a continuación:

Tecnología	Batería de plomo ácido	Batería de ion litio	Pilas de combustible	Ultracondensadores
Densidad de energía	Muy baja	Media	Muy baja	Muy baja
Rapidez de respuesta	Alta	Alta	Muy baja	Muy alta
Tiempo de descarga	Minutos, horas	Minutos, horas	S/combustible	Segundos, minutos
Banda de potencia	1-100 kW	1kW-1MW	0,02-2 MW	10-100 kW
Eficiencia	70%	90%	30-50%	90-95%
Tiempo de vida	Bajo	Alto	Bajo	Muy alto
Impacto medioambiental	Alto	Medio	Bajo	Muy bajo
Coste inicial	Medio	Alto	Muy alto	Muy alto

Tabla 2.5: Comparación sistemas de almacenamiento de energía para SAI [9]

Para un SAI se tendrán en cuenta, especialmente, aspectos como la rapidez de respuesta, el tiempo de vida y el coste; como se puede ver en la tabla 2.5, en estos aspectos destacan especialmente las baterías de ion litio y los ultracondensadores:

Los que mejores prestaciones presentan son los ultracondensadores; aunque poseen también un coste inicial mayor que las baterías, su tiempo de vida tan alto hace que se pueda llegar a rentabilizar la inversión. Por tanto, es aconsejable su uso, especialmente en aplicaciones en las que se demande un tiempo de respuesta rápido, funcionando durante poco tiempo.

#### 2.4.2 Configuraciones habituales en un SAI

Conocidos los sistemas de almacenamiento en un SAI, se pasa a explicar las conexiones más habituales entre ellos [5][10][11][12]:

- Sistemas de almacenamiento individuales:

Se utilizará una única tecnología de almacenamiento para proporcionar energía a las cargas. Este diseño es muy habitual debido a su coste y a su sencillez.

El esquema que se utiliza es el que se observa en la fig. 2.21:

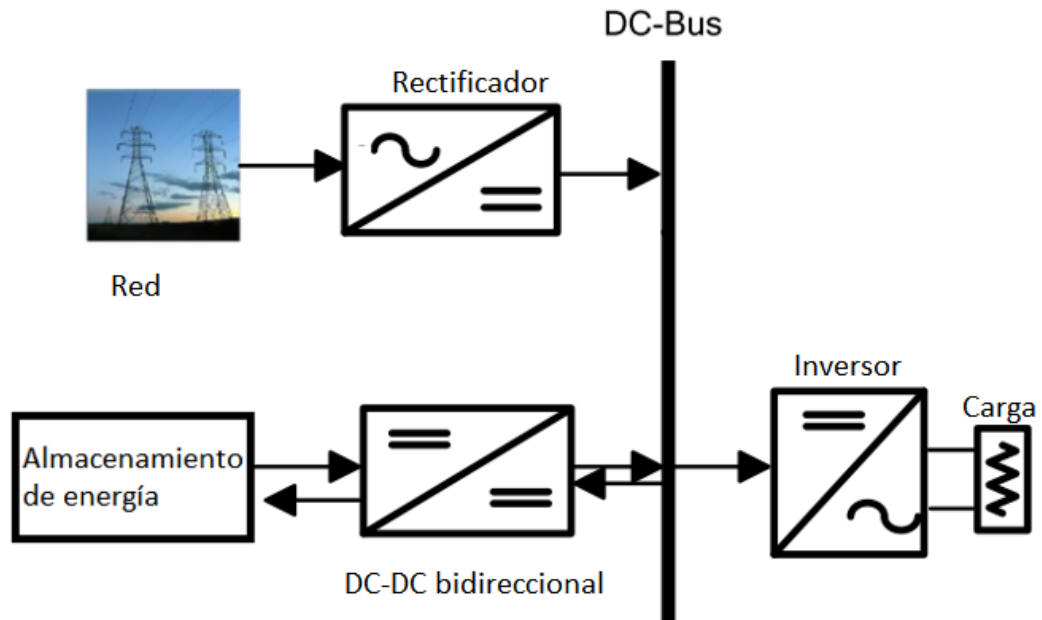


Figura 2.21: Conexión de un sistema de almacenamiento de energía a un SAI [6]

- Sistema de almacenamiento múltiple:

Tradicionalmente el almacenamiento se realizaba por medio de baterías electroquímicas, sin embargo recientemente esta tendencia ha desaparecido; el sistema de almacenamiento múltiple ha surgido debido a la aparición en los últimos años de ultracondensadores y pilas de combustible. Al agrupar distintas tecnologías, las desventajas de cada tecnología son compensadas con las fortalezas del resto, logrando un sistema más flexible y completo.

Son muchas las posibles combinaciones que se pueden dar, pero únicamente se pasará a describir las más utilizadas:

- Hibridación de batería electroquímica y ultracondensadores[5]:

En esta agrupación se tomarán baterías de plomo ácido, no obstante el análisis con baterías de ion litio se realizaría de forma análoga.

Como ya se ha visto, el tiempo de descarga es muy diferente en los dos casos; las baterías de plomo ácido normalmente duran entre 5-15min., mientras que los ultracondensadores hacen lo propio a los 5-15 s.

En aplicaciones donde no se requiere un tiempo de descarga de energía (durante el modo de almacenamiento de energía), entonces los ultracondensadores pueden utilizarse de forma individual.

En el resto de casos, la hibridación de estas dos tecnologías proporciona alta energía (debido a las baterías), y alta potencia (por los ultracondensadores).

A pesar de que, debido al estado de madurez de los ultracondensadores (véase fig. 2.18) su coste es todavía demasiado alto; sin embargo, al conectarse en paralelo con el banco de baterías, actúa ante variaciones de carga (transitorios en la demanda) y se reduce el estrés de las baterías, aumentando el tiempo útil de vida de estas.

En la fig. 2.22 se muestra dicha configuración:

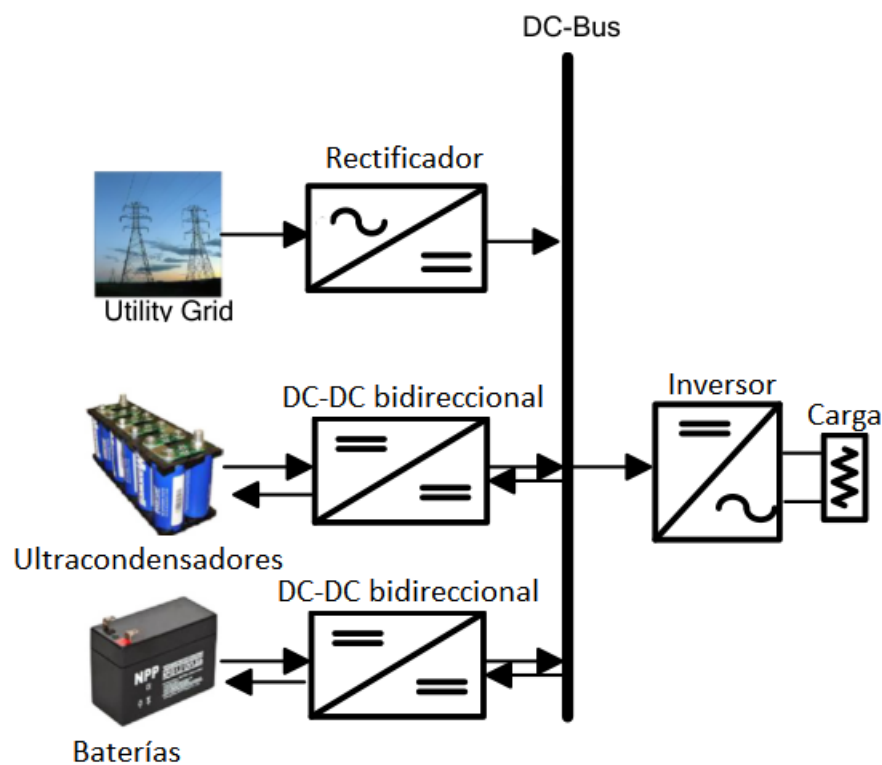


Figura 2.22: SAI con baterías y ultracondensadores [6]

- Batería electroquímica y pila de combustible [10]:  
 Los sistemas que incorporan diésel/gasolina están siendo reemplazados por pilas de combustible, que por tanto están adquiriendo más importancia.



Sin embargo, todavía hay aspectos por mejorar, como reducir el coste y mejorar la respuesta ante variaciones de carga. Para compensar estos defectos se utilizan baterías electroquímicas (generalmente de plomo ácido), que son baratas y presentan un comportamiento bueno ante transitorios de demanda. A continuación se proponen diferentes conexiones:

1) La fig. 2.23 muestra la primera configuración:

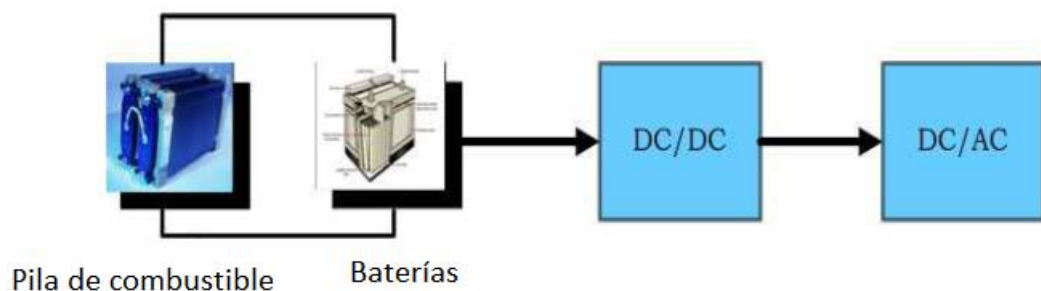


Figura 2.23: Conexión pila de combustible y batería electroquímica, opción 1 [11]

El banco de baterías actúa a ojos de la pila de combustible como un filtro, actuando ante los transitorios de demanda; además también se encarga de alimentar a parte de la carga en estado permanente.

La pila de combustible comparte el suministro de energía hacia el lado de carga. También actúa alimentando a las baterías cuando estas se descargan hasta una tensión menor a la de la pila de combustible.

La principal desventaja viene de las baterías, ya que la descarga se realiza de forma descontrolada.

2) En la fig. 2.24 se esquematiza la segunda alternativa:

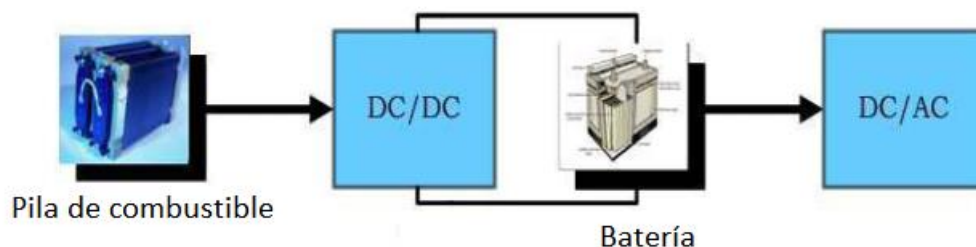


Figura 2.24: Conexión pila de combustible y batería electroquímica, opción 2 [11]

El convertidor DC-DC elevador únicamente actúa a la salida de la pila de combustible, por lo que el banco de baterías debe generar energía en alta

tensión y es nuevamente el encargado de actuar ante transitorios en el lado de carga, ya que está conectado directamente a la carga por medio del inversor.

Esta configuración tampoco controla la descarga de las baterías.

En las opciones 1 y 2, no hay mucha flexibilidad de los componentes del sistema, ya que los parámetros de los mismos pueden variar muy poco; puede encarecer el costo del sistema.

3) La fig. 2.25 muestra la tercera configuración posible:

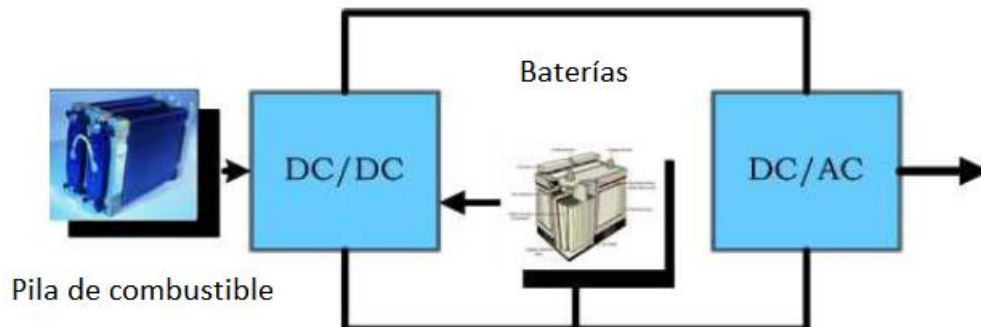
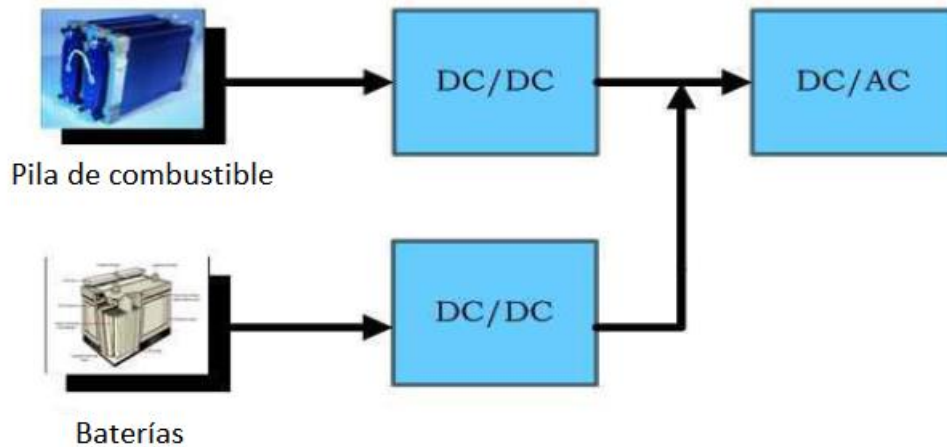


Figura 2.25: Conexión pila de combustible y batería electroquímica, opción 3 [11]

Esta arquitectura es una mejora de la primera opción, ya que ofrece un control para la carga y descarga de las baterías, y permite eliminar el rizado que proviene de la celda de combustible.

Para aplicaciones de tensiones altas se puede utilizar un elevador DC-DC extra, para elevar la tensión del bus DC.

4) La última opción se muestra en la fig. 2.26:



**Figura 2.26: Conexión pila de combustible y batería electroquímica, opción 4 [11]**

Esta opción consiste en la hibridación de la pila de combustible y las baterías. Presenta diversas ventajas, como buen control de la potencia de salida, o un buen reparto del suministro de energía. La carga y descarga de las baterías se controlan también.

Además, con un buen dimensionado del sistema, se puede alcanzar una buena respuesta dinámica.

Debido a las buenas prestaciones que ofrece este diseño, es éste el más utilizado si se deciden utilizar pilas de combustible y baterías.

### **2.4.3 Generación fotovoltaica en SAI**

Según [13], la generación fotovoltaica fue en 2016 la fuente que mayor capacidad de generación eléctrica añadió con respecto al año anterior ( 75 GW), como se observa en la fig. 2.27:

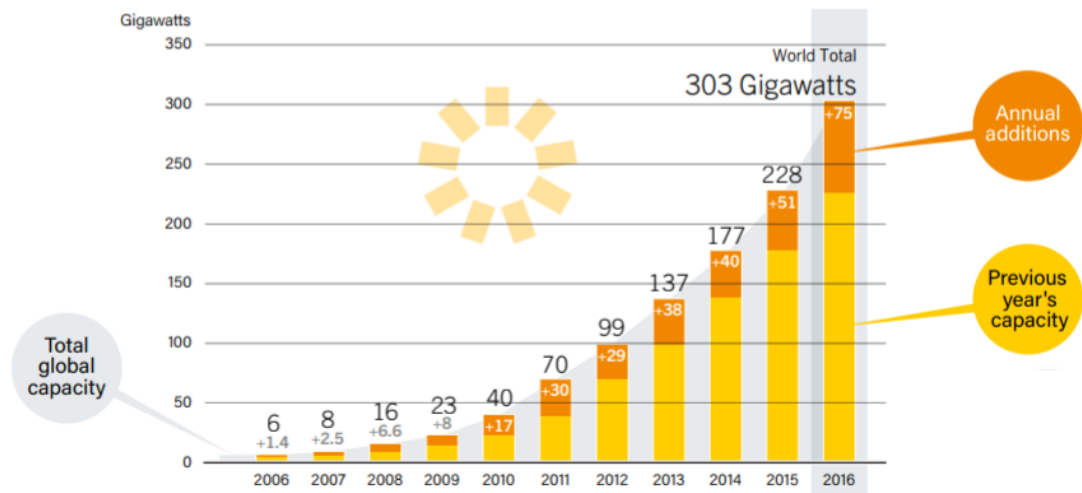


Figura 2.27: Evolución temporal de la generación fotovoltaica en el mundo [14]

Este crecimiento ha provocado precios cada vez menores de los módulos FV, haciéndola cada vez más competitiva. Por ello es considerada una de las tecnologías con mayor proyección en el futuro.

Aunque los SAI también estén integrados en otras energías renovables, como en eólica, debido al desarrollo de la generación fotovoltaica descrito a continuación se describe el papel de los SAI en FV:

Uno de los principales problemas de las energías renovables es que la potencia generada no es muy fiable, debido a la variabilidad del recurso. Para aumentar su fiabilidad y su calidad se suelen conectar a la red eléctrica; no obstante, ya se ha visto que en la red también se pueden producir fallos (perturbaciones eléctricas). Para aumentar la seguridad del recurso y mejorar la calidad de suministro, se considera la utilización de un SAI como solución al problema.

