

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

Estudio de un SAI para aerogeneradores: Normativa y montaje de banco de ensayos.



Grado en Ingeniería
en Tecnologías Industriales

Trabajo Fin de Grado

David González Lizarraga

Ernesto Barrios Rípodas

Pamplona, 28/06/2017



ABSTRACT

The objective of this Project is to study the current standard which affects the design and the performance of an UPS, a device that supplies energy to other devices connected to it during a failure on the grid, due to its batteries or other energy storage devices. In particular an UPS designed by Saprem will be studied, which main objectives are to ensure a lifetime higher than current commercial UPS, limited by the power supplies, as well as getting a reliable and effective system. Once the study of the standard is finished, a test bench is designed to be connected to the UPS, to submit this UPS to different tests and to verify not only its correct performance, but also that it fulfills the requirements of the standard.

RESUMEN

El objetivo de este proyecto es realizar un estudio de la normativa vigente que afecta al diseño y el comportamiento de un SAI, un dispositivo que puede proporcionar energía a otros dispositivos conectados a él durante un fallo en la red de suministro principal, gracias a sus baterías u otros elementos de almacenamiento de energía. En particular se estudiará un SAI diseñada por la empresa Saprem cuyos objetivos principales son asegurar una vida útil superior al de los SAI comerciales que se están montando ahora en los aerogeneradores, limitado por las fuentes de almacenamiento, así como conseguir un sistema con buenas prestaciones y fiabilidad. Una vez realizado el estudio de las normas, se diseña una bancada de pruebas a la que conectar el SAI para someterla a diferentes ensayos y comprobar no solo su correcto funcionamiento, sino que supera los requisitos de la norma.

PALABRAS CLAVE:

Sistema de alimentación ininterrumpida (SAI), normativa, ensayo, compatibilidad electromagnética, TRIAC.

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1-1. Potencia eólica instalada acumulada en el mundo. 2001-2016	1
Figura 1-2. Evolución de la potencia fotovoltaica instalada en el mundo. 2000-2015	1
Figura 2-1. Curva 1- Evolución de la tensión de salida para clasificación 1 [3].....	5
Figura 2-2. Curva 2- Evolución de la tensión de salida para clasificación 2 [3].....	5
Figura 2-3. Curva 3- Evolución de la tensión de salida para clasificación 3 [3].....	6
Figura 2-4. Arquitectura hardware del sistema.	7
Figura 3-1. Entrada de SAI. Conexión a red.....	9
Figura 3-2. Método de ensayo carga lineal [3].	13
Figura 3-3. Lado de las baterías en el SAI.....	19
Figura 3-4. Límites de interferencia de voltaje, valor quasipico.	22
Figura 3-5. Límites de interferencia de voltaje, valor medio.	22
Figura 3-6. Circuito de una LISN [7].....	23
Figura 3-7. Esquema de una AMN [8].	24
Figura 3-8. Configuración de los elementos para la medida de emisiones conducidas para SAI en el suelo [5].....	25
Figura 3-9. Configuración de los elementos para la medida de emisiones conducidas para SAI en altura [5].....	25
Figura 3-10. Circuito de medida de emisiones conducidas en el lado de carga [5].	26
Figura 3-11. Esquema del montaje para medida de emisiones radiadas.	27
Figura 3-12. Esquema de implementación práctica para la medida de un campo magnético... 29	
Figura 3-13. Esquema para medir el campo magnético.	29
Figura 4-1. Apagado de un interruptor mecánico con rebote.	33
Figura 4-2. Construcción y símbolo del TRIAC.....	33
Figura 4-3. Funcionamiento del TRIAC como troceador.	35
Figura 4-4. Funcionamiento del TRIAC como interruptor.	36
Figura 4-5. Simbología de DIAC.	36
Figura 4-6. Esquema eléctrico de un QUADRAC.	37
Figura 4-7. Circuito eléctrico de un optoacoplador más TRIAC.....	37
Figura 4-8. Esquema de una carga no lineal [3].	38
Figura 4-9. Potencia consumida por carga no lineal nominal.	39
Figura 4-10. Potencia consumida por carga no lineal nominal corregida.....	40
Figura 4-11. Corriente por el puente de diodos.....	41
Figura 4-12. Evolución de la corriente y tensión del puente de diodos del 25%.	42

Figura 4-13. Voltaje directo instantáneo.....	43
Figura 4-14. Evolución de la corriente y tensión del puente de diodos del 75%.....	43
Figura 4-15. Circuito eléctrico equivalente del proceso de disipación térmica.....	44
Figura 4-16. Curva tensión-tiempo admisible en el punto de conexión [18].....	45
Figura 4-17. Circuito para simular el hueco de tensión.	46
Figura 5-1. Circuito real para ensayos de eficiencia.....	49
Figura 5-2. Circuito para ensayos con carga lineal inductiva.	50
Figura 5-3. Circuito para ensayos con carga lineal capacitiva.....	50
Figura 5-4. Esquema real de conexión de carga no lineal para ensayos.....	51
Figura 5-5. Control del disparo del TRIAC.	52
Figura 5-6. Circuito de señal para disparar el hueco de tensión.....	53
Figura 5-7. Simulación en PSIM circuito emulador de hueco de tensión.	53
Figura 5-8. Circuito de entrada a la célula LEM [19].	54
Figura 5-9. Circuito completo de medida de tensión.....	55
Figura 6-1. Valor rms de la tensión de salida del SAI.	57
Figura 6-2. THD de la tensión de salida del SAI.	58
Figura 6-3. Valor rms de la tensión de salida del SAI para carga lineal inductiva.	59
Figura 6-4. THD de la tensión de salida del SAI para carga lineal inductiva.....	59
Figura 6-5. Valor rms de la tensión de salida del SAI para carga lineal capacitiva.....	60
Figura 6-6. THD de la tensión de salida del SAI para carga lineal capacitiva	60
Figura 6-7. Tensión de salida del SAI cuando se produce una sobrecarga a 0.2s.	62
Figura 6-8. Transitorio de tensión ante cambios de carga lineal inductiva.	63
Figura 6-9. Transitorio de tensión ante cambios de carga lineal capacitiva.	64
Figura 6-10. Valor rms de la tensión de salida del SAI para carga no lineal.....	65
Figura 6-11. THD de la tensión de salida del SAI para carga no lineal.	65
Figura 6-12: Transitorios de la tensión de salida ante cambios de carga no lineal.....	66

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 3-1. Límites de emisión de corriente para equipos que no sean trifásicos equilibrados [4].	11
Tabla 3-2. Parámetros de eficiencia del SAI [3]......	12
Tabla 3-3. Límites de interferencia de voltaje en el rango de frecuencias de 0.15MHz a 30MHz [5].	21
Tabla 3-4. Dimensionamiento de cargas para una AMN [8].	24
Tabla 3-5. Límites de emisiones radiadas en el rango de 30MHz a 1.000MHz [5].	26
Tabla 3-6. Requisitos mínimos de inmunidad.	28
Tabla 4-1. Valores para el dimensionamiento de cargas resistivas.	31
Tabla 4-2. Valores teóricos calculados para carga lineal.	32
Tabla 4-3. Dimensionamiento carga no lineal según norma IEC-62040-3.	39
Tabla 4-4. Parámetros recalculados para carga no lineal.	40
Tabla 4-5. Resistencias R2 para generar el hueco de tensión.....	47
Tabla 5-2. Principales características LV 25-P.	54

INDICE

1.INTRODUCCIÓN	1
2.REQUISITOS SAI	3
2.1.Arquitectura del sistema	4
2.2.Características de los distintos módulos	8
2.3.Requisitos de funcionamiento del producto	8
3.MARCO NORMATIVO	9
3.1.62040-3: Método de especificación de los requisitos de rendimiento y prueba ..	9
3.1.1.Compatibilidad del suministro en AC. Entrada	9
3.1.2.Carga lineal	13
3.1.3.Carga no lineal	17
3.1.4.Almacenamiento	19
3.2.62040-2: Requisitos de compatibilidad electromagnética.....	20
3.2.1.Conceptos teóricos.....	20
3.2.2.Ensayos de emisión	21
3.2.3.Ensayos de inmunidad.....	27
4.DISEÑO DE ELEMENTO	31
4.1.Cargas lineales.....	31
4.2.Interruptores	33
4.3.Cargas no lineales.....	38
4.3.1.Puente de diodos.	40
4.4.Circuito emulador de hueco de tensión red monofásica	45
4.4.1.Características del hueco.	45
4.4.2.Circuito	46

5.MONTAJE DE CIRCUITOS	49
5.1.Ensayos de eficiencia.....	49
5.2.Ensayo para carga lineal.....	49
5.3.Ensayo carga no lineal	51
5.4.Circuitos de disparo.....	51
5.5.Hueco de tensión.....	52
5.5.1.Circuito de disparo	52
5.5.2.Sensor de tensión.....	54
6.SIMULACIÓN DE ENSAYOS	57
7.CONCLUSIONES	67
8.BIBLIOGRAFÍA.....	69

1. INTRODUCCIÓN

En la actualidad, la conciencia a nivel global de la importancia que tienen las energías renovables y la eficiencia energética está aumentando considerablemente. Con ello no sólo se logra prevenir el cambio climático, sino que también se proporciona una independencia energética, tanto a escala global (una nación), como a pequeña escala (sistema aislado). Además, ofrece los 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 Fig.1-1 [1] y en la Fig.1-2 [2], vemos como la potencia instalada de estas dos tecnologías se incrementa año a año.

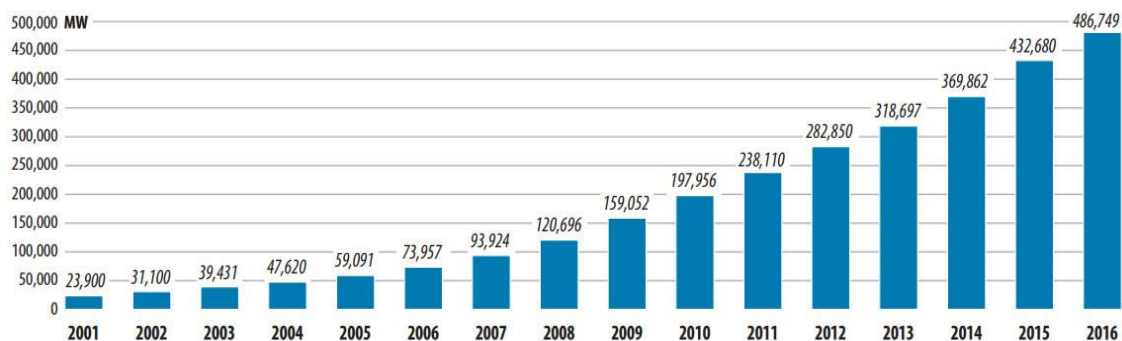


Figura 1-1. Potencia eólica instalada acumulada en el mundo. 2001-2016

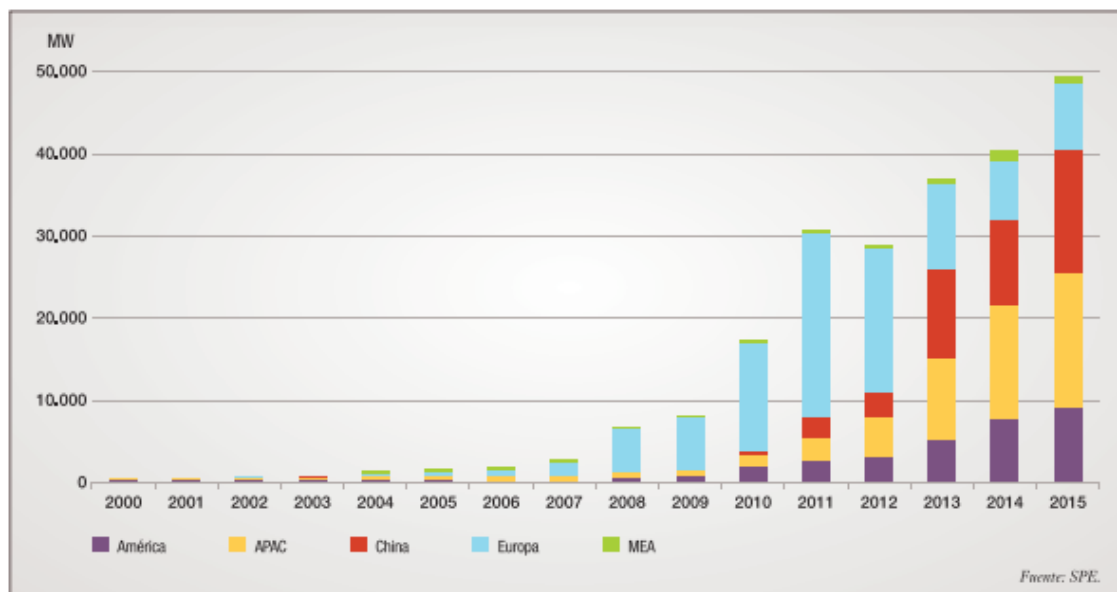


Figura 1-2. Evolución de la potencia fotovoltaica instalada en el mundo. 2000-2015

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, como por ejemplo los huecos de tensión. Debido a la presencia de estas perturbaciones, se ha creado una normativa que regula el comportamiento que debe tener cada unidad generadora en presencia de estas perturbaciones, que limitan la generación o la dificultan. Para paliar estos problemas, la empresa Saprem, decidió diseñar un sistema de alimentación de emergencia (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 se eléctrico), cuando se produce un hueco de tensión en la red.