En la fig. 2.28 se muestra la conexión típica de un SAI en generación fotovoltaica, que incorpora la hibridación de baterías electroquímicas (plomo ácido) y ultracondensadores:

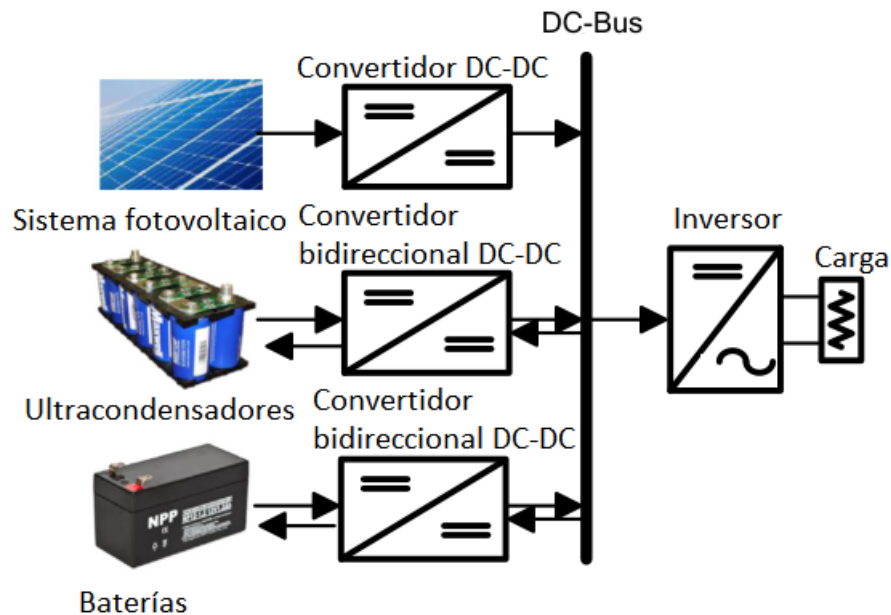


Figura 2.28 : Conexión SAI a generación fotovoltaica [5]

Al bus DC se conecta la generación fotovoltaica, a partir de un elevador DC-DC unidireccional, y los ultracondensadores y baterías, a partir de un convertidor DC-DC bidireccional, ya que pueden generar o absorber energía.

Se distinguen dos modos de operación:

- Modo normal: La generación fotovoltaica genera energía en DC, que a través de un inversor se alimentan a las cargas. En caso de que haya exceso de producción solar, la energía sobrante pasa a ser almacenada por el banco de baterías y los ultracondensadores.
- Modo backup: Este modo de operación se produce en caso de que la demanda del lado de carga sea superior a la generación solar. El modo de funcionamiento del sistema de energía híbrido queda explicado en 2.4.2.

Por tanto, el sistema FV con SAI presenta diversas ventajas con respecto al que no lo utiliza. Estas ventajas son, entre otras:

- Suministro de mayor calidad
- Continuación del suministro ante fallos puntuales en el campo solar

### **3. Estructura y control de la etapa de conversión de potencia**

#### **3.1 Introducción**

Para realizar el estudio del control, se ha optado por utilizar la estructura y las etapas de conversión electrónica típicamente utilizados en generadores fotovoltaicos conectados aislados, teniendo en cuenta que ambos generan energía en DC a una tensión relativamente baja (del orden de 150-250 V)[14].

El planteamiento que se utilizará en este apartado es el siguiente: en primer lugar se hará un estudio de los elementos que componen la estructura elegida. Seguidamente se elegirá la estructura óptima, teniendo en cuenta las especificaciones de partida, y se determinarán los valores de los distintos elementos de potencia que componen la estructura. Por último se determinarán los lazos de control que permitirán controlar las conmutaciones de los interruptores, así como sus frecuencias de corte.

Este estudio se centrará en el lazo de control de la tensión del lado de carga porque es el crítico para comprobar si el SAI cumple con la normativa relativa al THD [4].

#### **3.2 Estructura de conversión**

La etapa de conversión consiste en transformar la tensión continua que genera el sistema de almacenamiento de los SAI en alterna.

Como elementos de conversión eléctrica se utilizarán convertidores electrónicos, debido a sus altas eficiencias (normalmente del 96%, aunque pueden alcanzarse mayores).

##### **3.2.1 Elementos de los convertidores electrónicos**

Principalmente se utilizarán:

- Interruptores:

Para modificar el ciclo de trabajo del convertidor será necesario conmutar, por lo que se utilizarán interruptores; se distinguen dos tipos:

- o Interruptores mecánicos:

Estos interruptores no son adecuados para aplicaciones en las que es necesario conmutar, ya que al accionarse se producen rebotes, abriéndose y cerrándose de forma sucesiva, hasta que por fin acaba en la posición deseada, como se ve en la fig. 3.1:

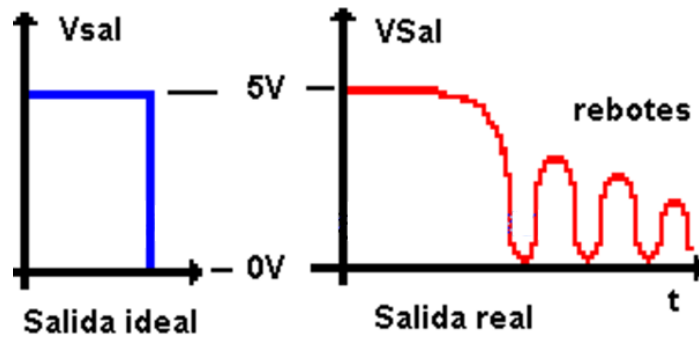


Figura 3.1: Rebote de un interruptor mecánico [15]

Este comportamiento modificará el funcionamiento del convertidor y por tanto se tratarán de evitar.

- Interruptores de estado sólido:

Se utilizarán interruptores de estado sólido de material semiconductores, cuyo comportamiento es aproximadamente ideal.

Se pueden clasificar teniendo en cuenta diferentes parámetros:

1) Controlabilidad

2) Características dinámicas:

Determina el tiempo y las pérdidas de energía durante el encendido y apagado.

3) Características estáticas:

Determina las reversibilidades de tensión y/o corriente, la tensión directa máxima, la corriente máxima y la tensión residual en conducción.

En la fig. 3.2 se muestra, a modo de ejemplo, el comportamiento de un diodo de potencia:

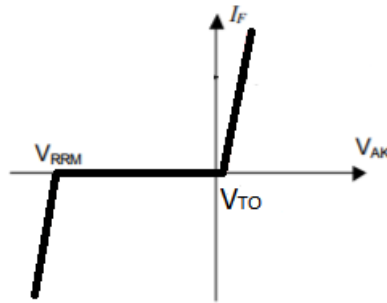


Figura 3.2: Característica estática de un diodo de potencia

Como se puede ver, trabaja de forma casi ideal; se enciende en  $V_{TO}$  (manteniéndose la tensión prácticamente constante a medida que aumenta la corriente) y se apaga (corriente cero) hasta una tensión negativa de valor  $V_{RRM}$ .

En este trabajo se utilizarán diodos e IGBT's, como ya se verá más adelante.

- Elementos pasivos:

Se utilizarán bobinas y condensadores, que proporcionan inercia al circuito y no consumen potencia activa.

En el caso de las bobinas, su comportamiento se puede asemejar al de una fuente de corriente, ya que cuando se desconecta el suministro de energía del sistema, estos se oponen a este cambio descargándose en forma de corriente.

De forma análoga ocurre con los condensadores, que generarán energía en forma de tensión.

### 3.2.2 Estructura elegida

Se realizará una estructura cuya aplicación es para aerogeneradores. Debe ser capaz de funcionar en modo backup durante 25 s., por lo que se propone la utilización de ultracaps.



Tensión ultracaps	Pot. Nominal lado carga	Frecuencia de conmutación	Frecuencia nominal lado carga	Tensión eficaz lado carga
200 V <sub>DC</sub>	2,5 kW	20 kHz	50 Hz	230 V <sub>AC</sub>

Tabla 3.1: Datos de diseño

Con ello, la configuración elegida es la formada por un convertidor elevador DC-DC (boost); a su salida se conectará un inversor de puente en H con modulación bipolar.

- Elevador:

Está formado por un solo diodo y un IGBT. El objetivo del estudio es comprobar el comportamiento del sistema de almacenamiento con la carga, por lo que no se requiere reversibilidad; no se utilizarán interruptores de tres segmentos. El circuito queda representado en la fig. 3.3:

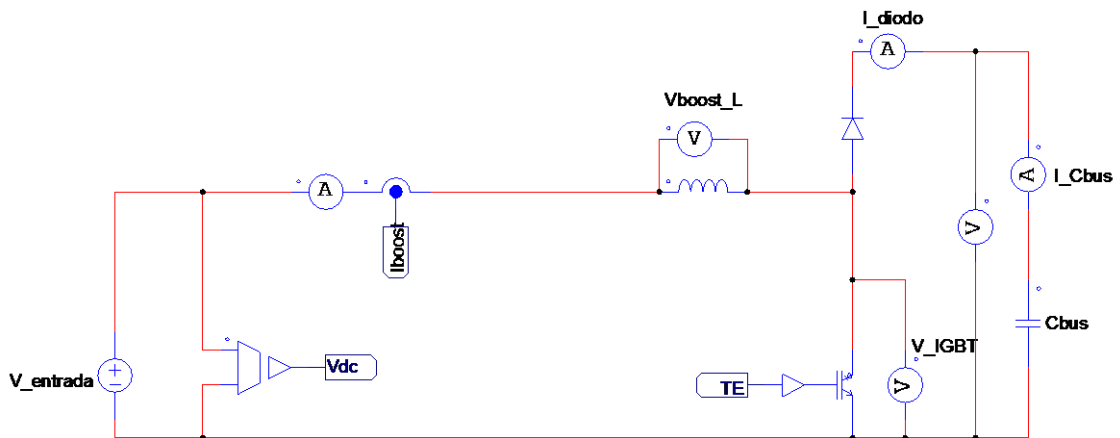


Figura 3.3: Esquema convertidor boost

El parámetro TE hace referencia a la salida del circuito de señal, que envía las órdenes de disparo a través del driver hasta la puerta del IGBT, controlando así el ciclo de trabajo del sistema. Dicho circuito se observa en la fig. 3.4:

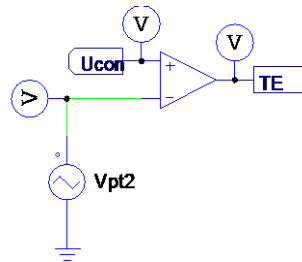


Figura 3.4: Circuito de señal convertidor boost

Se comparará la tensión de control ( $U_{con}$ ) con una onda triangular ( $V_{pt}$ ); el modo de funcionamiento es el que sigue:

- $U_{con} > V_{pt}$ :  $TE=1$  (ON)  $\rightarrow$  IGBT en conducción ( $V_{IGBT}=0$ )
- $U_{con} < V_{pt}$ :  $TE=0$  (OFF)  $\rightarrow$  IGBT en corte ( $V_{IGBT}=V_{ultracaps}$ )

La  $U_{con}$  se obtiene del lazo de control, que se explica en 3.2.3.

El dimensionamiento de los elementos pasivos (L y C) se realiza de la siguiente manera:

- Cálculo de L:

Siguiendo lo visto en [14], la bobina se dimensiona para el rizado de corriente máximo, que se da para un ciclo de trabajo  $d=0,5$ :

$$L \geq \frac{V_{ultracaps}}{4 * f_{rec.conm} * \Delta i_{L \text{ máx}}} \quad (4)$$

Se toma como valor límite de rizado de corriente en la bobina un 20% la nominal, con lo cual:

$$i_{L \text{ nom}} = \frac{P_{ent}}{V_{ultracaps}} = \frac{2500}{96} = 26.04A \quad (5)$$

Por tanto,

$$\Delta i_{L \text{ máx}} = \frac{20}{100} * i_{L \text{ nom}} = 5.2 A \quad (6)$$

El cálculo de la bobina queda:

$L \geq 0.48$  mH, tomando como referencia lo visto en [16], se elige una bobina de 2.5 mF.

○ Cálculo de C:

El condensador de bus se dimensionará desde el elevador (a su salida) y desde el inversor (a su entrada). En este apartado se dimensiona siguiendo este primer criterio:

Se toma un valor de  $\Delta V_c = 20V$  y una  $V_{bus} = 350V$ . El valor límite de  $V_{bus}$  se da a 330V, que va a permitir seguir proporcionando una tensión pico a la salida de 325V. En caso de que  $V_{bus}$  sea menor de 330V no podrá suministrar una tensión pico de 325V; la tensión de salida se deformará. Con esto:

$$C_{bus} \geq \frac{(I_{sal} * D)_{max}}{\Delta V_c * f_{con}} = \frac{40 * 0.6}{20 * 20.000} = 0.1mF \quad (7)$$

- Inversor:

Se utiliza un inversor de puente en H con modulación bipolar, que incorpora 4 células de conmutación, formadas por un IGBT y un diodo en antiparalelo.

En la fig. 3.5 se muestra el esquema del inversor:

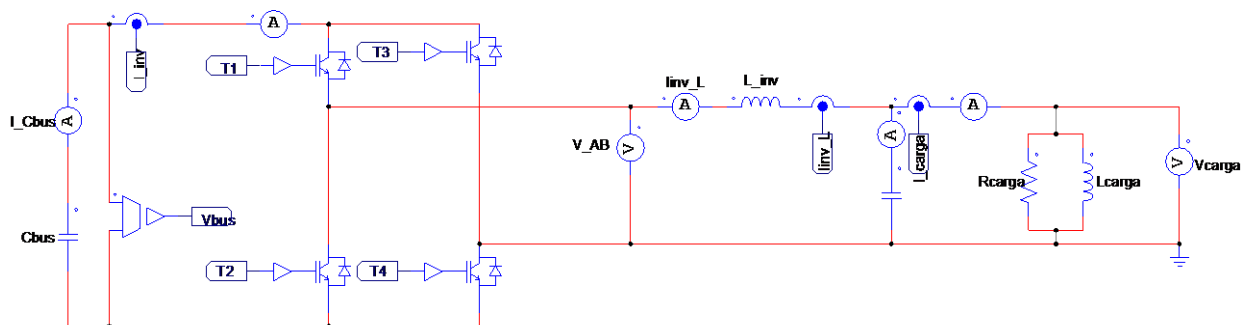


Figura 3.5: Esquema inversor puente en H

La modulación bipolar consiste en conmutar de forma complementaria cada rama, en función del circuito de señal. Con esta modulación, la respuesta ante armónicos es mala, ya que se duplica su amplitud, tanto para las familias de armónicos pares como para las impares; para eliminarlos es necesario utilizar inductancia muy grande o aumentar la frecuencia de conmutación, aumentando así las pérdidas de conmutación.

No obstante, esta modulación no introduce variaciones en modo común. Además, solo es necesaria una tensión de control.

El circuito de señal utilizado se muestra en la fig. 3.6:

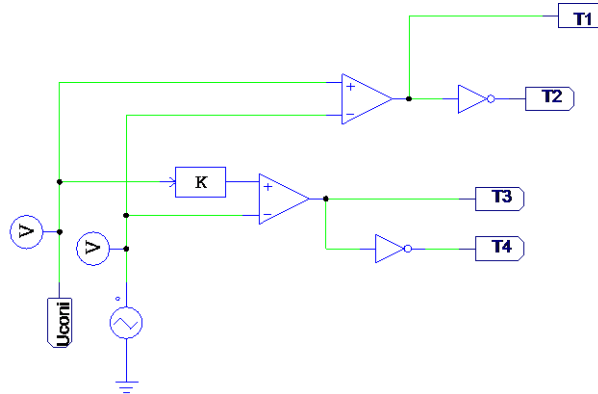


Figura 3.6: Circuito de señal inversor puente en H

El modo de funcionamiento consiste en la comparación de la tensión de control ( $U_{con}$ ) con la tensión triangular ( $V_{pt}$ ):

- $U_{con} > V_{pt}$   $\left\{ \begin{array}{l} T1=T4=1 \text{ (ON)} \\ T2=T3=0 \text{ (OFF)} \end{array} \right.$
- $U_{con} < V_{pt}$   $\left\{ \begin{array}{l} T1=T4=0 \text{ (OFF)} \\ T2=T3=1 \text{ (ON)} \end{array} \right.$

La  $U_{con}$  se obtiene del lazo de control, que se explica en 3.2.3.

Dimensionamiento de elementos pasivos:

- Condensador de bus:

La corriente máxima es de 19,3 A, se sobredimensiona a 20 A por seguridad:

$$C \geq \frac{V_{ac} \cdot I_{ac}}{\Delta V_c \cdot \omega \cdot V_{dc}} = \frac{325 \cdot 20}{20 \cdot 2 \cdot \pi \cdot 50 \cdot 350} = 2.9 \text{ mF} \quad (8)$$

Por tanto, teniendo en cuenta lo visto en [16], se calcula una  $C_{bus}$  de 3 mF.

○ Filtro LC:

Como se ve en la fig. 3.5, aprovechando la bobina que se debe de colocar a la salida del inversor, se le añade un condensador, actuando así como un filtro que atenúa los armónicos de la onda de salida del inversor.

Para dimensionar la inductancia se utiliza la información de [16], que utiliza una  $L=3.25$  mH.

Una vez calculada  $L$  de salida, se aprovechará para realizar el filtro LC paso bajo, permitiendo el paso de las señales con frecuencia inferior a la frecuencia de corte y filtrando las de frecuencia superior. El valor de la frecuencia de corte se calcula para una frecuencia de corte 10 veces superior a la frecuencia de la tensión de salida (50 Hz), quedando:

$$frec.corte = \frac{1}{2*\pi*\sqrt{L*C}} \quad (9)$$

Resolviendo la ec. 9, cuya única incógnita es  $C$ , queda:  $C=31.17\mu F$ .

Conocidos todos los parámetros del convertidor electrónico, es necesario conocer el control que se le realiza a éste, que determinará el valor de  $U_{con}$  y, en definitiva, el ciclo de trabajo del sistema completo.

### 3.2.3 Lazo de control

El control es una de las partes más importantes en el dimensionado de un sistema SAI, ya que de él dependen parámetros como el THD, la respuesta dinámica ante picos y transitorios, la corrección del factor de potencia o el control de la tensión y la corriente.

Se realizarán dos lazos de control en cascada, situados en el elevador y en el inversor, el lazo de control interno controlará la corriente, por razones de seguridad (evitando así sobrecorrientes), mientras que a el lazo de control externo controlará la tensión. En la fig. 3.7 se muestra el control que se va realizar:

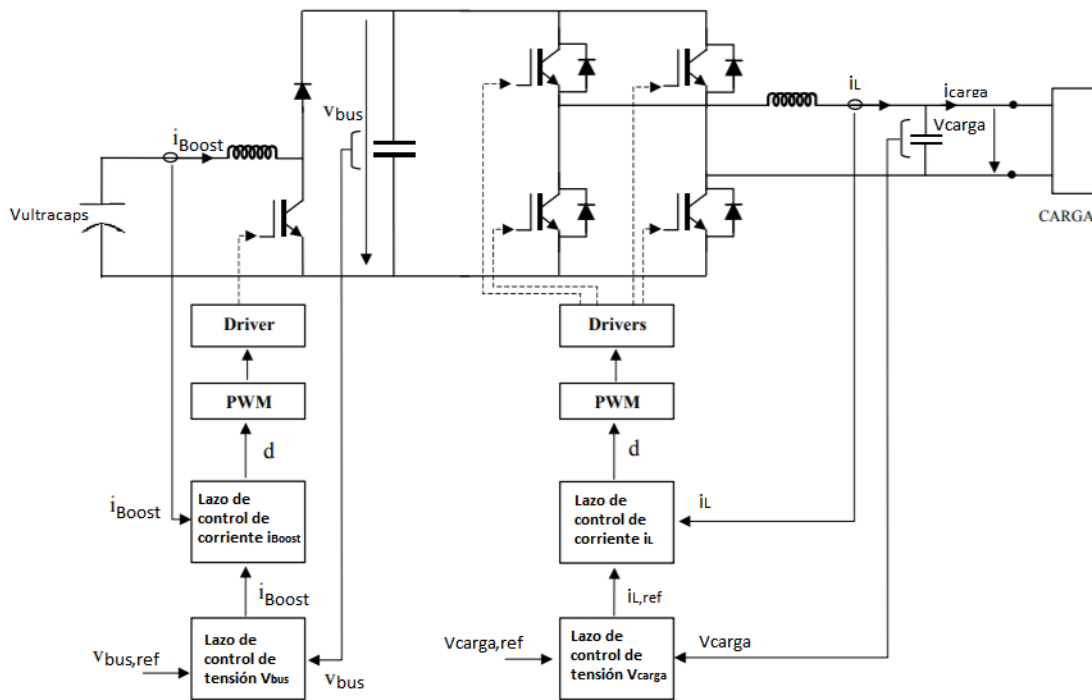


Figura 3.7: Esquema general lazos de control

Para simplificar los cálculos, se operará en el dominio de Laplace. En concreto:

- Elevador:

El objetivo es el control de la tensión en el bus de continua; para ello se utiliza un control interno en el que se controla la corriente que circula por la bobina, suministrada por los ultracondensadores.