El SAI tiene una tipología online para mejorar los tiempos de respuesta a costa de una peor eficiencia. Estará compuesta por varios convertidores de potencia encargados de controlar la carga y descarga de los ultracaps, que tiene a modo de almacenamiento de energía, y de suministrar a la carga una tensión con la forma de onda apropiada.

Para conseguir homologar el SAI y poder comercializarla es necesario que supere la normativa vigente, estudio en el que se basa este proyecto. Para ello se detallan los ensayos que marca la normativa y se hace un diseño de la bancada de pruebas, dimensionando todos sus elementos, con la que testear el SAI.

2. REQUISITOS SAI

Las diferentes características y parámetros de diseño del SAI determinarán los límites y las condiciones de trabajo del SAI. Los requerimientos mínimos vienen marcados por la normativa que se debe cumplir en el país de venta y las exigencias de los clientes.

Este proyecto está enfocado a determinar los ensayos que debe superar el sistema de alimentación ininterrumpida diseñado por Saprem y que se presentan en los siguientes apartados.

Los requerimientos para los SAI que quiera obtener se pueden encontrar las siguientes normativas:

- IEC 62040 – 3: Especificaciones de los ensayos y resultados requeridos para SAI

Esta normativa se aplica a los SAIs cuya tensión de salida no supera los 1.000 Va.c, tanto monofásica o trifásica, y frecuencia fija. Y que incorporan un sistema de almacenamiento de energía. Esta norma tiene como objetivo especificar los requisitos de funcionamiento y prueba de un SAI completo y no de unidades funcionales individuales del SAI.
- IEC 62040 – 2: Requisitos de compatibilidad electromagnética para SAI

Se aplica igual que la IEC 62040-3, pero este apartado especifica las pruebas tipo para compatibilidad electromagnética (CEM).
- CISPR 22 (UNE EN 55022): Características de perturbaciones electromagnéticas.

Proporcionan procedimientos para la medición de los niveles de señales en el rango de frecuencias de 9 kHz a 400 GHz para equipos de clase A y clase B. Establece requisitos uniformes para el nivel de perturbación, fija los límites de perturbación, describe los métodos de medida y estandariza las condiciones operativas y la interpretación de los resultados.
- CISPR 16 (UNE EN 55016): Aparatos de medida e inmunidad ante perturbaciones radioeléctricas.

Especifica los aparatos de medición de voltaje, corriente y la zona de ensayos. Incluyendo aspectos de calibración y verificación de aparatos de medición. También especifica los métodos para la medición de EMC de alta frecuencia.
- P.O. 12.3: Requisitos de respuesta frente a huecos de tensión en aerogeneradores.

Establece los requisitos mínimos que han de cumplir las protecciones de las distintas instalaciones y tecnologías de producción en régimen especial a efectos de garantizar la continuidad de suministro frente a huecos de tensión.

2.1. Arquitectura del sistema

- El fabricante debe clasificar el SAI según el criterio AAA BB CCC [3], donde:

AAA= Dependencia de la salida respecto de la entrada

VFD (Voltage and Frequency Dependent): La salida es independiente de las variaciones de tensión de alimentación, red, ($\pm 10\%$) y las variaciones de frecuencia ($\pm 2\%$).

VI (Voltage Independent): Tiene que proteger el SAI igual que la VFD, pero además tiene que protegerla ante caídas de tensión.

VFI (Voltage and Frequency Independent): La salida es independiente de las variaciones de tensión de alimentación (red) y las variaciones de frecuencia son controladas dentro de los límites descritos por la norma IEC EN 61000-2-2. Además, debe proteger la carga contra los efectos negativos de estas variaciones sin descargar las baterías.

BB= Forma de onda de salida

La primera letra describe el comportamiento en modo normal o de bypass y la segunda letra en modo de almacenamiento de energía.

S: Forma de onda de tensión sinusoidal con una distorsión de armónicos $\leq 8\%$, ante cargas lineales y no lineales.

X: Forma de onda sinusoidal y no sinusoidal. Coincide con la "S" en cargas lineales, pero no con cargas no lineales.

Y: Forma de onda no sinusoidal.

CCC=Prestaciones dinámicas de la salida

Describe la variación de tensión debida a:

-cambios de modo de operación (primer carácter)

-cambios de cargas lineal de forma escalonada (segundo carácter)

-cambios de carga no lineal de forma escalonada (tercer carácter)

Según el número 1, 2 o 3, la tensión debe de estar dentro de unos márgenes en los transitorios de duración superior a 0.1 ms especificados en las siguientes figuras.

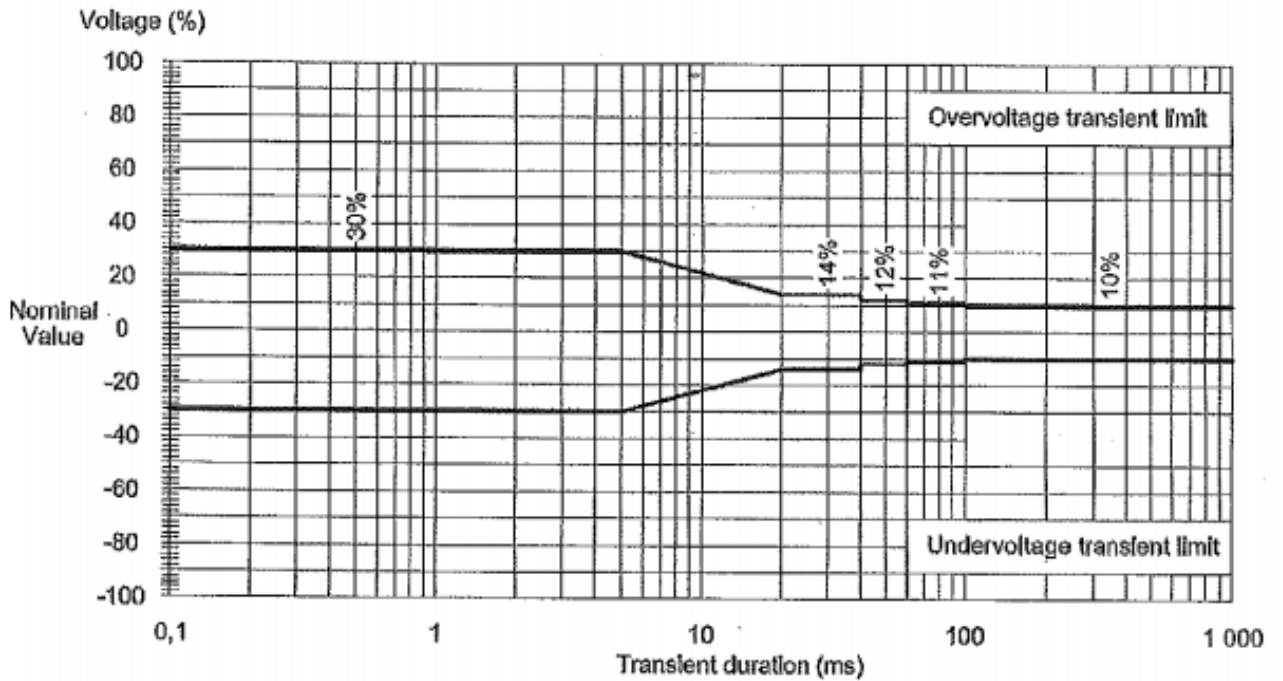


Figura 2-1. Curva 1- Evolución de la tensión de salida para clasificación 1 [3].

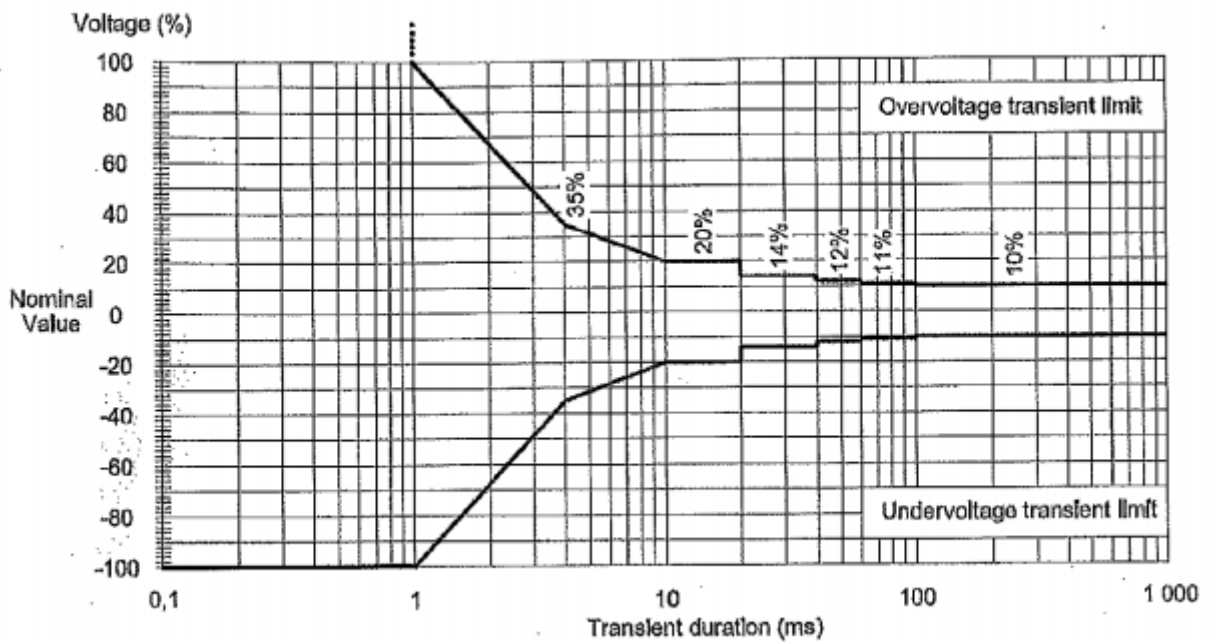


Figura 2-2. Curva 2- Evolución de la tensión de salida para clasificación 2 [3].

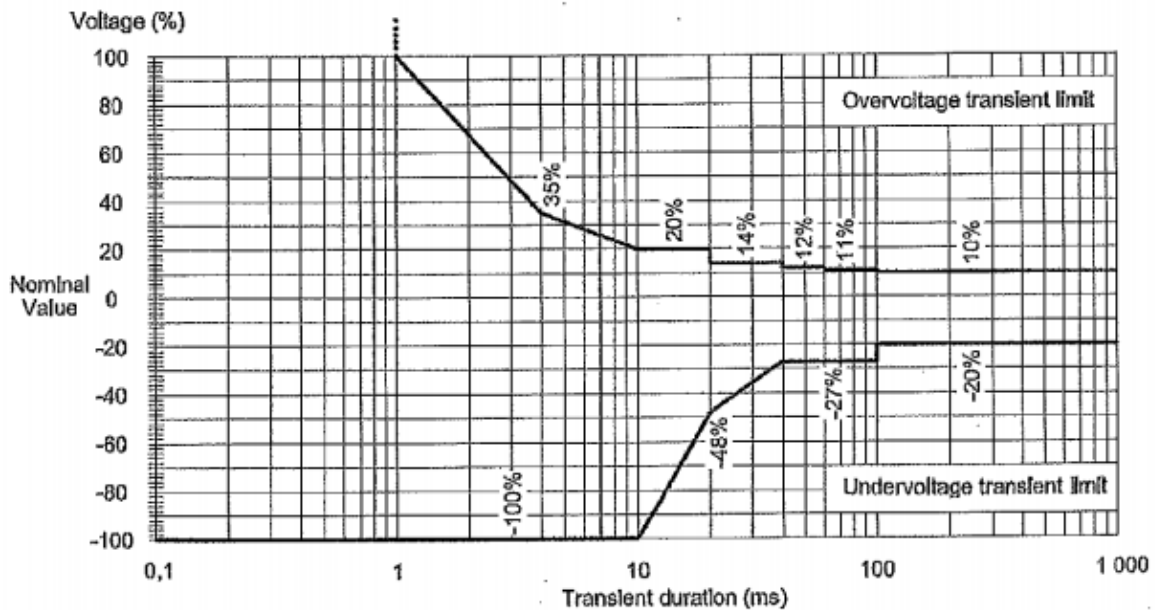


Figura 2-3. Curva 3- Evolución de la tensión de salida para clasificación 3 [3].