Para una mejor comprensión, se seguirá el esquema de la fig. 3.7:

o Lazo interno de boost:

Se desea controlar el valor de la corriente de la bobina (a la salida de los ultracondensadores), que permitirá controlar la tensión en el condensador de bus. Su fórmula es:

$$I_{boost}(s) = \frac{1}{L \cdot s} * V_L(s) \quad (9)$$

El valor de  $V_L(s)$  es, por su parte:

$$V_{boost}(s) = V_{ent}(s) - V_{IGBT}(s) = V_{ultracaps}(s) - V_{bus}(s) * (1 - D) \quad (10)$$

Unificando las ec. (9) y (10) se obtiene el valor de la Planta del lazo:

$$I_{boost}(s) = \frac{1}{L*s} * (V_{ent}(s) - V_{bus}(s) * (1 - D)) \quad (11)$$

El diagrama de bloques queda representado en la fig. 3.8:

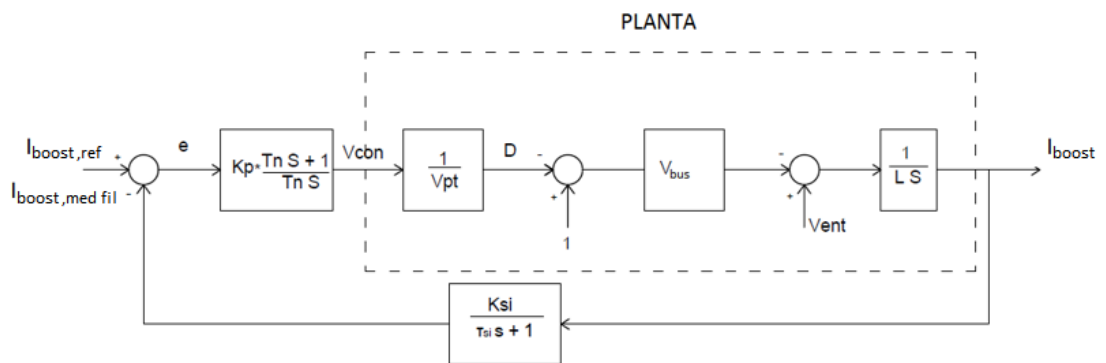


Figura 3.8: Diagrama de bloques lazo de corriente elevador

La función de transferencia en lazo abierto queda:

$$LA(s) = \frac{Kp*(Tn*s+1)*Vbus*Ksi}{Tn*s^2*Vpt*L*(\tau_{si}*s+1)} \quad (12)$$

El controlador PI se encarga de, a partir del error de corriente en la bobina, calcular la tensión de control, que se utilizará en el control de señal para controlar el ciclo de trabajo del circuito (véase fig. 3.4).

Como se puede ver en la fig. 3.8, las variaciones de  $V_{bus}$  y  $V_{ent}$  afectan a la corriente de salida; estas variaciones se pueden evitar si se realizan compensaciones a estos dos parámetros.

- Lazo externo de  $V_{bus}$ :

La tensión del condensador de bus, situado a la salida del elevador, permite controlar la tensión de entrada al inversor (encargado de la etapa DC/AC). Se calcula a partir de la corriente que circula por él, cuyo valor es:

$$I_c(s) = I_{diodo}(s) - I_{salida}(s) \quad (13)$$

El valor de la tensión del condensador es:

$$V_c(s) = \frac{1}{Cs} * I_c(s) \quad (14)$$

Unificando las ec. (12) y (13), se obtiene el valor de la Planta del lazo de tensión del elevador:

$$V_c(s) = \frac{1}{Cs} * (I_D(s)) = \frac{1}{Cs} * (I_L(s) * \frac{V_{entrada}}{V_{carga}} - I_{salida}(s)) \quad (15)$$

El diagrama de bloques del lazo de tensión queda representado en la fig. 3.9:

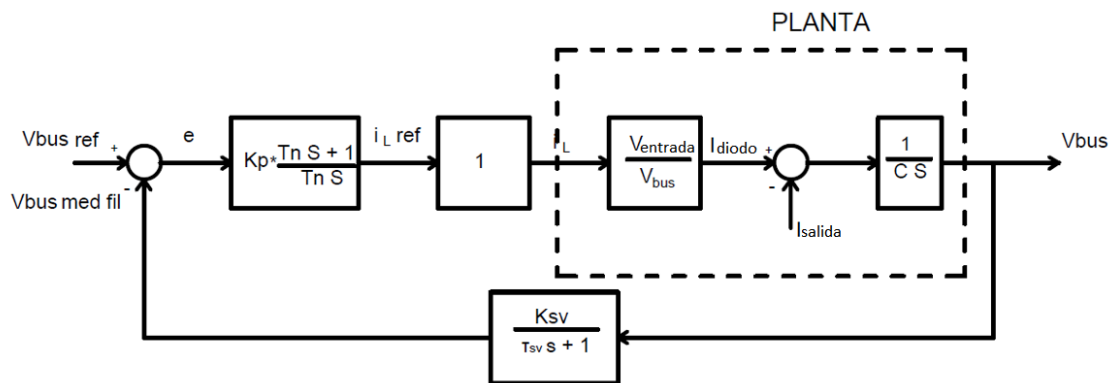


Figura 3.9: Diagrama de bloques lazo de tensión elevador

Los parámetros  $V_{bus}$  e  $I_{salida}$  poseen una relación no lineal que se puede evitar si se compensan ambos parámetros.

El valor del lazo abierto es:

$$LA(s) = \frac{Kp*(Tn*s+1)*V_{entrada}*Ksv}{Tn*s^2*V_{bus}*C*(\tau_{sv}*s+1)} \quad (16)$$

En el diagrama de bloques de la fig. 3.9 se ha aproximado el lazo de corriente interno como un 1, pero esta aproximación es solo aceptable cuando la frecuencia del lazo de corriente es mucho más rápido que el de tensión (típicamente se toma un valor de 10).



- Inversor:

El objetivo principal del inversor es controlar la tensión del lado de carga, que debe de simular el comportamiento de la red a ojos de la carga. Para conseguirlo se utiliza un control de corriente interno en el que se controla la corriente de la bobina de salida del inversor.

Para una mejor comprensión, se seguirá el esquema de la fig. 3.7:

o Lazo interno de  $I_L$ :

Se pretende calcular la corriente de la inductancia situada a la salida del inversor, utilizada como parte del filtro LC. Controlando esta corriente, se podrá controlar la tensión de salida (tensión de la carga). Se comienza calculando la tensión de la bobina, cuyo valor es:

$$V_L(s) = V_{AB}(s) - V_{carga}(s) = D * V_{bus}(s) - V_{carga}(s) \quad (17)$$

El valor que se pretende controlar es el de la corriente de la bobina, relacionado con la tensión de la misma por la siguiente ecuación:

$$I_L(s) = \frac{1}{Ls} * ( D * V_{bus}(s) - V_{carga}(s) ) \quad (18)$$

Unificando las ec. (15) y (16), se obtiene el valor de la planta del lazo de corriente interno:

$$I_L(s) = \frac{1}{Ls} * ( D * V_{bus}(s) - V_{carga}(s) ) \quad (19)$$

Una vez conocida la planta, se representa el sistema entero en la fig. 3.10:

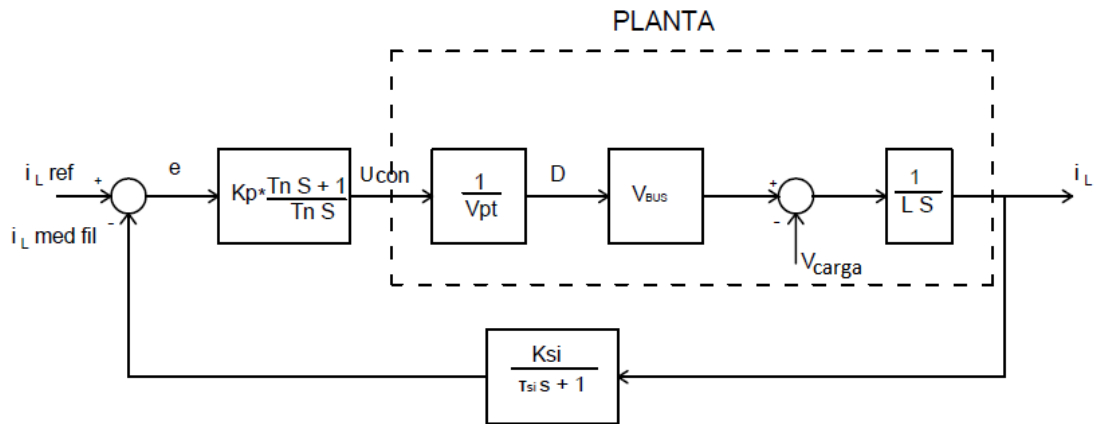


Figura 3.10: Diagrama de bloques lazo de corriente inversor

El valor de la función de transferencia en lazo abierto queda:

$$LA(s) = \frac{Kp*(Tn*s+1)*Vbus*Ksi}{Tn*s^2*Vpt*L*(\tau_{si}*s+1)} \quad (20)$$

Nuevamente será el PI el elemento encargado de corregir el error en la corriente de la bobina, calculando para ello la tensión de control que irá al circuito de señal.

- Lazo externo de Vcarga:

Este lazo se realiza para controlar la tensión del condensador de salida del inversor, que es igual a la tensión que ve la carga; esta tensión debe ser lo más parecida a la tensión de red.

El cálculo de la planta del lazo comienza con el cálculo de la tensión del condensador, de valor:

$$Vc(s) = \frac{1}{Cs} * Ic(s) \quad (21)$$

La corriente del condensador depende del valor calculado en la ec. (18), siendo:

$$Ic(s) = I_L(s) - I_{carga}(s) \quad (22)$$

A partir de las ec. (18) y (19) descritas previamente se obtiene la Planta del lazo de tensión:

$$V_c(s) = \frac{1}{C s} * (I_L(s) - I_{carga}(s)) \quad (23)$$

El diagrama de bloques del lazo de tensión externo se observa en la fig. 3.11:

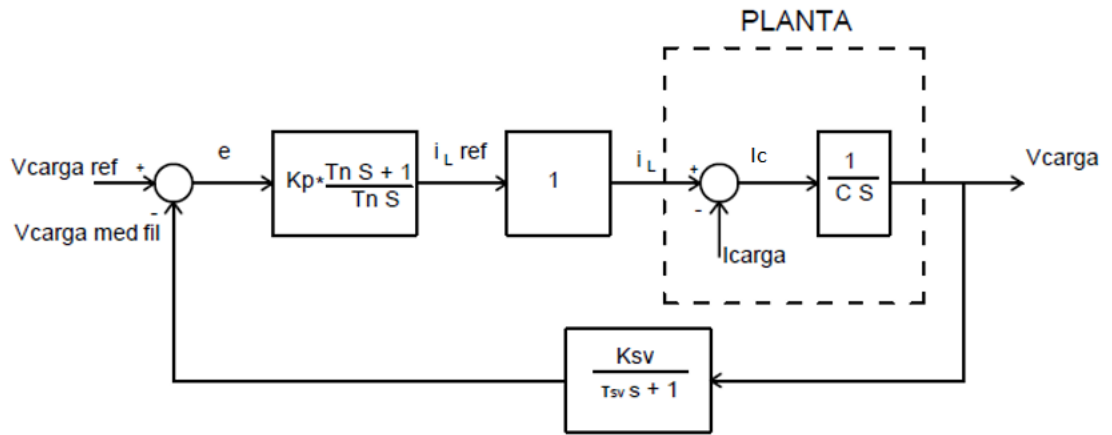


Figura 3.11: Diagrama de bloques lazo de tensión inversor

Se calcula el valor de la función de transferencia en lazo abierto, que queda:

$$LA(s) = \frac{Kp*(Tn*s+1)*Ksv}{Tn*C*s^2*(\tau_{sv}*s+1)} \quad (24)$$

En el diagrama de bloques de la fig. 3.11 se ha aproximado el lazo de corriente interno como un 1, pero esta aproximación es solo aceptable cuando el lazo de corriente es mucho más rápido que el de tensión (típicamente se toma una relación de frecuencias de 10).

Además, las frecuencias elegidas deben ser coherentes, de tal forma que el lazo interno sea lo suficientemente rápido para disminuir el error de Vcarga. No obstante, el lazo de corriente no puede ser tan rápido como se desee, teniendo en cuenta limitaciones prácticas, y que puede hacerse inestable (margen de fase negativo).

### 3.2.4 Determinación frecuencias de corte

- Elevador:

El lazo interno debe ser más rápido que el externo, ya que de no ser así el lazo interno no calcularía el valor de referencia de corriente adecuado en cada instante, produciendo error en el lazo externo. No obstante, el lazo de corriente no puede ser tan rápido como se desee, teniendo en cuenta limitaciones prácticas, no pudiendo ser mayor que la frecuencia de conmutación, y que puede hacerse inestable (margen de fase negativo).

El valor de la frecuencia de corte de tensión viene determinado por la frecuencia nominal de la red, que es de 50 Hz.

Para el cálculo de la frecuencia de corte de corriente, se utilizará como referencia el valor adoptado en [16]. Por ello, se utiliza una relación de 20, quedando una frecuencia de 1000 Hz.

Los valores tomados son, por tanto:

$f_{c,i}$	$f_{c,v}$
1000 Hz	50 Hz

Tabla 3.2: Frecuencias de corte elevador

Debido a la relación de 20 entre  $f_{c,i}$  y  $f_{c,v}$ , la aproximación adoptada en la fig. 3.9 es válida.

- Inversor:

Para el dimensionamiento de las frecuencias, primero se tratará de conseguir un valor aceptable de frecuencia para el lazo de tensión, y más tarde se buscará la relación adecuada para calcular la frecuencia del lazo de corriente. Todo ello se realizará con una carga inductiva formado por una R de 250  $\Omega$  y una L de 50 mH.

Una vez se calculen los valores de las frecuencias de corte de lazos de control del inversor y se tomarán como valores de referencia. En futuros apartados se comprobará su funcionamiento para distintas cargas (véase apartado 4.2 y 4.3).

Se considerará aceptable una frecuencia de corte cuando el error de amplitud sea menor del 5% y no se obtengan desfases de más de 5°.

- Para  $f_{cv\_inv}=200$  y  $f_{cc\_inv}=1000\text{Hz}$ :

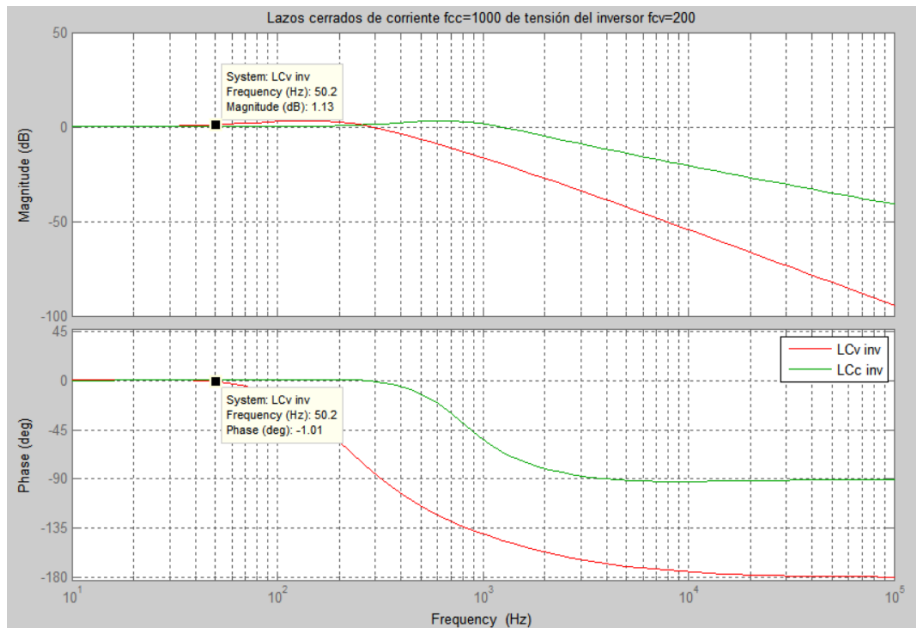


Figura 3.12: Bode inversor  $f_{cv\_inv}=200$  y  $f_{cc\_inv}=1000\text{Hz}$

Se observa que hay un 14% error en amplitud, por tanto con este error no se considera aceptable el seguimiento que realiza el lazo de tensión a la tensión de referencia.