La Curva 1, representada en la Fig.2-1, es la más restrictiva debido a que permite una variación del $\pm 30\%$ hasta los 5ms y a partir de 100ms del $\pm 10\%$. La Curva 2, que se muestra en la Fig.2-2, es más permisiva en el primer milisegundo ya que permite tanto sobretensiones superiores al 100% como la ausencia de tensión. Por último, la Curva 3, véase en la Fig.2-3, tiene límites muy similares a la Curva 2, siendo más permisivo en subtensiones.

El SAI de Saprem es sistema de doble conversión con bypass y está catalogado como VFI-SS-111, es decir, su salida es independiente de las variaciones de tensión de alimentación (red). La forma de onda de tensión es sinusoidal con una distorsión de armónicos $\leq 8\%$. Y en los transitorios la tensión debe de permanecer entre los límites de la Curva 1 que se muestra en la Fig. 2-1.

- Eficiencia SAI: Cuando la energía que alimenta la carga tiene como fuente la red, modo normal de operación, el SAI debe de trabajar con una eficiencia mínima que viene dada en la norma IEC 62040-3, recogida en la Tabla 3-2.
- Diagrama de bloques: Atendiendo a los requisitos iniciales, como se muestra en la Fig.2-4, Saprem elaboró una primera propuesta de arquitectura hardware.

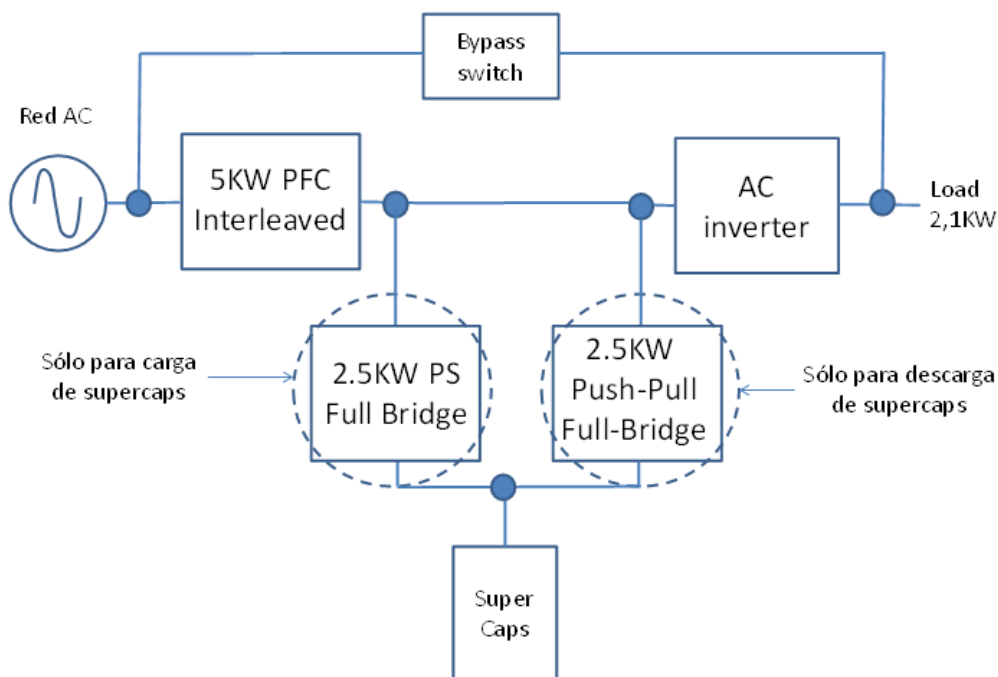


Figura 2-4. Arquitectura hardware del sistema.

En la Fig.2-4 no está representado el módulo proceso que se encarga de gestionar el estado de cada uno de los bloques funcionales, así como el estado de la red eléctrica. Controla por defecto el modo normal de trabajo del SAI (conexión serie entre bloques AC/DC y DC/AC).

En la Fig.2-4 el módulo de inyección a red está formado por los dos PS Full Bridge de 2.5kW y gestiona la conversión de la energía a través del bloque DC-DC bidireccional en modo elevador (PS Full Bridge, carga) y del bloque DC-AC (Interleaved). Este último tiene una potencia de 5kW para poder estar alimentando a las cargas y cargando los condensadores al mismo tiempo.

En la Fig.2-4 el módulo de carga y monitorización de los ultracondensadores está formado por el PS Full Bridge y el Push-Pull/Full Bridge y gestiona el proceso su carga a través de dos convertidores de tipo Full-Bridge, uno dedicado en exclusiva al proceso de carga y otro dedicado al proceso de descarga.

- Otra parte importante del sistema son los ultracondensadores que se utilizan a modo de baterías. Son del rango de 300F a 3000F. En función de la energía a almacenar, se decidirá el número de ultracondensadores agrupados en serie. Se prima la topología en serie para minimizar la gestión de la corriente de carga/descarga. Como valor inicial, se fija una tensión en torno 96VDC para el conjunto de los ultracondensadores.

2.2. Características de los distintos módulos

Módulo proceso

- Entrada de red eléctrica: 230Vac \pm 10%
- Frecuencia de red eléctrica: 50Hz y 60Hz \pm 6%
- Distorsión armónica de entrada THD: < 8%
- Soporta niveles de perturbaciones descritos en IEC62040-2

Módulo de inyección a red (parte de carga)

- Tensión de carga: 230Vac \pm 5%
- Frecuencia de carga: 50Hz y 60Hz \pm 1%
- Potencia de carga: 2100W (3000VA) FP=0.7
- Distorsión armónica de salida THD: < 8%
- Soporta niveles de perturbaciones descritos (EMC) en IEC62040-2

Módulo de carga y monitorización de ultracondensadores

- Tiempo de back-up en tensión: 25 segundos
- Corriente máxima de carga: potencia máxima \leq 2100W
- Estructura del pack de ultracondensadores: 36 unidades en serie

2.3. Requisitos de funcionamiento del producto

Temperatura ambiente de funcionamiento: -40°C...+70°C.