- Para  $f_{cv\_inv}=400\text{Hz}$  y  $f_{cc\_inv}=2000\text{Hz}$ :

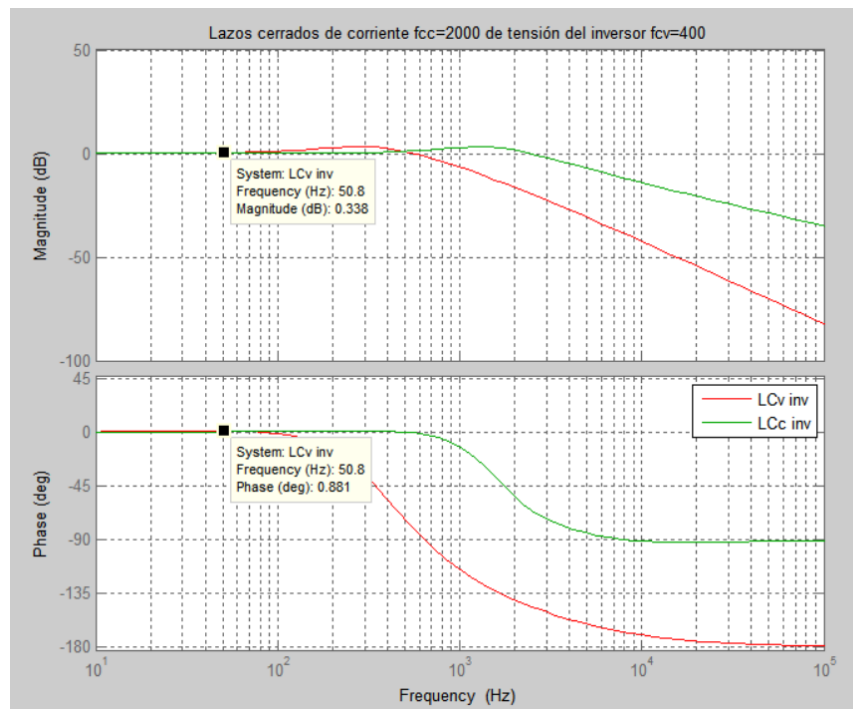


Figura 3.13: Bode inversor  $f_{cv\_inv}=400\text{ Hz}$  y  $f_{cc\_inv}=2000\text{Hz}$

Se obtiene un error en amplitud del 4%; es un valor aceptable, pero se va a aumentar a 500Hz para asegurarse un margen (sobredimensionamiento).

- Para  $f_{cv\_inv}=500\text{Hz}$  y  $f_{cc\_inv}=2500\text{Hz}$ :

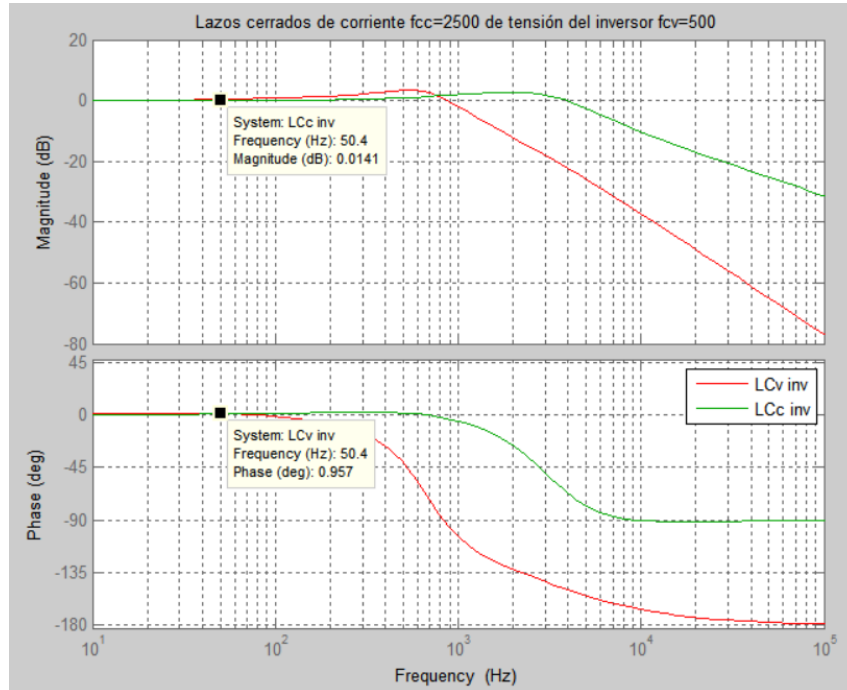


Figura 3.14: Bode inversor  $f_{cv\_inv}=500$  y  $f_{cc\_inv}=2500\text{Hz}$

La variación del error de amplitud es del 0.16 % y el desfase de 0. 95°, valores muy buenos según los parámetros marcados.

Una vez determinada la frecuencia de corte del lazo de tensión, se procede a calcular la frecuencia de corte del lazo de corriente mínima. Para determinar la frecuencia de corte del lazo de corriente necesitaremos que esta sea menor que la frecuencia de conmutación de 20kHz y a su vez tiene que ser más rapido que el lazo de tensión.

- Con  $f_{cv\_inv}=500\text{Hz}$  y  $f_{cc\_inv}=1000\text{Hz}$ :

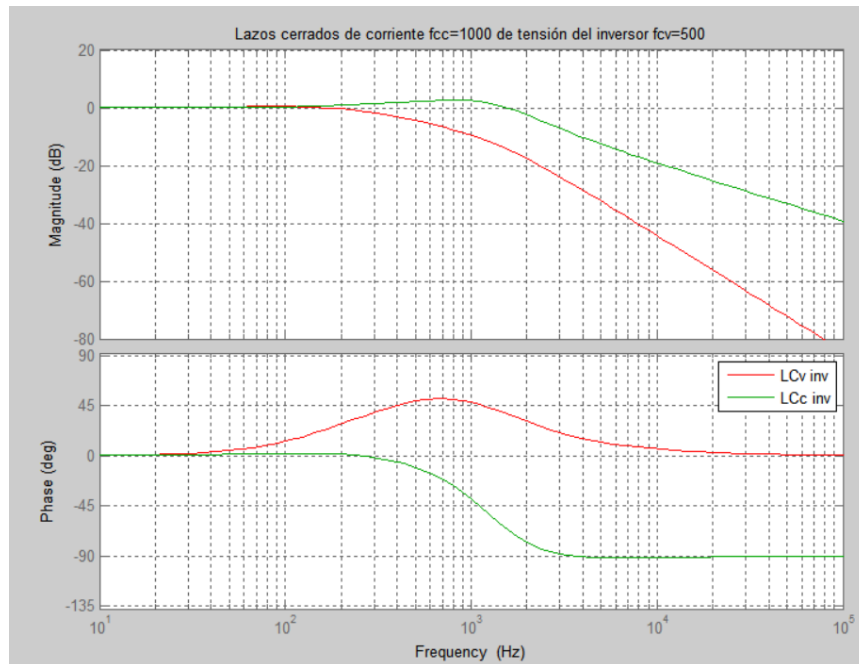


Figura 3.15: Bode inductor  $f_{cv\_inv}=500$  y  $f_{cc\_inv}=1000\text{Hz}$

Se obtienen valores del controlador del PI ( $K_p$  y  $T_n$ ) negativos, que no se pueden llevar a la práctica. Se descarta por tanto este valor y se buscará otro valor de frecuencia de corte del lazo de corriente mayor.

- Con  $f_{cv\_inv}= 500$  Hz y  $f_{cc\_inv}=1500$  Hz:

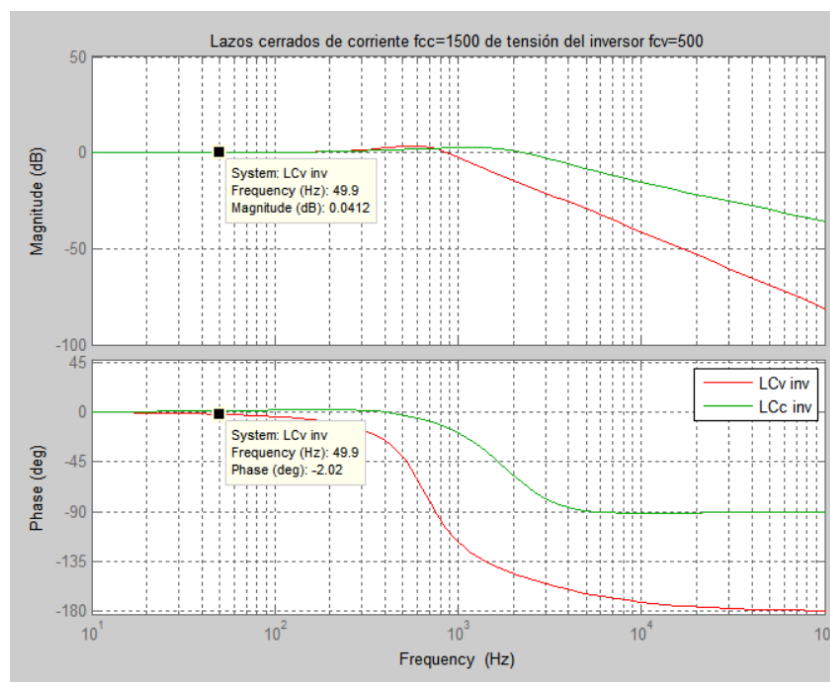


Figura 3.16: Bode inductor  $f_{cv\_inv}=500$  y  $f_{cc\_inv}=1500\text{Hz}$

El error de amplitud es muy bueno, de 0.5% y el desfase de -2°. Sin embargo, el valor de Tn es del orden de 5,2E12, es decir, un valor infinito a efectos prácticos, por lo que es imposible llevar a la práctica esta última opción.

Esto se debe al efecto provocado por el margen de fase deseado en el sistema, de 45°; éste se calcula a partir del margen de fase de la planta, del sensor y del controlador PI. Como con estos dos primeros no se alcanza el MF deseado, es necesario que el controlador PI aporte fase, sin embargo, el PI no puede hacerlo, como se muestra a continuación:

En la siguiente fórmula se muestra la función de transferencia del PI:

$$PI(s) = Kp * \frac{Tn*s+1}{Tn*s} \quad (25)$$

Como se puede ver, su efecto es el de un polo en el origen, que aporta -90° en el origen (0 Hz), y un cero simple, que aportará 90° a la frecuencia 1/Tn.

Por ello, el PI no puede aportar fase ya que inicialmente la fase será de -90° pero más tarde aportará otros 90°, quedando finalmente en 0°. Los 90° del cero simple se aportarán en este caso al inicio para eliminar lo antes posible el efecto del polo, siendo por tanto Tn infinito. Sin embargo, si Tn se hace infinito, la función de transferencia del PI quedará como la de un controlador proporcional (véase ec. 25), eliminando el efecto integral (que hace el error en permanente 0), algo que no tiene sentido si se ha utilizado un controlador PI. Queda descartada esta última opción.

Por tanto, los valores utilizados son:

f <sub>c,i</sub>	f <sub>c,v</sub>
2500 Hz	500 Hz

Tabla 3.3: Frecuencias de corte del inversor

A priori, la aproximación adoptada en la fig. 3.11 no tiene por qué ser aceptable, más adelante se simulará su comportamiento para verificarlo.



### 3.2.5 Validación estructura de conversión elegida

Para comprobar la validación del sistema, se procede a la simulación de la estructura propuesta, con los elementos de potencia y las frecuencias elegidas en el apartado previo.

Se tomarán como valores límites aquellos en los que el error de amplitud supere el 5%, o se produzcan grandes desfases. Lógicamente, tampoco se aceptarán sistemas inestables.

Los parámetros que faltan por calcular son:

- Cálculo de la carga:

La carga a utilizar será puramente resistiva (el estudio para cargas con factores de potencia diferentes se realizará más adelante), cuya salida sea la potencia nominal, de 2,5 kW. Este valor es de:

$$R = \frac{U^2}{P} \quad (26)$$

La tensión del lado de carga es de 230 Vac eficaces, por lo que  $R=21 \Omega$ ; se toma, por simplicidad, el valor de  $R=20 \Omega$ .

- Cálculo parámetros del PI:

El controlador PI queda definido a partir de los valores  $T_n$  y  $K_p$ :

El valor  $T_n$  corresponde a la relación entre la ganancia proporcional y la del controlador integral.

Se calcula a partir del margen de fase (MF), que se define como:

$$MF(^{\circ}) = fase(w_{corte}) + 180^{\circ} \quad (27)$$

El margen de fase proporciona información sobre la estabilidad del sistema ( $MF > 0$  estable), como  $K_p$  tampoco es conocido, se calcula el valor de  $K_p$  necesario para obtener un MF mayor que 0.

Una vez calculado, se pasa a calcular el otro parámetro desconocido,  $T_n$ .

Por su parte, el  $K_p$  corresponde a la ganancia del controlador proporcional; se calcula para que el valor de la función de transferencia, a la frecuencia de corte, valga 1; esto es:

$$|LA(j\omega_c)| = 1 \quad (28)$$

- Simulación:

El circuito a utilizar queda implementado en el programa de simulación PSIM, y queda reflejado en la fig. 3.17:

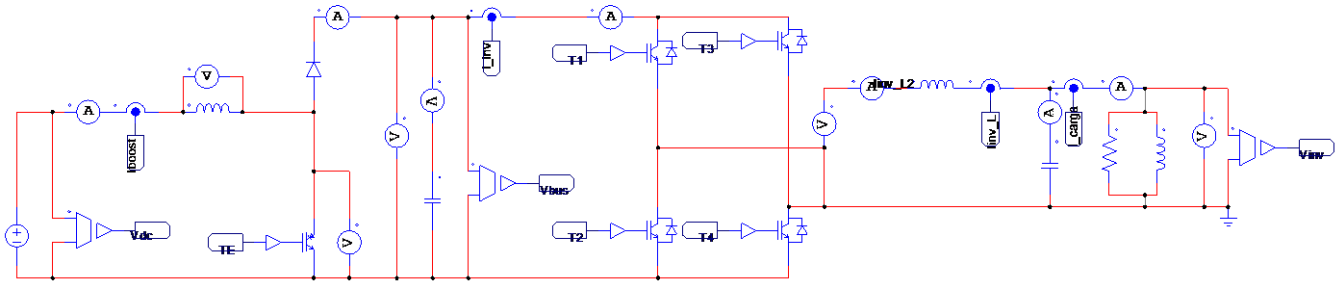


Figura 3.17: Implementación estructura de conversión completa

El circuito de señal, visto en las fig.3.4 y 3.6, recibe una tensión de control resultado de los lazos de control, que también se implementan en el programa PSIM, como se muestra en la fig. 3.18:

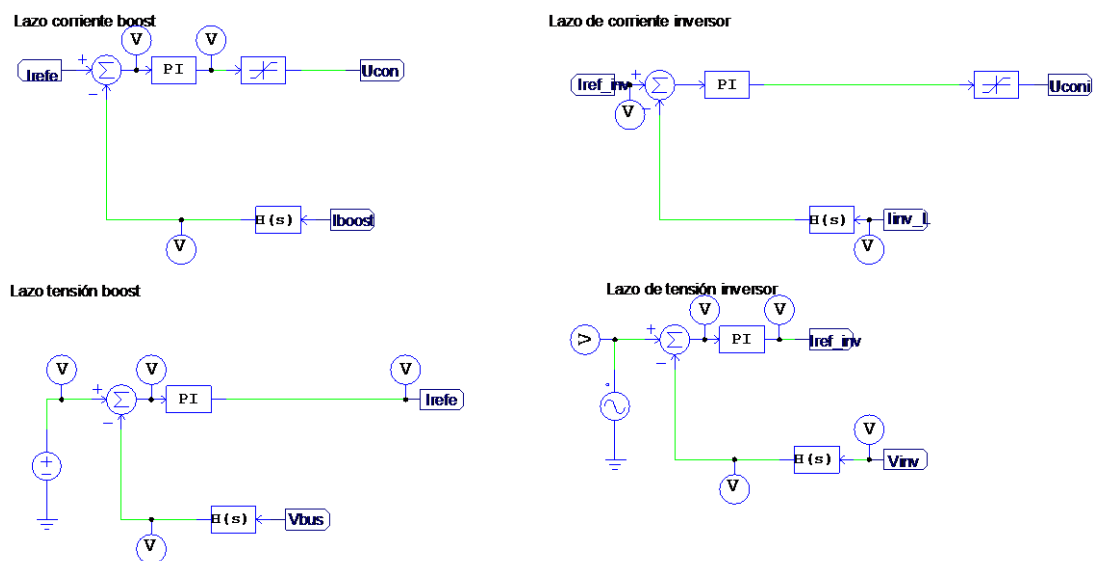


Figura 3.18: Circuito de control

Se utiliza el programa MATLAB para el cálculo de los parámetros del PI en los 4 lazos de control. Los resultados se muestran a continuación en la tabla 3.4:

	Kp	Tn	tau
elev_corr	0,03416	0,00067	0,796
elev_tens	1,6661	0,00318	3,18E-04
inv_corr	0,11103	0,00027	3,18E-05
inv_tens	0,06466	0,00029	3,18E-05

Tabla 3.4: Parámetros PI simulación validación

Los datos obtenidos se dimensionan en el circuito, y se simula durante 0.75 s. El resultado es el que se muestra en la fig 3.18:

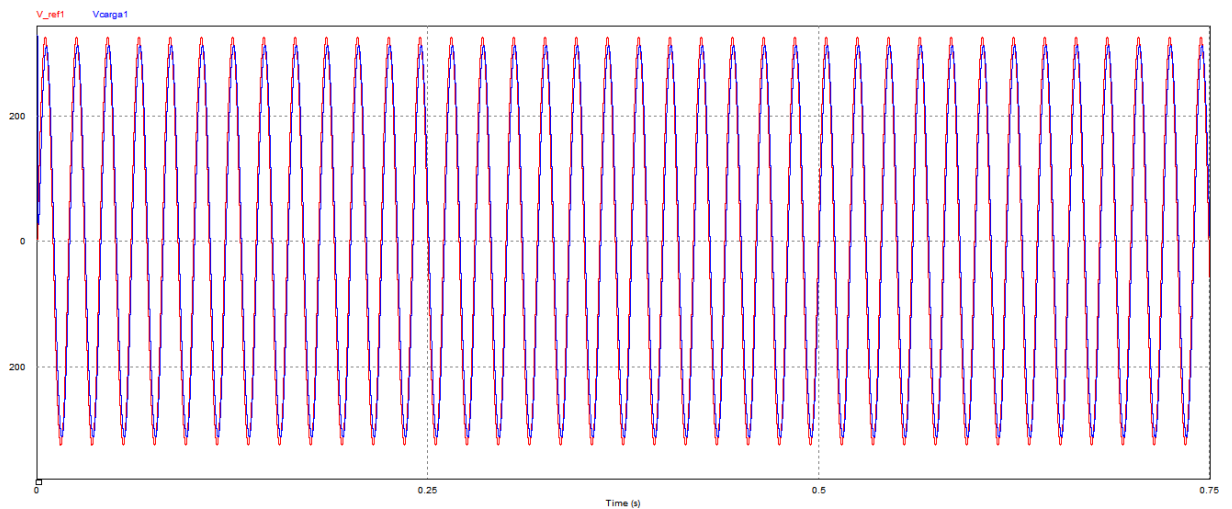


Figura 3.19: Simulación validación: Forma de onda tensión carga

Los valores se observan en la tabla 3.5:

E(%)	-0,27
Desfase	-5,74
f c_real	466,57
MF_real	132,27

Tabla 3.5: Valores obtenidos simulación validación

Se observa un error de amplitud prácticamente nulo (-0.27%) y un desfase de -5°. Estos valores son válidos para los requerimientos del sistema.

El sistema es estable, obteniéndose un MF muy grande; la  $f$  corte del lazo de tensión del inversor es de 466 Hz, algo menor a los 500Hz.

En definitiva, el sistema se vuelve algo más lento, pero cumple las especificaciones necesarias para validarlo.

## **4. Análisis de funcionamiento**

Una vez validado, se procede a analizar cómo responde ante distintas cargas. El procedimiento que se seguirá en este apartado es el siguiente: En primer lugar se determinará si es válida la aproximación del lazo de corriente interno (tanto en el elevador como en el inversor) como un valor unitario. Posteriormente se analizará su funcionamiento ante cargas lineales (inductivas y capacitivas) y no lineales, y se proporcionarán soluciones ante aquellas cargas que no cumplan con los requerimientos mínimos.

Se debe tener en cuenta que para el análisis de las cargas se ignorará el efecto de la corriente de la carga en el lazo.

### **4.1 Aproximación lazo de corriente interno**

La aproximación del lazo de corriente como un 1 no se puede considerar aceptable, ya que si el este lazo no es lo suficientemente lento, el lazo de corriente no será capaz de comportarse como un valor instantáneo a ojos del lazo de tensión.

- Elevador:

A partir de los valores de las frecuencias de corte utilizados en 3.2.4, presumiblemente la aproximación parece buena; no obstante se simula su comportamiento en MATLAB, cuyos resultados se observan en la fig. 4.1:

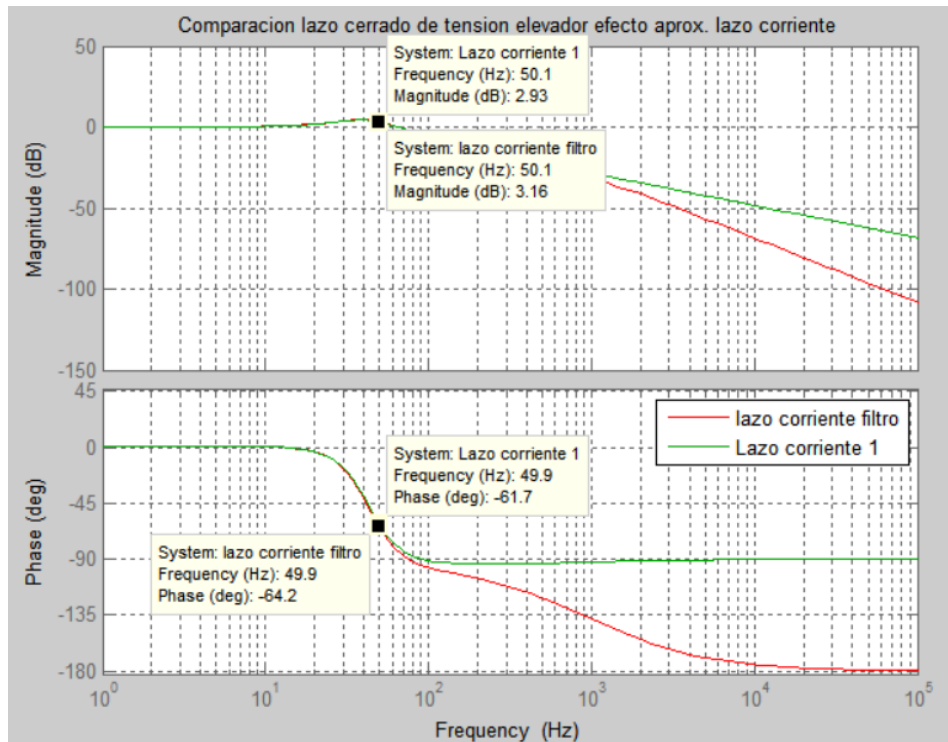


Figura 4.1: Bode lazo de tensión elevador con y sin aproximación lazo de corriente

En un primer vistazo se observa cómo los valores del Bode de ambos lazos difieren a frecuencias cercanas a los 100 Hz, siendo hasta entonces muy parecidos, casi idénticos.

Falta por conocer qué efecto tiene esa diferencia a partir de los 100 Hz; sin embargo, la frecuencia de corte del lazo de tensión del elevador es de 50 Hz, y a frecuencias mayores no trabajará, por lo que no le afectará.

La diferencia que se da a 50 Hz es de:

- Amplitud: Diferencia de 0.23 dB, lo que corresponde a una diferencia del 2.68%
- Desfase: De 2.5°

Ambos valores se consideran aceptables, dentro de un rango de confianza medio y por tanto se acepta la aproximación.

- Inversor:

De forma análoga a lo realizado en el elevador, se procede a realizarlo en el inversor, cuyos resultados se muestran en la fig. 4.2:

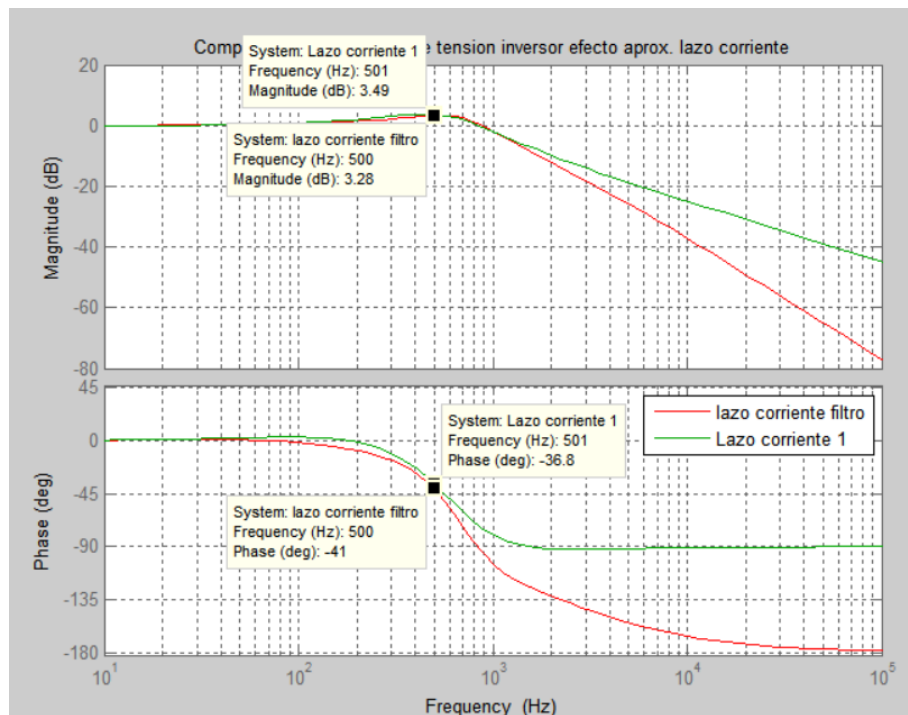


Figura 4.2: Bode lazo de tensión inversor con y sin aproximación lazo de corriente

En la línea de los observado en el elevador, nuevamente se observa que el bode de los dos lazos es muy parecido hasta una frecuencia dada (1000Hz). No obstante, hay diferencias; a pesar de que la amplitud hasta los 1000 Hz es casi idéntica, se muestran errores a frecuencias cercanas a la tomada como límite.

Como la frecuencia de corte del lazo de tensión del inversor es de 500 Hz, las grandes diferencias de fase no tienen por qué afectar al funcionamiento del sistema; se deben calcular las diferencias entre ambas a 500 Hz en cuanto a:

- Amplitud: Se observa una diferencia de 0.21 dB, un 2.44% de diferencia.
- Desfase: La diferencia observada es de 4.2°.

En este caso, la aproximación es muy similar a la del elevador; siendo valores no excesivamente altos para las frecuencias de trabajo, pudiéndose aceptar la aproximación.

Por tanto, es válida la aproximación del lazo como un valor unitario, no obstante en las líneas de trabajo siguientes se considerará que el lazo de corriente es un filtro de primer orden para tratar de asemejarlo lo máximo posible a la realidad.

## 4.2 Ensayo ante cargas RL serie

A continuación se va a simular el comportamiento de la estructura de conversión ante distintas cargas inductivas en serie con cargas resistivas.

Las potencias activas son de 2500W para  $R=20\Omega$ , de 250W para  $R=200\Omega$  y de 25W para  $R=2000\Omega$ . Además, se toman tres valores de F.P. orientativos: 0.7, 0.9 y 1 (carga puramente resistiva).

El procedimiento se realiza de forma análoga al realizado en 3.2.4; se recalculan los parámetros del controlador PI ( $K_p$  y  $T_n$ ) para cada carga escogida. Al utilizar dos programas de cálculo diferentes, se guardan los valores de desfase y de error de amplitud de ambos.

Los resultados se muestran en la tabla 4.1:

	R	20	200	2000	20	200	2000	20	200	2000
	cos(phi)	0,7			0,9			1		
	L	0,062	0,624	6,240	0,131	1,310	13,100	$\infty$	$\infty$	$\infty$
MATLAB	E(%)	-9,840	1,040	2,170	-5,040	1,578	1,860	-0,27	1,92	2,05
	Desfase	-4,050	-0,172	0,331	5,520	-0,221	0,330	-5,74	-0,25	0,32
	f c_real	466,350	501,590	501,790	455,510	501,700	500,370	466,57	505,50	505,95
	MF_real	75,000	48,000	45,000	74,000	48,000	45,000	132,27	119,90	118,67
PSIM	E(%)	-9,760	1,079	2,539	-4,903	1,660	2,853	-0,40	2,33	2,46
	Desfase	-4,5	0	0	4,5	0	0,9	-5,40	0	0

Tabla 4.1: Parámetros obtenidos ante distintas cargas RL

Utilizando las especificaciones de validación utilizadas en 3.2.4, se puede ver que a potencia activa nominal ( $R=20$ ), a mayor potencia reactiva, peor respuesta.

En concreto, hay dos casos en los que el sistema no cumple con los requerimientos mínimos, estos casos son:

- $R=20\ \Omega$  y  $L=0.062\ H$ : El error de amplitud es del 10%, el doble que el mínimo.
- $R=20\ \Omega$  y  $L=0.131\ H$ : Aunque el error sea considerablemente menor al anterior, de un 5.04%, tampoco cumple con lo establecido.

Para entender qué está ocurriendo, se debe recordar el bode del lazo de tensión externo del inversor (véase fig. 3.10). En ella, se puede ver cómo  $i_c=i_L-i_{carga}$ . Sin embargo, al no considerarse el efecto de la corriente de carga, se está aproximando que  $i_c=i_L$ ; se deducen los siguientes problemas:



En primer lugar, el error en amplitud: Queda claro que cuanto menor es el valor resistivo, mayor será la corriente de carga; por tanto, es mayor el error amplitud. En segundo lugar, teniendo en cuenta el efecto inductivo, el error de desfase. Para una mejor comprensión, se observa el valor de las corrientes en estacionario, que es:

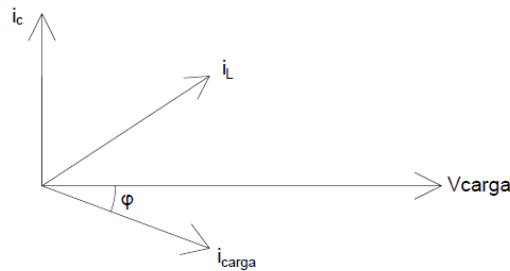


Figura 4.3: Esquema vectorial corrientes del inversor

Al ignorar el efecto de  $i_{carga}$ , la aproximación  $i_c = i_L$  únicamente será válida cuando el ángulo  $\varphi$  es pequeño; si éste es grande, entonces  $i_L$  estará más retrasado con  $i_c$ , haciendo que haya más desviación en  $V_{carga}$  y por tanto cometiendo más error de desfase.

### 4.3 Ensayo ante cargas RC paralelo

Se procede a realizar los mismos ensayos que los realizados en el apartado 4.2, la única diferencia radica en que el factor de potencia en este apartado es capacitivo.

Siguiendo el procedimiento realizado para el resto de cargas, se calculan los resultados, que quedan reflejados en la tabla 4.2:

	R	20	200	2000	20	200	2000	20	200	2000
	cos(phi)	0,7			0,9			1		
	C	1,62E-04	1,62E-05	1,62E-06	7,71E-05	7,71E-06	7,71E-07	0	0	0
MATLAB	E(%)	11,81	3,06	2,16	5,16	2,46	2,12	-0,27	1,92	2,05
	Desfase	-7,73	-0,36	0,31	-6,68	-0,31	0,32	-5,74	-0,25	0,32
	f c_real	144,42	363,58	485,93	199,10	421,10	559,19	466,57	505,50	505,95
	MF_real	117,53	116,25	118,23	117,83	118,28	109,00	132,27	119,90	118,67
PSIM	E(%)	11,50	3,44	2,76	5,10	2,77	2,46	-0,40	2,33	2,46
	Desfase	-8,10	0	0	7,20	0	0	-5,40	0	0

Tabla 4.2: Parámetros obtenidos ante distintas cargas RC

Los resultados reflejan que, nuevamente, se obtienen los peores valores cuando se conecta la carga  $R=20 \Omega$ , cuya potencia asociada es de 2.5kW.

En concreto, hay dos situaciones en las que se superan los límites aceptables, ya dimensionados en el apartado 3.2.4:

- $R=20 \Omega$  y  $C=1.62E-4$  F: El error obtenido es el más grande obtenido hasta el momento (11,81%). El desfase también es relativamente alto ( $-7.7^\circ$ ).
- $R=20\Omega$  y  $C=7.71E-5$  F: En este caso el error de amplitud que, aunque tampoco sea aceptable, es mucho menor al primero, de 5.16%; no obstante, también posee un desfase alto.

El comportamiento de las cargas es análogo al visto en el apartado 4.2.

#### 4.4 Cargas no lineales

El análisis de las cargas no lineales se realizará a nivel teórico, realizando las simulaciones en el apartado 5.

Teniendo en cuenta el bode del lazo de tensión externo del inversor (véase fig. 3.10), al sensar la tensión de carga se comprueba que éstos poseen componentes impares múltiplos de la frecuencia de la red (150,300,450 Hz...) produciendo un error en el lazo distorsionado con respecto al que se obtiene con cargas lineales.

Estos armónicos deformarán la onda de tensión (con respecto a la de la red), pudiendo provocar un mal funcionamiento en las cargas. Por tanto, en los ensayos prácticos deberá medirse el nivel de armónicos (THD) de la tensión de salida, marcado por la normativa, y establecer soluciones en caso de que éste sea demasiado alto.

#### 4.5 Soluciones a cargas problemáticas

Ante los problemas surgidos en las simulaciones realizadas en los apartados 4.2 y 4.3, se proponen 2 alternativas para mejorar las prestaciones del lado de carga:

- Control adaptativo:

En las cargas lineales críticas se producen grandes desfases (errores de seguimiento) y/o el error de amplitud supera el 5% permitido. El MF que se ha considerado para los cálculos es de  $45^\circ$ ; la solución se basa en disminuir este MF, que se traduce en modificar los parámetros del PI. Al disminuir el MF, el valor de  $K_p$  no queda tan limitado, permitiendo obtener sistemas más flexibles, mejorando la respuesta del sistema.

Por tanto, el control adaptativo consistiría en ir modificando los parámetros del PI en función de la carga. Se decide llevar a cabo esta alternativa, recalculando los parámetros de las cargas críticas de los apartados 4.2 y 4.3:

- Cargas RL:

Los parámetros calculados son los que siguen a continuación:

	R	20	200	2000	20
	cos(phi)	0,7			
	L	0,062	0,624	6,240	0,131
RECALCULAR (MF=25)	Kp (inv. de V)	0,0647			0,064
	Tn (inv. de V)	2,868E-04			2,868E-04
	E(%)	-6,06			-2,69
	Desfase	-2,82			-3,03
	fc_real	474,32			466,26
	MF_real	54			54
RECALCULAR (MF=10)	Kp (inv. de V)	0,0438			
	Tn (inv. de V)	1,62E-04			
	E(%)	-4,68			
	Desfase	-2,81			
	f c_real	477,89			
	MF_real	39			

Tabla 4.3: Control adaptativo de las cargas RL críticas

- Cargas RC:

Los nuevos parámetros se muestran en la tabla 4.4:

	R	20	200	2000	20
	cos(phi)	0,7			0,9
	C	1,62E-04	1,62E-05	1,62E-06	7,71E-05
RECALCULAR (MF=25)	Kp (inv. de	0,0647			0,0647
	Tn (inv. de v)	2,87E-04			2,87E-04
	E(%)	8,5			4,2
	Desfase	-4,1			-3,78
	f c_real	174,6			236,2
	MF_real	103,23			107,146
RECALCULAR (MF=10)	Kp (inv. de	0,04			
	Tn (inv. de v)	1,62E-04			
	E(%)	7			
	Desfase	-3,1			
	f c_real	189,71			
	MF_real	98,15			

Tabla 4.4: Control adaptativo de las cargas RC críticas

Por razones de seguridad, se decide no recalcular los parámetros para MF menores a 10<sup>0</sup>, ya que el margen para que el sistema se haga inestable es muy pequeño.

Por tanto, el control adaptativo es una buena solución para mejorar el comportamiento ante cargas críticas, sin embargo para R=20 Ω y C= 1,62E-4, no se llega a alcanzar un error de amplitud menor al 5% requerido. Esta solución no se puede llevar a cabo en nuestro sistema porque no se asegura un control fiable para la totalidad de cargas.

- Compensación de la corriente de carga:

En el lazo de tensión del inversor la corriente de carga se comporta como una perturbación, por lo que se puede compensar, evitando así errores en el seguimiento de la tensión.

Se puede compensar de dos maneras:

- Midiendo a través de un sensor o transductor
- Estimando su valor a partir de la corriente en la bobina y la tensión de salida del inversor, valores que ya están medidos para la operación de los lazos de control.

Se elige, por razones económicas y de sencillez esta segunda opción.