Humedad relativa: 20% ... 80%

Tiempo de vida > 10 años.

- Nivel de potencia: máxima 2100W
- Nivel de descarga de los ultracondensadores: 70%
- Temperatura de funcionamiento promedio +40°C

Con todos estos parámetros quedan definidas al completo las características del SAI.

3. MARCO NORMATIVO

La normativa que regula los requisitos que deberá de cumplir un SAI en España es la EN 62040: Sistemas de alimentación ininterrumpida (SAI). Esta normativa está dividida en tres apartados de los cuales el proyecto se centrará en los dos más importantes, el apartado dos y el tres.

Estos dos apartados modelan los ensayos a realizar para especificar los requisitos de funcionamiento y prueba de un SAI completo que están detallados en la IEC 62040-3. Y la compatibilidad electromagnética, ensayos para emisión e inmunidad que están detallados en la IEC 62040-2.

3.1. 62040-3: Método de especificación de los requisitos de rendimiento y prueba

Dentro de la norma se ha dividido en dos los ensayos que se describen.

Ensayos rutinarios: Se realizarán ensayos rutinarios a cada SAI para verificar que se cumplen los requisitos de la norma. Las pruebas de rutina generalmente se realizan antes de la entrega, al comprador.

Ensayos tipo: Se realizarán ensayos tipo a un SAI que representa una serie de productos iguales. Los ensayos tipo están destinados a asegurar que dichos productos idénticos cumplan sus especificaciones del fabricante y los requisitos de la norma.

Estos últimos ensayos se dividen a su vez según la compatibilidad del suministro AC, con carga lineal, carga no lineal y de almacenamiento. Y se caracterizan con una “E”, ensayos de especificación, aquellos en los que se va a validar una característica definida por el fabricante o con una “H”, ensayos de homologación, que sirven para comprobar si el SAI opera dentro de las restricciones que marca la norma en los distintos modos de operación.

3.1.1. Compatibilidad del suministro en AC. Entrada

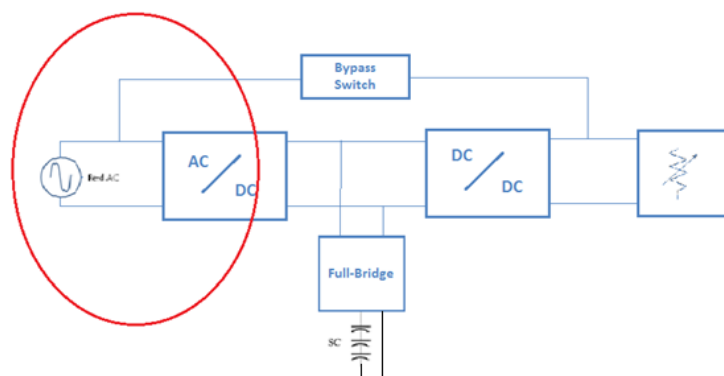


Figura 3-1. Entrada de SAI. Conexión a red.

La fuente de alimentación de a.c. debe presentar la distribución (TN, TT o IT) definida y ser capaz de mantener la curva de tensión dentro de los límites que marca la IEC 61000-2-2 cuando el SAI opera en modo normal y potencia aparente de salida nominal y de proporcionar variación de frecuencia y tensión de $\pm 2\%$ y $\pm 10\%$ respectivamente.

A continuación, se numeran y describen todos los ensayos a realizar, denominándolos como de homologación (H) o especificación (E).

Ensayo 1.H: Tolerancia al valor estacionario de la tensión del lado de red:

Con el SAI en modo de operación normal y con una frecuencia de entrada igual a la nominal (50Hz), la tensión de entrada se varía entre el mínimo y el máximo valor definido por la tolerancia especificada. El SAI debe permanecer en modo normal de operación en el rango de tensión especificado con la capacidad de recargar la batería.

Se medirá la tensión de salida del SAI y se registrará su tolerancia a la tensión de entrada nominal, mínima y máxima.

Para este ensayo se requiere de un generador de red, para poder variar la tensión de alimentación, se puede realizar también con el circuito que simula un hueco de tensión que se diseña en apartados posteriores. Se conecta a la salida del SAI una carga que consuma 3000KVA, además de un osciloscopio que nos permita medir la tensión a la salida.

Ensayo 2.H Tolerancia de la frecuencia de entrada

Se repetirá el test anterior, pero variando la frecuencia, entre los valores que ha marcado el fabricante ($\pm 6\%$ mayores de los que indica la norma $\pm 2\%$), conjuntamente con la tensión. El SAI debe seguir trabajando en el modo normal.

Cuando la frecuencia de salida del SAI se haya sincronizado con la frecuencia de entrada, se debe comprobar el grado de sincronización, determinado por el máximo desfase entre la salida del inversor y la tensión de salida mientras la frecuencia de este último varía de la forma más rápida posible.

Se necesita de un generador de red capaz de variar la frecuencia, equipo del que no disponemos, por ello este ensayo queda fuera de este proyecto. Otra posibilidad sería utilizar una maquina asíncrona para conseguir una frecuencia variable, controlando la velocidad de giro de la misma.

Ensayo 3.E: Pico de corriente de arranque

Se deben realizar dos ensayos secuencialmente, el primer ensayo se realiza tras una ausencia de la tensión de entrada de al menos 5 min. El test consecutivo a este se realiza tras una ausencia de la tensión de red de 1 s.

Para el propósito de este test se ignoran los picos de corriente iniciales, de menos de 1ms, que se atribuyen a la carga de los condensadores

El ensayo se repetirá el nº suficiente de veces para obtener el peor caso.

Se realizará conectando el SAI a la red, y con potencia nominal del lado de carga. La ausencia de tensión se provocará desconectando la red del SAI. Se utilizará un osciloscopio, midiendo la tensión que provoca la corriente al pasar por una resistencia conocida.

Ensayo 4.H: Distorsión armónica de la corriente del lado de red:

Cuando el SAI esté trabajando a potencia nominal, es decir con la carga nominal conectada, se debe medir el contenido armónico de la corriente que absorbe el SAI de la red y comprobar que se encuentra dentro de los límites marcados por el fabricante que en el peor de los casos deberán cumplir los especificados por la norma IEC 61000-3-12 (16 A < SAI ≤ 75 A).