El bloque que relaciona la corriente con la tensión de carga quedará colocado a continuación del controlador PI y del lazo de corriente como se muestra en la fig. 4.4:

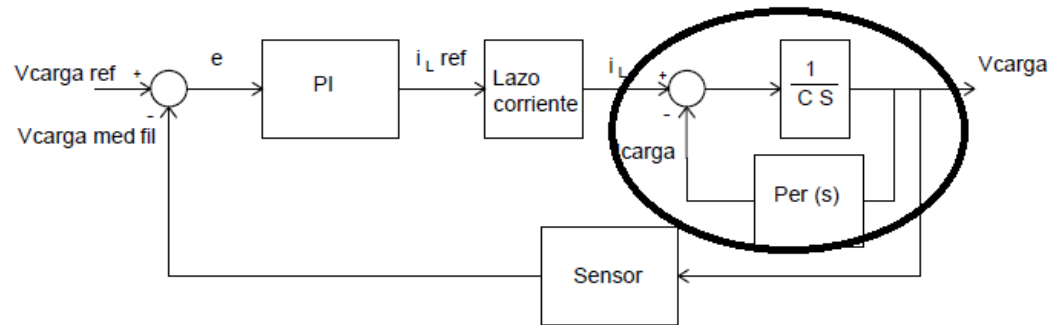


Figura 4.4: Diagrama de bloques con efecto corriente de carga

El análisis para cargas inductivas es el que sigue a continuación:

El bloque  $Per(s)$  se calcula relacionando  $V_{carga}$  con  $i_L$  a través de la inversa de la impedancia formada por el paralelo RL, cuyo valor queda:

$$Per(s) = \frac{\frac{L*s}{R} + 1}{L*s} \quad (29)$$

El bloque que se debe de calcular es el rodeado en la fig. 4.4, cuyo valor se denominará  $Per1(s)$  y corresponde con el lazo cerrado de la perturbación:

$$Per1(s) = \frac{L*s}{(C*L)^2 + \frac{L}{R}*s + 1} \quad (30)$$

De forma análoga, el análisis para cargas capacitivas queda:

En este caso, observando la fig.4.4, el bloque  $Per(s)$ , se modifica, quedando:

$$Per_C(s) = \frac{R*C*carga*s + 1}{R} \quad (31)$$

Una vez calculado  $Per(s)$ , se procede al cálculo del bloque rodeado en la fig. 4.4, que corresponde con el lazo cerrado de la perturbación:

$$Per1(s) = \frac{R}{R(Ccarga+Cinv)s+1} \quad (32)$$

Con esta solución se consigue un seguimiento de la referencia con un error en amplitud y de fase prácticamente despreciable, para cualquier carga lineal o no lineal.

La última opción es considerada por tanto la más adecuada para el sistema utilizado.

## 5. Simulación de ensayos conforme a normativa

A continuación se realizarán los ensayos que se puede hacer con el trabajo realizado, para ello se utilizará la información obtenida en [4][17]:

- Ensayo 1: SAI sin carga (ensayo 9.H).

Descripción: Se debe medir la tensión de salida (rms), que no debe diferir en un  $\pm 5\%$  de su valor nominal (241,5-218.5V), y su contenido armónico, THD, que debe ser menor del 8%.

Tras la realización de la simulación, se comprueba que:

- El valor rms, que se obtiene a partir de la fig. 5.1 es 233,5 V

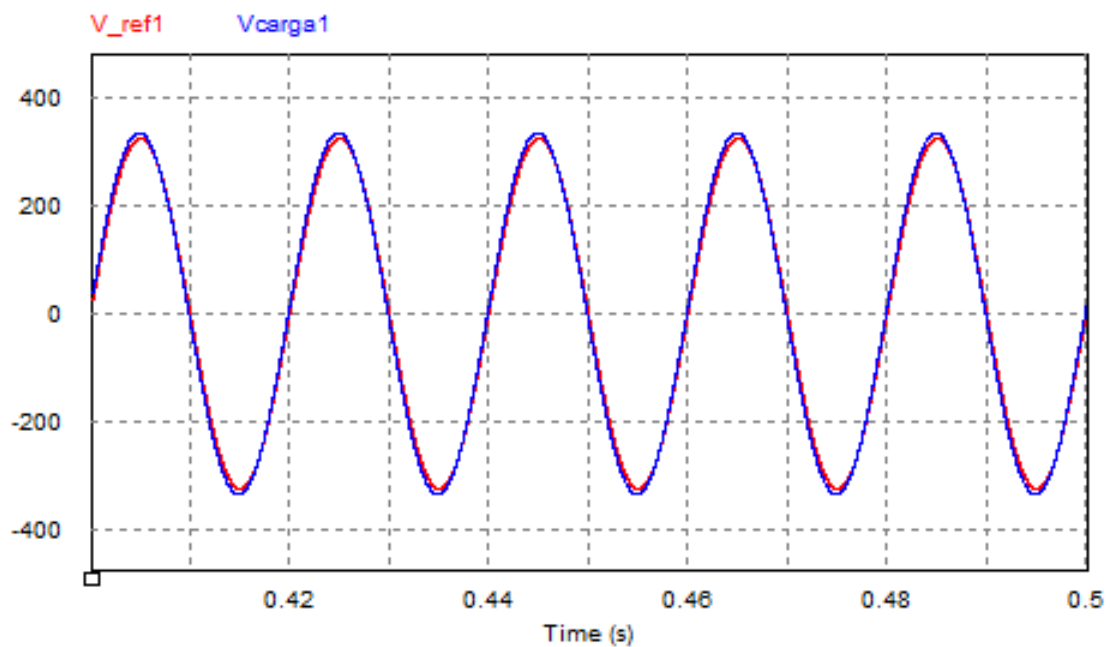


Figura 5.1: Valor rms de la tensión de salida del SAI.

- El THD queda representado en la fig. 5.2: Su valor es de 0,1%.

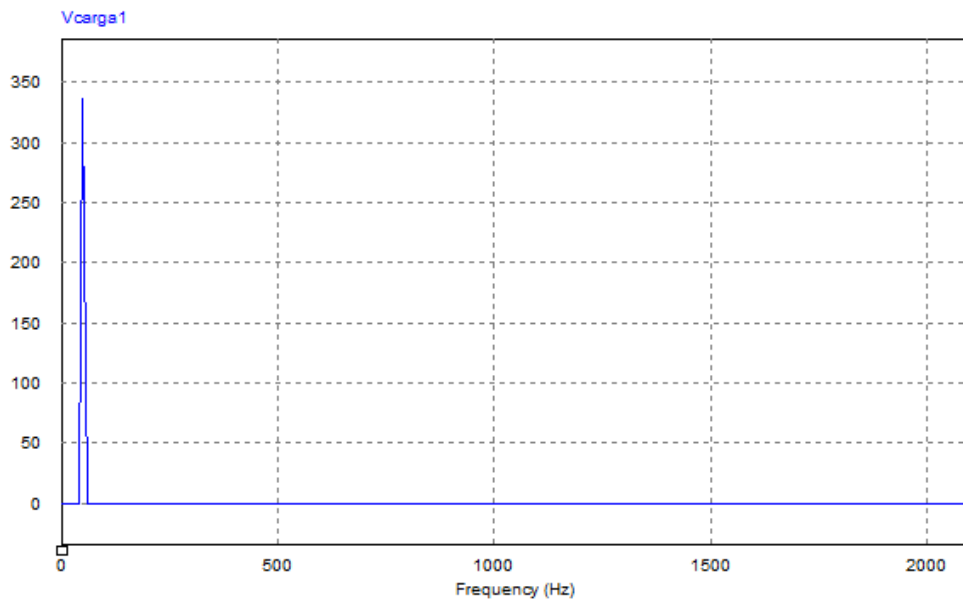


Figura 5.2: THD de la tensión de salida del SAI.

Con los parámetros calculados se puede afirmar que se cumple con las especificaciones del ensayo 1.

- Ensayo 2: SAI con carga (ensayo 10.H)

Descripción: Se realizará lo mismo que en el ensayo 1 pero con carga nominal lineal, de forma separada para capacitiva e inductiva.

o Para cargas inductivas:

De la fig. 5.3 se obtiene que el valor rms a su salida es de 219,9V:



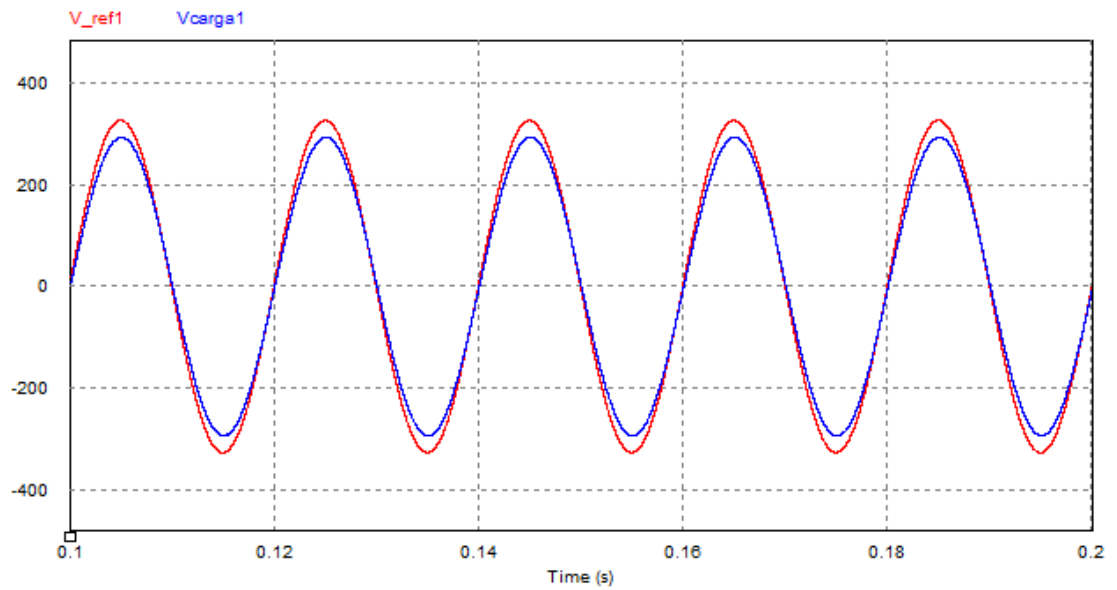


Figura 5.3: Valor rms de la tensión de salida del SAI para carga lineal inductiva.

De la fig. 5.4 se obtiene un THD de 0.11%:

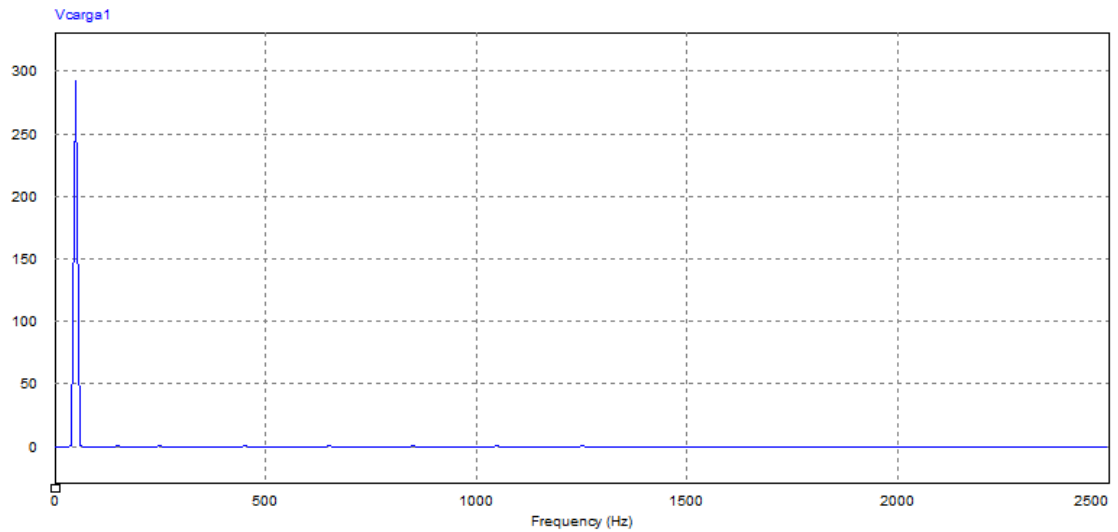


Figura 5.4: THD de la tensión de salida del SAI para carga lineal inductiva

- Para cargas capacitivas:

De la fig. 5.5 se obtiene un valor rms de 245V:

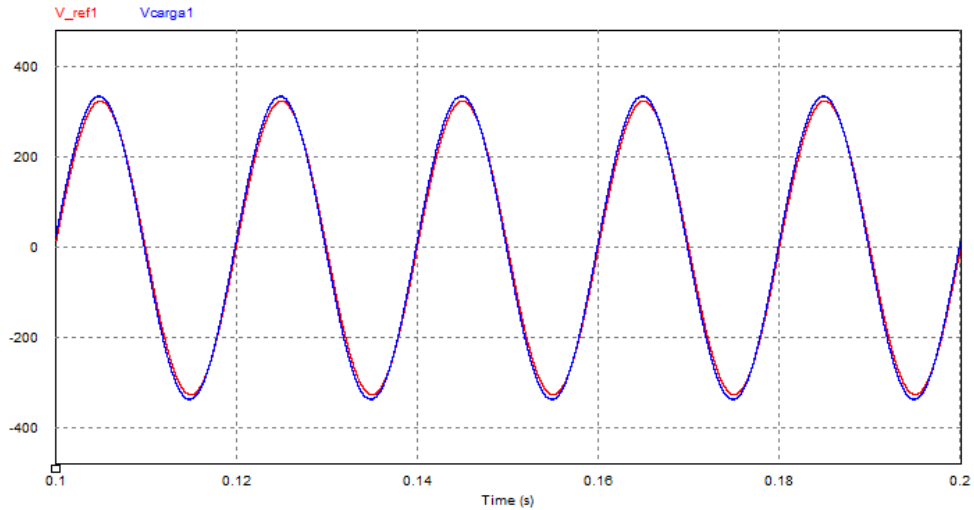


Figura 5.5: Valor rms de la tensión de salida del SAI para carga lineal capacitiva.

De la fig 5.6 un valor de THD de 0.07%:

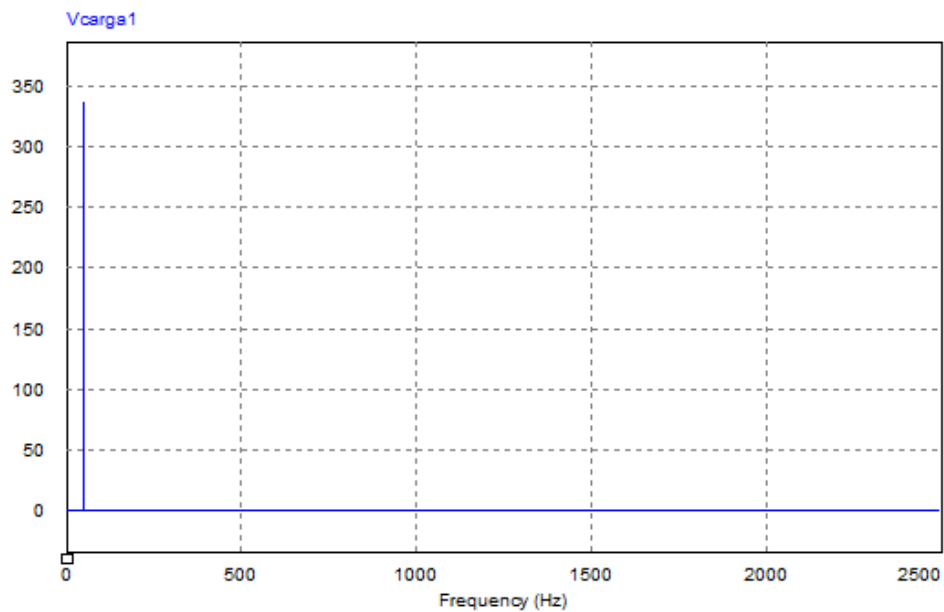


Figura 5.6: THD de la tensión de salida del SAI para carga lineal capacitiva

En el ensayo de cargas inductivas se cumple con las especificaciones, mientras que para cargas capacitivas no se cumple con el valor de rms, siendo de 245 V.

- Ensayo 3: Componente de continua (ensayo 11.H)

Descripción: Se calcula la medida a lo largo de 10 s. de la componente DC debe ser menor de 0,1 % del valor rms. ( $\pm 0,23V$ ).

Nuevamente conviene diferenciar los ensayos para cargas capacitivas y para cargas inductivas:

- Cargas inductivas:

En la fig. 5.3 se muestra el valor  $V_{DC}=0,046V$ :

- Cargas capacitivas:

En la fig. 5.5 queda representado el valor de la tensión DC:  $V_{DC}= - 0,067 V$ :

Como cabía esperar, se comprueba que se cumple el ensayo en ambos casos de forma satisfactoria, ya que las variaciones en la componente DC únicamente se producen durante la implementación práctica, tanto por errores de medida, como por utilizar distintos tiempos de conmutación. Por tanto, es necesario llevarlo a la práctica para obtener resultados reseñables.

- Ensayo 4: Sobrecarga (ensayo 15.E)

Descripción: Con el SAI trabajando con una carga del 10%, se aplica una carga resistiva del 110% para provocar una sobrecarga.

Se debe comprobar que el SAI continúa trabajando en estacionario con los valores predefinidos, es decir, un  $\pm 5\%$  de su valor nominal (241,5-218.5V).

Los resultados son, para un cambio de carga en 0,2 s. (fig. 5.9):

- Para la carga del 10%:  $V_{rms}=237V$
- Para la carga del 110%:  $V_{rms}=232V$

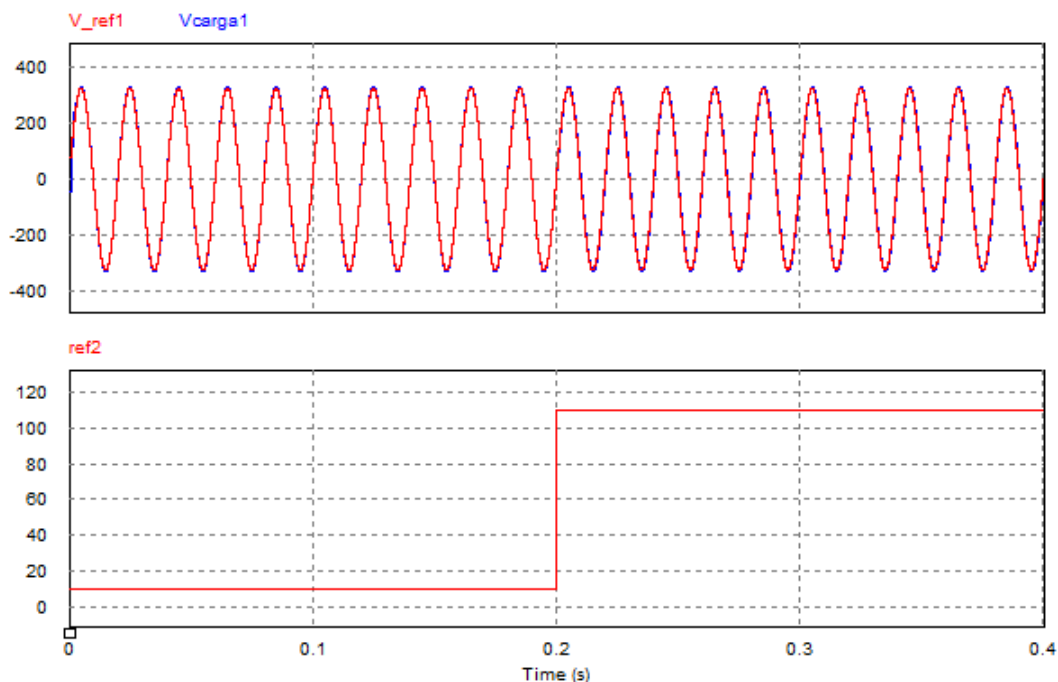


Figura 5.7: Tensión de salida del SAI cuando se produce una sobrecarga a 0.2s.

La simulación del ensayo muestra que en la realidad lo cumpliría.

- Ensayo 5: Escalones de carga lineal (ensayo 22.H)

Descripción: Con el SAI trabajando sin carga, se le conectará una carga del 100%, después se desconectará la carga del 80%, para más tarde descargar la del 20%.

Se debe comprobar que cumple con los límites marcados en transitorio (curva 1) y en permanente (THD, variación de tensión).

Los resultados obtenidos deben diferenciarse en función del tipo de cargas conectadas

○ Para cargas inductivas:

Se observa que en los cambios de carga nunca hay un error de tensión superior al marcado por la curva 1 de la normativa (no siendo superior al 7,5%), aunque en estacionario hay errores superiores al 5%; este comportamiento se observa en la fig. 5.8:

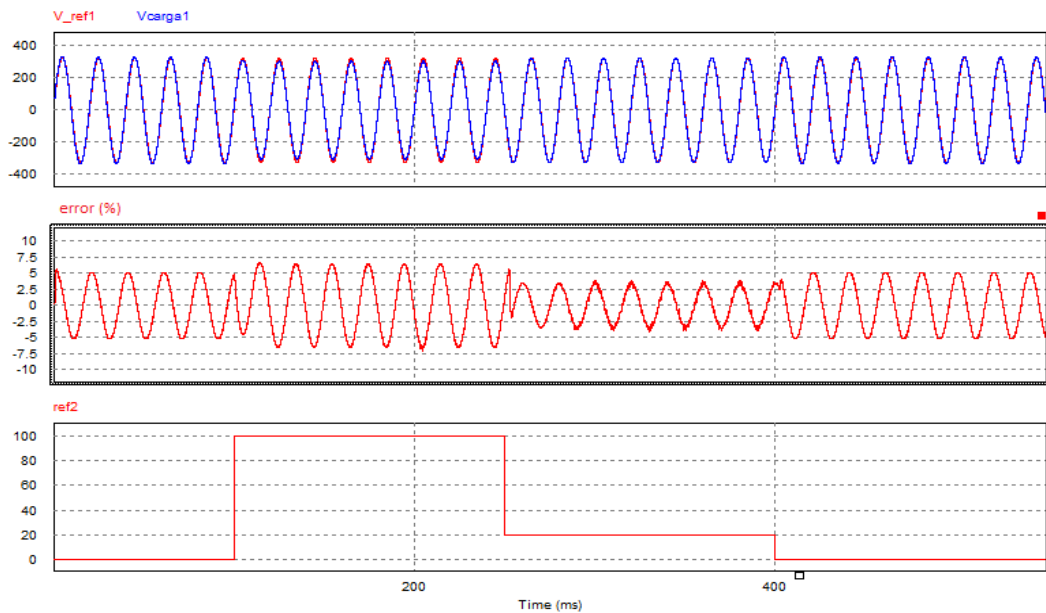


Figura 5.8: Transitorio de tensión ante cambios de carga lineal inductiva.

- Para cargas capacitivas:

En la línea de lo visto en cargas capacitivas, en los cambios de carga nunca hay un error de tensión superior al marcado por la curva 1 de la normativa (no siendo superior al 20%), aunque en estacionario hay errores inaceptables, superiores al 5%; este comportamiento se observa en la fig. 5.9:

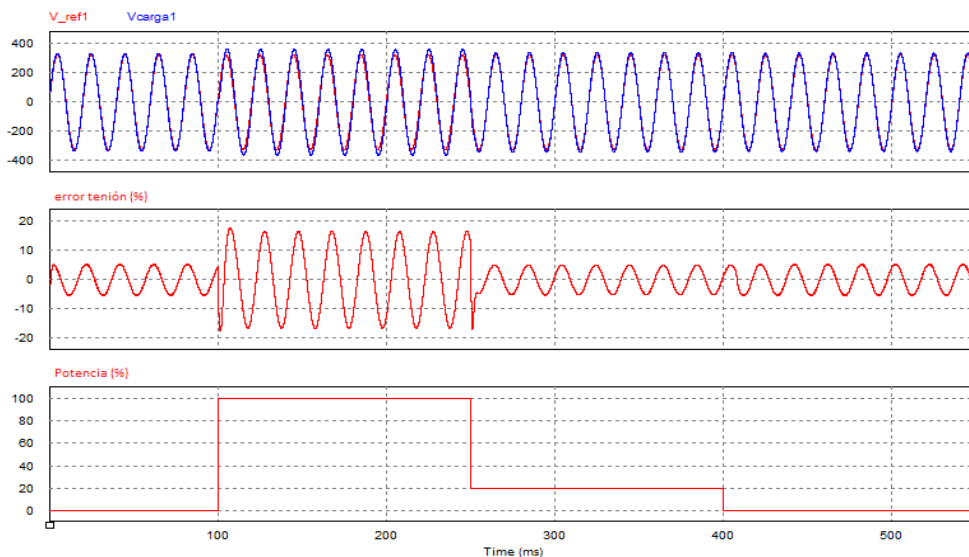


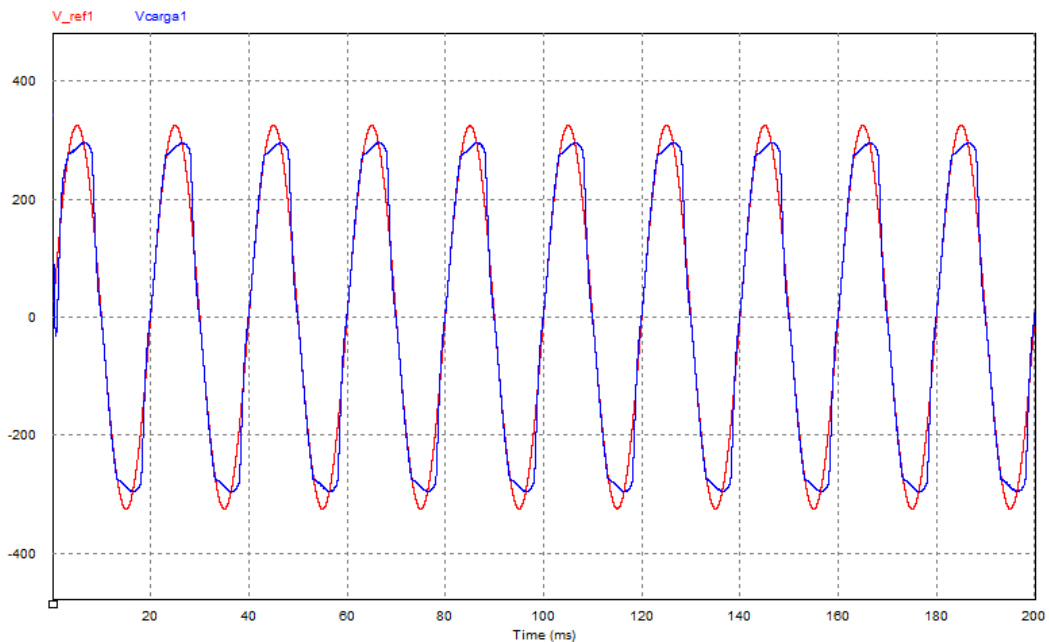
Figura 5.9: Transitorio de tensión ante cambios de carga lineal capacitiva.

Tras las simulaciones realizadas, se comprueba que en ambos ensayos el error en estado estacionario debe corregirse, ya que es superior al requerido (5%). No obstante, en el caso de cargas inductivas se obtienen errores más pequeños (del 7,5% máximo) que en capacitivas (que se acercan al 20%).

- Ensayo 6: Carga no lineal. Carga nominal (ensayo 24.H)

Descripción: Se debe conectar el SAI a una carga nominal y medir la tensión de salida (rms), que no debe diferir en un  $\pm 5\%$  de su valor nominal (241,5-218.5V); y su contenido armónico, THD, que debe ser menor del 8%.

En la fig. 5.10 se muestra el valor rms, que es de 232,5 V.



**Figura 5.10: Valor rms de la tensión de salida del SAI para carga no lineal.**

Por su parte, el THD queda representado en la fig. 5.11, que es de 13,3%.

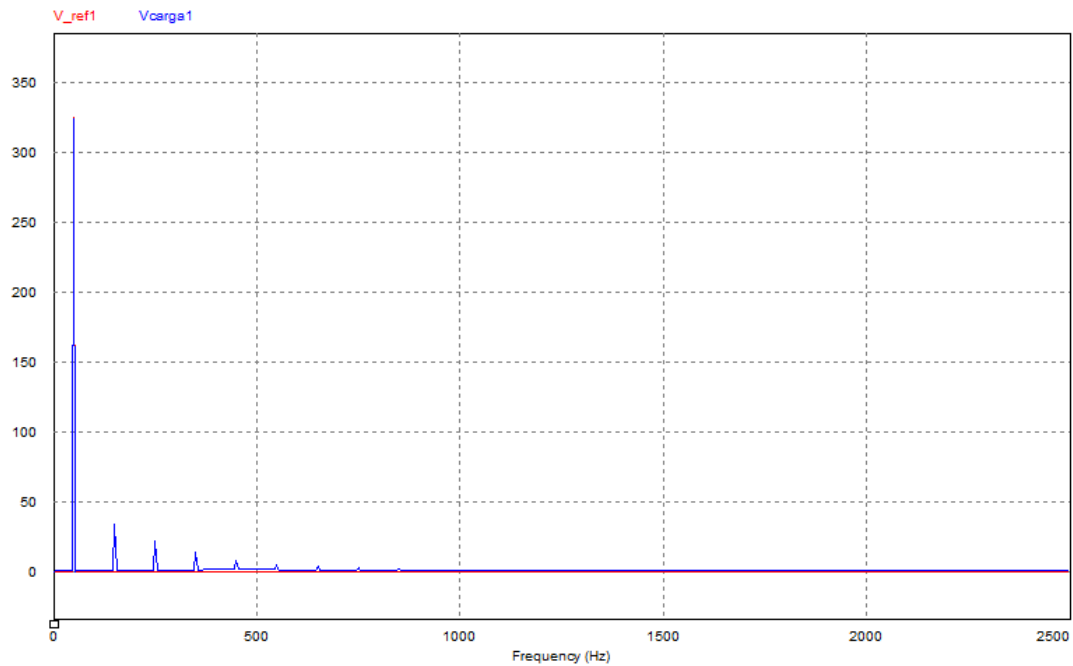


Figura 5.11: THD de la tensión de salida del SAI para carga no lineal.

En este caso, sí se cumpliría con las especificaciones de tensión, pero el THD es superior al permitido, por lo que no se puede cumplir este ensayo.

- Ensayo 7: Escalones de carga no lineal (ensayo 28.H)

Descripción: El SAI sin carga, se le aplica una carga del 25 %, una adicional más tarde hasta llegar al 100%. Tras esto, se desconecta la carga adicional.

Debe medirse en todo momento la desviación del transitorio de salida y comprobar que no sale de los límites de la curva 1.

En la fig. 5.12 se observa claramente que la tensión de salida no está dentro de los límites marcados por la curva 1, llegando a alcanzar errores de hasta el 75%.

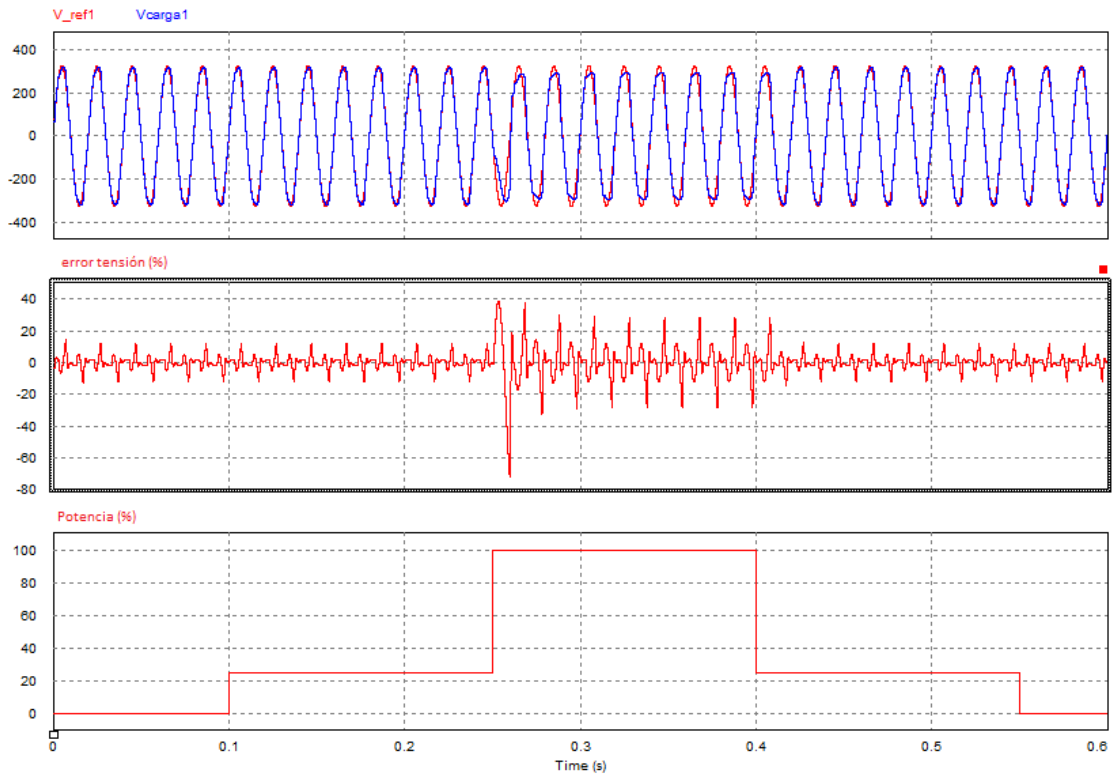


Figura 5.12: Transitorios de la tensión de salida ante cambios de carga no lineal.

Para el cumplimiento de los ensayos 2 y 5 (ante cargas lineales), se proponen las soluciones del apartado 4.5 para conseguir validar el sistema conforme a la normativa. Para el cumplimiento de los ensayos 6 y 7 (ante cargas no lineales) se propone como solución el “P/Q droop method”. A continuación se explica este método:

En cargas no lineales, los armónicos de baja frecuencia de gran amplitud provocan deformaciones en la forma de onda de la tensión. Para evitarlos, es necesario aumentar la frecuencia de corte de la tensión, y así conseguir un buen seguimiento de la corriente de ref. Pero esto implicaría una frecuencia de corte de la corriente muy grande, que en ocasiones es imposible conseguir.

La solución pasa por lazos de tensión más complejos. En caso de ser necesario, se propone este control: Se basa en disminuir la frecuencia cuando la potencia de las cargas aumenta. Para ello es necesario sensor las potencias P y Q, que sirven para determinar la amplitud y frecuencia de la tensión de salida [18].



---

## 6. Conclusiones y líneas futuras

Este trabajo ha comenzado con el estudio del estado del arte. En concreto, se ha realizado una extensa clasificación de los SAI en el apartado 2.2, comparando las diferentes topologías que presenta un SAI. La elección de la topología más adecuada dependerá directamente del tipo de aplicación utilizada, teniendo en cuenta parámetros como la potencia nominal de las cargas o el tiempo de back-up requerido.

Para el sistema elegido en este trabajo, que se utilizará en aplicaciones relacionadas con aerogeneradores, la topología On-line es la que más se ajusta a los requerimientos del sistema debido a estas razones: La potencia nominal de las cargas es media-alta (2,5 kW), teniendo en cuenta que el tiempo de back-up es de 25 s., será necesaria una rápida respuesta. Por último, es necesario destacar que es la topología más segura.

Por otro lado, se ha estudiado la introducción del controlador PI para el lazo de control de  $V_{carga}$ ; dicho estudio se ha dividido en:

- Cálculo de las frecuencias de corte de los lazos de control:

Para el elevador se tuvo en cuenta el valor de la frecuencia nominal de la red (50 Hz), obteniendo 1000 Hz en la  $f_{corte}$  del lazo de corriente y 50 Hz para el de tensión. Para el inversor se realizó un barrido de frecuencias mediante simulación, para ambos lazos de control, obteniendo 2500 Hz para el lazo de corriente y 500 Hz para el de tensión.

- Estudio sobre el comportamiento del sistema ante distintas cargas:

Tras la simulación ante cargas capacitivas e inductivas, no se puede asegurar un funcionamiento del sistema aceptable ante todas las cargas; en concreto, el comportamiento del sistema es peor a mayor potencia activa y reactiva. Esto se debe a que la aproximación que se comete al suponer  $i_L=i_C$ , despreciando el efecto de la corriente de carga (que a efectos prácticos se comporta como una perturbación), es peor en estos casos.

Se propone como posibles soluciones:

- o Control adaptativo:

Este control se basa en ir modificando los parámetros del PI para disminuir el MF y así obtener mejores comportamientos ante cargas críticas. No obstante, tras simular este control queda demostrado que no se consigue mejorar el comportamiento de todas las cargas, y por tanto no es una solución válida.

○ Compensación:

En este caso el control consiste en eliminar el efecto de la corriente de carga, compensándola, para evitar los errores que han aparecido en las simulaciones anteriores.

Por último, tras realizar simulaciones conforme a la normativa relativa a SAI [4], se puede concluir que, aunque en algunos de ellos el resultado es satisfactorio, no ocurre así en su totalidad. En concreto, los ensayos que no son válidos son los ensayos 2 y 5 (ante cargas lineales) y los ensayos 6 y 7 (ante cargas no lineales); en concreto:

- Ensayo 2, con el SAI conectado a su salida a la carga nominal: El funcionamiento no es válido con carga nominal capacitiva, obteniendo un valor de tensión de salida demasiado alto (245V).
- Ensayo 5, al realizar distintos escalones de cargas lineales: Se comprueba que el error en la tensión de salida es demasiado alto, no cumpliendo con las especificaciones marcadas (un error máximo del 5%).
- Ensayo 6, el SAI conectado a su salida a la carga no lineal nominal: Se cumplen con las especificaciones de tensión, pero el THD es muy alto (13,3%) conforme al marcado por la norma (8%).
- Ensayo 7, en el que se realizan distintos escalones de carga no lineal: Se comprueba que el error es muy alto (llegando hasta el 75%) conforme a lo que marca la norma (curva 1).

Para superar la norma, se propone la utilización de las soluciones propuestas previamente para los ensayos 2 y 5, que utilizan cargas lineales. Por su parte, para los ensayos 6 y 7 se propone el denominado “P/Q droop method”, que se basa en la utilización de lazos de control más complejos.