R_{sc} mínimo	Corriente armónica individual admisible						Parámetros armónicos admisibles	
	I_h/I_{ref}^a %						%	
	I_3	I_5	I_7	I_9	I_{11}	I_{13}	THC/I_{ref}	$PWHC/I_{ref}$
33	21,6	10,7	7,2	3,8	3,1	2	23	23
66	24	13	8	5	4	3	26	26
120	27	15	10	6	5	4	30	30
250	35	20	13	9	8	6	40	40
≥ 350	41	24	15	12	10	8	47	47

Los valores relativos de los armónicos pares de orden inferior o igual a 12 no deben sobrepasar 16/h %. Los armónicos pares de orden superior a 12 se tienen en cuenta en el THC y en el $PWHC$ de la misma manera que los armónicos de orden impar.
La interpolación lineal entre valores sucesivos de R_{sc} está permitida.

^a I_{ref} = corriente de referencia; I_h = componente armónica de corriente.

Tabla 3-1. Límites de emisión de corriente para equipos que no sean trifásicos equilibrados [4].

Este contenido de armónicos individual se traduce en un $THD \leq 8\%$

La medida del THD se realizará con un osciloscopio capaz de realizar FFT, o con un analizador de espectros, además necesitaremos las cargas que hacen trabajar al SAI a potencia nominal.

Ensayo 5.E: Factor de potencia

El factor de potencia con el que se absorbe corriente de la red, se mide conectando a la salida la carga nominal con el SAI trabajando en modo normal de energía.

Se verifica este parámetro cuando el factor de potencia medido es igual o mayor que el declarado por el fabricante, en este caso se absorbe energía de la red con un factor de potencia de 1.

Para el ensayo bastará con conectar la carga nominal al SAI y medir con un osciloscopio la tensión y corriente en el lado de red, para calcular el factor de potencia.

Ensayo 6.H: Eficiencia

Es posible que para algunas SAI se alcancen las mejores eficiencias para factores de potencia distintos a la unidad. Sin embargo, en este ensayo se hace trabajar con la carga nominal para un FP=1, capaz de ir variando para hacer trabajar al SAI al 25%, 50%, 75% y el 100% de la potencia activa (W) para la que ha sido diseñada (2100W).

Además, el SAI debe trabajar en modo normal de funcionamiento y todos los subsistemas implicados en este modo también deben estar funcionando. Se tiene que evitar transferir energía al sistema de almacenamiento, para prevenir esto, se desconectarán los ultracaps. El SAI y la carga tienen que operar el tiempo necesario para llegar al régimen estacionario, donde se medirá la eficiencia. Las condiciones de la entrada a.c. deben ser, una tensión entre el 97% y el 103% de su valor nominal y la frecuencia en el rango de 99% y 101% de su valor nominal.

Para la medida de la eficiencia se utiliza un analizador de potencia que tenga una incertidumbre de medida <0.5%. Se ha elegido el modelo YOKOGAWA WT-3000. Se realizan 3 medidas sucesivas, distanciadas unas de otras no más de 15min. La media de estas tres medidas debe cumplir con las especificaciones de la siguiente tabla.

Voltaje V	Load (%)	SAI KVA				
		≥0,3 to <0,8	≥0,8 to <1,5	≥1,5 to <3,5	≥3,5 to <5	≥5 to <10
120/228	25	66,5%	66,5%	72,7%	77,7%	78,3%
	50	67,8%	75,2%	78,9%	80,2%	81,4%
	75	72,7%	77,7%	78,9%	82,6%	83,9%
	100	75,2%	77,7%	80,2%	82,6%	83,9%
230/400	25	73,0%	73,0%	78,0%	82,0%	82,5%
	50	74,0%	80,0%	83,0%	84,0%	85,0%
	75	78,0%	82,0%	83,0%	86,0%	87,0%
	100	80,0%	82,0%	84,0%	86,0%	87,0%
277/480	25	75,7%	75,7%	80,2%	83,8%	84,3%
	50	76,6%	82,0%	84,7%	85,6%	86,5%
	75	80,2%	83,8%	84,7%	87,4%	88,3%
	100	82,0%	83,8%	85,6%	87,4%	88,6%

Tabla 3-2. Parámetros de eficiencia del SAI [3].

Para el ensayo se necesita también las cargas que consuman el 25%, 50%, 75% y el 100% de la potencia nominal que quedan definidas en la Tabla 4-1.

3.1.2. Carga lineal

El fabricante debe especificar el rango de FP de las cargas conectadas al SAI, en este caso FP=0.7.

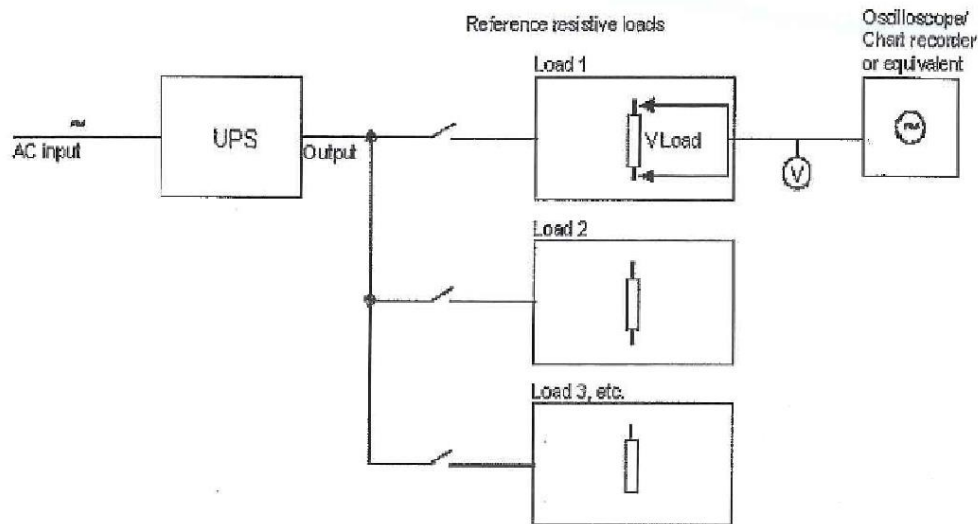


Figura 3-2. Método de ensayo carga lineal [3].

Ensayo 7.H: Modo normal - Sin carga.

Con el SAI trabajando en modo normal, alimentada a su tensión nominal y sin ninguna carga conectada a la salida, se debe de medir el valor rms de la tensión de salida y de sus armónicos y comprobar que están dentro de los parámetros establecidos. Es decir, THD de tensión menor del 8% y una tensión que no difiera en un $\pm 5\%$ de su valor nominal.