Teniendo en cuenta las conclusiones del trabajo, se establecen las siguientes líneas futuras de trabajo:

- Simulación de cargas reales, que permitan conocer con más exactitud si el sistema es capaz de funcionar de forma aceptable.
- Conocimiento de parámetros de una SAI real, comparándolos con los utilizados en el presente trabajo, y así determinar un dimensionamiento óptimo.

- Comprobación del análisis realizado en este trabajo, utilizando el mismo lazo de control pero con compensación. Verificación de las conclusiones realizadas.
- A partir del sistema elegido, se propone añadir el control con compensación y así comprobar si cumple los ensayos marcados por la normativa.
- De no cumplirse el punto anterior, se propone implantar un sistema más utilizado y competitivo en el mercado de los SAI (véase apartado 2.2.3), y analizar su funcionamiento con respecto a la normativa.



## 7. Bibliografía

- [1] UNEF, “Informe Anual 2016,” *Unión Española Fotovoltaica*, p. 100, 2016.
- [2] Iñigo de la Parra, *Apuntes asignatura Redes Eléctricas*. 2016.
- [3] Legrand, “Guía técnica Sai,” 2013.
- [4] International Electrotechnical Commission, “IEC 62040-3,” *Order A J. Theory Ordered Sets Its Appl.*, 2008.
- [5] M. Aamir, K. Ahmed Kalwar, and S. Mekhilef, “Review: Uninterruptible Power Supply (UPS) system,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 58, pp. 1395–1410, 2016.
- [6] Energex, “UPS Online e Iterativo.” [Online]. Available: <http://energex0.tripod.com/pdf/upsonlineinter.pdf>. [Accessed: 20-Jun-2017].
- [7] M. C. Lott and S.-I. Kim, “Technology Roadmap: Energy storage,” *Energy Technol. Perspect.*, p. 64, 2014.
- [8] Javier Marcos, “Apuntes asignatura Generación distribuida,” 2017.
- [9] Sebastián Bardo Cáceres, “Almacenamiento distribuido en viviendas para alisar la curva de demanda de energía eléctrica,” pp. 1–40, 2010.
- [10] W. Jiang, J. Brunet, and B. Fahimi, “Application of active current sharing control in fuel cell-battery off-line UPS system BT - PESC '08 - 39th IEEE Annual Power Electronics Specialists Conference, June 15, 2008 - June 19, 2008,” pp. 796–801, 2008.
- [11] Y. Zhan, Y. Guo, J. Zhu, and L. Li, “Electrical Power and Energy Systems Performance comparison of input current ripple reduction methods in UPS applications with hybrid PEM fuel cell / supercapacitor power sources,” vol. 64, pp. 96–103, 2015.
- [12] Y. Zhan, Y. Guo, J. Zhu, and L. Li, “Electrical Power and Energy Systems Power and energy management of grid / PEMFC / battery / supercapacitor hybrid power sources for UPS applications,” vol. 67, pp. 598–612, 2015.
- [13] REN21, *Renewables 2017 Global Status Report*. 2017.
- [14] Andoni Urtasun, “Apuntes asignatura Sistemas Fotovoltaicos,” 2016.
- [15] E. Unicrom, “Eliminador de rebote con 555.” [Online]. Available:

- <http://unicrom.com/eliminador-de-rebote-con-555/>. [Accessed: 15-Jun-2017].
- [16] E. Barrios, “Prácticas asignatura Sistemas Fotovoltaicos,” 2016.
- [17] D. González, “Estudio de un SAI para aerogeneradores: normativa y montaje de banco de ensayos,” 2017.
- [18] M. Guerrero, Josep M. De Vicuña, Luis García Matas, Jose Miret, Jaume Castilla, “Output impedance design of parallel-connected UPS inverters,” *IEEE Int. Symp. Ind. Electron.*, vol. 2, no. 4, pp. 1123–1128, 2004.

---

## 8. Anexo

### Código Matlab para el cálculo de los diagramas de Bode y los parámetros del controlador PI

```
clear all
close all
%%Cálculo de las cargas L,C
R=200;
w=2*pi*50;
    % Con RL
    FP=0.9; %Factor de potencia deseado
    phi_L=acos(FP);
    phi_C=acos(-FP);
    L=(R/w)*tan(90*pi/180-phi_L); %Valor de L obtenido
    Z=(R*w*L*i)/(R+w*L*i);
    Zeq=abs(Z);
    phi_grad=angle(Z)*360/(2*pi);
    Iac=325/Zeq;

    %Con RC
    C=(tan(-phi_C))/(R*w); %Valor de C obtenido

%%Definir parametros de los lazos
Vdc=200; %Tensión del sistema de almacenamiento
Vbus=500; %%Tensión en el condensador de bus
Vpt=1; %Tensión pico de la onda triangular

%%Cálculo diagramas de Bode
%Control del elevador
    %Control de corriente
    L_elev=0.0025; %Bobina del elevador
    ksc_elev=1; %Acondicionamiento del sensor de corriente del elevador
```

```
fsc_elev=2000; %frecuencia de corte del sensor de corriente del elevador  
fcc_elev=1000; %frecuencia de corte del lazo de corriente del elevador  
Mfc_elev=50; %Margen de fase del lazo de corriente del elevador  
wcc_elev=2*pi*fcc_elev;  
wsc_elev=2*pi*fsc_elev;  
tausc_elev=1/wsc_elev;
```

#### %Control de tensión

```
C_elev=0.003; %Condensador del elevador  
ksv_elev=1; %Acondicionamiento del sensor de tensión del elevador  
fsv_elev=500; %frecuencia de corte del sensor de tensión del elevador  
fcv_elev=50; %frecuencia de corte del lazo de tensión del elevador  
Mfv_elev=45; %Margen de fase del lazo de tensión del elevador  
wcv_elev=2*pi*fcv_elev;  
wsv_elev=2*pi*fsv_elev;  
tausv_elev=1/wsv_elev;
```

#### %Control del inversor

##### %Control de corriente

```
L_inv=0.00325; %Bobina del inversor  
ksc_inv=1; %Acondicionamiento del sensor de corriente del inversor  
fcc_inv=2500; %frecuencia de corte del lazo de corriente del inversor  
fsc_inv=fcc_inv*2; %frecuencia de corte del sensor de corriente del inversor  
Mfc_inv=50; %Margen de fase del lazo de corriente del inversor  
wcc_inv=2*pi*fcc_inv;  
wsc_inv=2*pi*fsc_inv;  
tausc_inv=1/wsc_inv;
```

##### %Control de tensión

```
C_inv=0.00003; %Condensador del inversor  
ksv_inv=1; %Acondicionamiento del sensor de tensión del inversor
```



```

fvc_inv=500;    %frecuencia de corte del lazo de tensión del elevador
fsv_inv=fvc_inv*2; %frecuencia de corte del sensor de tensión del inductor
Mfv_inv=45;    %Margen de fase del lazo de tensión del inductor
wcv_inv=2*pi*fvc_inv;
wsv_inv=2*pi*fsv_inv;
tausv_inv=1/wsv_inv;
  
```

### %Cálculo de los parámetros

%Control del elevador

%Corriente

```
Tnc_elev=(tan((Mfc_elev*2*pi/360)+atan(fcc_elev/fsc_elev)))/(2*pi*fcc_elev);
```

```
kpc_elev=(L_elev*((2*pi*fcc_elev)^2)*Vpt*Tnc_elev*sqrt((fcc_elev/fsc_elev)^2+1))/(Vbus*sqrt((2*pi*fcc_elev*Tnc_elev)^2+1));
```

%Tensión

```
Tnv_elev=(tan((Mfv_elev*2*pi/360))+atan(fcv_elev/fsv_elev)+atan(wcv_elev/wcc_elev))/(2*pi*fvc_elev);
```

```
kpv_elev=(C_elev*((2*pi*fvc_elev)^2)*Tnv_elev*Vbus)/(Vdc*sqrt((2*pi*fvc_elev*Tnv_elev)^2+1));
```

%Control del inductor

%Corriente

```
Tnc_inv=(tan((Mfc_inv*2*pi/360)+atan(fcc_inv/fsc_inv)))/(2*pi*fcc_inv);
```

```
kpc_inv=(L_inv*((2*pi*fcc_inv)^2)*Vpt*Tnc_inv*sqrt((fcc_inv/fsc_inv)^2+1))/(Vbus*sqrt((2*pi*fcc_inv*Tnc_inv)^2+1));
```

%Tensión

```
Tnv_inv=(tan((Mfv_inv*2*pi/360)+atan(fcv_inv/fsv_inv)+atan(wcv_inv/wcc_inv)))/(2*pi*fvc_inv);
```

$$kpv\_inv = (C\_inv * ((2 * \pi * fcv\_inv)^2 * Tnv\_inv * \sqrt{(fcv\_inv / fsv\_inv)^2 + 1}) * \sqrt{(wcv\_inv / wcc\_inv)^2 + 1}) / (\sqrt{(2 * \pi * fcv\_inv * Tnv\_inv)^2 + 1});$$

### %Tabla de parametros

```

LastName = {'elev_corr'; 'elev_tens'; 'inv_corr'; 'inv_tens'};
kp = [kpc_elev; kpv_elev; kpc_inv; kpv_inv];
Tn = [Tnc_elev; Tnv_elev; Tnc_inv; Tnv_inv];
tau = [tausc_elev; tausv_elev; tausc_inv; tausv_inv];
table(kp, Tn, tau, 'RowNames', LastName)

```

### %Funciones de transferencia

#### %Lazo de control de elevador

#### %Corriente

```

nPlc_elev = tf([kpc_elev * Tnc_elev kpc_elev], 1);
dPlc_elev = tf([Tnc_elev 0], 1);
Plc_elev = nPlc_elev / dPlc_elev;

```

```

nHc_elev = tf(ksc_elev);
dHc_elev = tf([1 / (2 * \pi * fsc_elev) 1], 1);
Hc_elev = nHc_elev / dHc_elev;

```

```

Ls_elev = tf([L_elev 0], 1);

```

```

LAc_elev = (Plc_elev * Hc_elev * Vbus) / (Vpt * Ls_elev);
Lcc_elev = (Plc_elev * Vbus * (1 / Ls_elev)) / (1 + (Plc_elev * Vbus * (1 / Ls_elev) * Hc_elev));

```

#### %Tensión

```

nPlv_elev = tf([kpv_elev * Tnv_elev kpv_elev], 1);
dPlv_elev = tf([Tnv_elev 0], 1);

```

$P_{lv\_elev} = n_{P_{lv\_elev}} / d_{P_{lv\_elev}}$ ;

$n_{Hv\_elev} = tf(k_{sv\_elev})$ ;

$d_{Hv\_elev} = tf([(1/(2*\pi*f_{sv\_elev})) 1], 1)$ ;

$Hv\_elev = n_{Hv\_elev} / d_{Hv\_elev}$ ;

$Cs\_elev = tf([C\_elev 0], 1)$ ;

$Lc\_elev = tf(1, [1/wcc\_elev 1])$ ;

$LAv\_elev = (P_{lv\_elev} * V_{dc} * Lc\_elev) / (V_{bus} * Cs\_elev)$ ;

$LCv\_elev = (P_{lv\_elev} * (1/Cs\_elev) * Lc\_elev * V_{dc} / V_{bus}) / (1 + (P_{lv\_elev} * Lc\_elev * Hv\_elev * (1/Cs\_elev) * V_{dc} / V_{bus}))$ ;

#### %Lazo de control del inversor

##### %Corriente

$n_{Plc\_inv} = tf([k_{pc\_inv} * T_{nc\_inv} k_{pc\_inv}], 1)$ ;

$d_{Plc\_inv} = tf([T_{nc\_inv} 0], 1)$ ;

$Plc\_inv = n_{Plc\_inv} / d_{Plc\_inv}$ ;

$n_{Hc\_inv} = tf(k_{sc\_inv})$ ;

$d_{Hc\_inv} = tf([(1/(2*\pi*f_{sc\_inv})) 1], 1)$ ;

$Hc\_inv = n_{Hc\_inv} / d_{Hc\_inv}$ ;

$Ls\_inv = tf([L\_inv 0], 1)$ ;

$LAc\_inv = (Plc\_inv * Hc\_inv * V_{bus}) / (V_{pt} * Ls\_inv)$ ;

$LCc\_inv = (Plc\_inv * (1/Ls\_inv) * V_{bus}) / (1 + (Plc\_inv * (1/Ls\_inv) * V_{bus} * Hc\_inv))$ ;

### %Tensión

$nPlv\_inv = tf([kpv\_inv * Tnv\_inv \ kpv\_inv], 1);$

$dPlv\_inv = tf([Tnv\_inv \ 0], 1);$

$Plv\_inv = nPlv\_inv / dPlv\_inv;$

$nHv\_inv = tf(ksv\_inv);$

$dHv\_inv = tf([(1 / (2 * pi * fsv\_inv)) \ 1], 1);$

$Hv\_inv = nHv\_inv / dHv\_inv;$

$Cs\_inv = tf([C\_inv \ 0], 1);$

$Lc\_inv = tf(1, [1/wcc\_inv \ 1]);$

$LAv\_inv = (Plv\_inv * Hv\_inv) / (Cs\_inv);$

$LCv\_inv = (Plv\_inv * (1/Cs\_inv) * Lc\_inv) / (1 + (Plv\_inv * (1/Cs\_inv) * Lc\_inv * Hv\_inv));$

### %Bode entre Vc y I carga(Isal)

$LAv\_invP = (1/Cs\_inv) * Hv\_inv * Plv\_inv * Lc\_inv;$

$LCv\_invP = (1/Cs\_inv) / (-1 - ((1/Cs\_inv) * Hv\_inv * Plv\_inv * Lc\_inv));$

### %Efecto perturbación RL

$nPer\_inv = tf([L \ 0], 1);$

$dPer\_inv = tf([(C\_inv * L) \ (L/R) \ (1)], 1);$

$Per\_inv = nPer\_inv / dPer\_inv;$

**%Para FP=1**

**% Per\_inv = tf(R, [(R \* C\_inv) \ 1]);**

$LAPER\_inv = Plv\_inv * Lc\_inv * Per\_inv * Hv\_inv;$

$LCper\_inv = (Plv\_inv * Per\_inv * Lc\_inv) / (1 + (Plv\_inv * Lc\_inv * Per\_inv * Hv\_inv));$

**%Efecto perturbacion RC**

```
nPerc_inv=tf(R,1);  
dPerc_inv=tf([(R*(C+C_inv)) 1],1);  
Perc_inv=nPerc_inv/dPerc_inv;  
LAperc_inv=Plv_inv*Lc_inv*Perc_inv*Hv_inv;  
LCperc_inv=(Plv_inv*Perc_inv*Lc_inv)/(1+(Plv_inv*Lc_inv*Perc_inv*Hv_inv));
```

**%Dibujar figuras**

**%Cambiar eje de rad/s a hz**

```
opts = bodeoptions('cstprefs');  
opts.FreqUnits = 'Hz';
```

```
figure;
```

```
hold on
```

```
bode(LCv_inv,'r',opts)
```

```
bode(LCc_inv,'g')
```

```
title(['Lazos cerrados de corriente fcc=',num2str(fcc_inv),' y de tensión del inversor
```

```
fcv=',num2str(fcv_inv)])
```

```
legend('LCv inv','LCc inv')
```

```
grid on
```

```
figure;
```

```
hold on
```

```
bode(LAper_inv,'r',opts)
```

```
bode(LCper_inv,'g')
```

```
title(['Lazos de tensión del inversor fcv=',num2str(fcv_inv),' RL'])
```

```
legend('Lazo abierto','Lazo cerrado')
```

```
grid on
```

```
figure;
```

```
hold on
```

```
bode(LAperc_inv,'r',opts)
bode(LCperc_inv,'g')
title(['Lazos de tensión del inversor fcv=',num2str(fcv_inv),' RC'])
legend('Lazo abierto','Lazo cerrado')
grid on
```

%%Comparación lazo de corriente=1 y lazo de corriente=filtro

%%Cálculo de los parámetros

%%Control del elevador

%%Tensión

```
Tnv_elev2=(tan((Mfv_elev*2*pi/360))+atan(fcv_elev/fsv_elev))/(2*pi*fcv_elev);
```

```
kpv_elev2=(C_elev*((2*pi*fcv_elev)^2)*Tnv_elev*Vbus)/(Vdc*sqrt((2*pi*fcv_elev*Tnv_elev)^2+1));
```

%%Control del inversor

%%Tensión

```
Tnv_inv2=(tan((Mfv_inv*2*pi/360)+atan(fcv_inv/fsv_inv))/(2*pi*fcv_inv);
```

```
kpv_inv2=(C_inv*((2*pi*fcv_inv)^2)*Tnv_inv*sqrt((fcv_inv/fsv_inv)^2+1)*sqrt((wcv_inv/wcc_inv)^2+1))/(sqrt((2*pi*fcv_inv*Tnv_inv)^2+1));
```

%%Funciones de transferencia

%%Lazo de control de elevador

%%Tensión

```
nPIv_elev2=tf([kpv_elev2*Tnv_elev2 kpv_elev2],1);
```

```
dPIv_elev2=tf([Tnv_elev2 0],1);
```

```
PIv_elev2=nPIv_elev2/dPIv_elev2;
```

```
Lc_elev=1;
```

```
LAv_elev2=(Plv_elev2*Vdc*Lc_elev)/(Vbus*Cs_elev);
```

```
LCv_elev2=(Plv_elev2*(1/Cs_elev)*Lc_elev*Vdc/Vbus)/(1+(Plv_elev2*Lc_elev*Hv_elev  
*(1/Cs_elev)*Vdc/Vbus));
```

```
%Lazo de control del inversor
```

```
%Tensión
```

```
nPlv_inv2=tf([kpv_inv2*Tnv_inv2 kpv_inv2],1);
```

```
dPlv_inv2=tf([Tnv_inv2 0],1);
```

```
Plv_inv2=nPlv_inv2/dPlv_inv2;
```

```
Lc_inv=1;
```

```
LAv_inv2=(Plv_inv2*Hv_inv)/(Cs_inv);
```

```
LCv_inv2=(Plv_inv2*(1/Cs_inv)*Lc_inv)/(1+(Plv_inv2*(1/Cs_inv)*Lc_inv*Hv_inv));
```

```
%Dibujar figuras
```

```
figure;
```

```
hold on
```

```
bode(LCv_elev,'r',opts)
```

```
bode(LCv_elev2,'g')
```

```
title(['Comparacion lazo cerrado de tension elevador efecto aprox. lazo corriente'])
```

```
legend('lazo corriente filtro','Lazo corriente 1')
```

```
grid on
```

```
figure;
```

```
hold on
bode(LCv_inv,'r',opts)
bode(LCv_inv2,'g')
title(['Comparacion lazo cerrado de tension inductor efecto aprox. lazo corriente'])
legend('lazo corriente filtro','Lazo corriente 1')
grid on
```