Para la medida de la tensión de salida, basta con un osciloscopio capaz de realizar FFT.

Ensayo 8.H: Modo normal – Carga nominal.

Con el SAI trabajando en modo normal, alimentada a su tensión nominal y se conectada a la salida la carga nominal, se debe de medir el valor rms de la tensión de salida y de sus armónicos y comprobar que están dentro de los parámetros establecidos. Es decir, THD de tensión menor del 8% y una tensión que no difiera en un $\pm 5\%$ de su valor nominal.

Se realiza el ensayo tanto para carga capacitiva (circuito R-C en paralelo) como para carga inductiva (circuito R-L en serie). Para la medida de la tensión de salida, basta con un osciloscopio capaz de realizar FFT.

Ensayo 9.H: Modo de almacenamiento de energía - Sin carga.

Con el SAI trabajando en modo de almacenamiento de energía y sin ninguna carga conectada a la salida, se debe de medir el valor rms de la tensión de salida y de sus armónicos y comprobar que están dentro de los parámetros establecidos. Es decir, THD de tensión menor del 8% y una tensión que no difiera en un $\pm 5\%$ de su valor nominal.

Para la medida de la tensión de salida, basta con un osciloscopio capaz de realizar FTT.

Ensayo 10.H: Modo de almacenamiento de energía – Carga nominal.

Con el SAI trabajando en modo de almacenamiento de energía y se conectada a la salida la carga nominal, se debe de medir el valor rms de la tensión de salida y de sus armónicos y comprobar que están dentro de los parámetros establecidos. Es decir, THD de tensión menor del 8% y una tensión que no difiera en un $\pm 5\%$ de su valor nominal.

Se realiza el ensayo tanto para carga capacitiva (circuito R-C en paralelo) como para carga inductiva (circuito R-L en serie). Para la medida de la tensión de salida, basta con un osciloscopio capaz de realizar FTT.

Ensayo 11.H: Componente DC.

La media a lo largo de 10 s de la componente DC de la tensión en el lado de carga debe ser menor del 0.1% del valor rms.

No se especifica en qué modo de operación debe trabajar el SAI ni la carga que tiene que tener a la salida, por lo que se decide que sea trabajando el SAI en modo normal y con carga nominal.

Para medir la tensión se utiliza el dispositivo YOKOGAWA WT-3000.

Ensayo 12.E: Ensayo de sobretensión lado de carga.

Se provoca una sobretensión en el lado de carga y se comprueba que saltan las protecciones que se encargan de proteger el SAI de este fenómeno.

Ensayo 13.E: Ensayo de variación periódica de la V salida (modulación):

Este ensayo solo se realiza si el comprador lo especifica. Se verificará que la tensión de salida no sale de los límites marcados por la Fig.2-1, mientras se hace trabajar al SAI con diferentes cargas y condiciones de operación.

Ensayo 14.E: Sobrecarga - modo normal

Con el SAI alimentando a una carga suave, definida como el 10% de la carga nominal, y trabajando en modo normal, se le aplica una carga resistiva mayor que la carga nominal especificada. Comprobar que el SAI sigue operando en los valores de estacionario que le corresponden.

Además, se debe comprobar que no hay daños en el SAI y que no se alcanzan temperaturas superiores a las deseadas.

Ensayo 15.E: Sobrecarga - modo de almacenamiento de energía

Con el SAI alimentando a una carga suave, definida como el 10% de la carga nominal, y trabajando en modo de almacenamiento de energía y las baterías totalmente cargadas, se le aplica una carga resistiva mayor que la carga nominal especificada. Comprobar que el SAI sigue operando en los valores de estacionario que le corresponden y no sufre daños.

Ensayo 16.E: Capacidad de extinguir una falta - modo normal

Con el SAI trabajando en modo normal, alimentada a su tensión nominal y sin ninguna carga conectada a la salida, se conecta una carga suave si se desea. Se aplica un cortocircuito a través de un fusible o por medio de un circuito con un valor de corriente de acuerdo con las especificaciones del fabricante. El SAI utiliza las protecciones externas, aguas arriba del SAI.

El ensayo se supera si la tensión de salida permanece dentro de los límites marcados por la Fig.2-1.

Ensayo 17.E: Capacidad de extinguir una falta - modo de almacenamiento de energía

Se repite el ensayo 16.E pero esta vez en modo de almacenamiento de energía, a no ser que el fabricante o proveedor indique que el SAI no se puede coordinar con dispositivos de protección externos en este modo de operación.

Ensayo 18.H: Transición modo normal-modo de almacenamiento de energía.

Con el SAI trabajando en modo normal y con carga nominal se debe interrumpir el suministro de energía de entrada durante al menos 1s en dos situaciones distintas. Cuando la tensión de alimentación esté pasando por 0 y cuando esté pasando por su pico. Se debe comprobar los límites de las tensiones del lado de red y del de carga. Además, se debe medir esta última durante el cambio en las 3 ocasiones, y comprobar que se encuentra en los límites establecidos en la Fig.2-1.

Para realizar el ensayo se necesita el simulador de huecos que se describirá en capítulos posteriores, la carga nominal tanto capacitiva como inductiva y un osciloscopio con dos sondas, una a la entrada y otra a la salida del SAI para medir la tensión.

Ensayo 19.H: Transición modo almacenamiento de energía-modo normal:

Con el SAI trabajando en modo de almacenamiento de energía y a potencia nominal, se reconecta la alimentación (en cualquier momento, no importa en qué valor de tensión). Se debe observar la sincronización del SAI midiendo el ángulo de desfase entre la tensión del lado de carga y del de red (marcado por el fabricante). Comprobar también que los voltajes de entrada y de salida no exceden los límites.

Para realizar el ensayo se necesita el simulador de huecos que permite volver a alimentar la alimentación del SAI en valores nominales en cualquier momento, la carga nominal tanto capacitiva como inductiva y un osciloscopio con dos sondas, una a la entrada y otra a la salida del SAI para medir la tensión.

Ensayo 20.H: Transición modo normal a modo bypass – Sobrecarga.

Cuando el SAI disponga de modo de operación con bypass, que se activa cuando hay una sobrecarga a la salida o un fallo en el inversor, se debe forzar al SAI a entrar en este modo de operación provocando una sobrecarga. Se deben medir las tensiones de entrada y salida, que deben permanecer en los límites establecidos en la Fig.2-1. También se deben controlar cuando el SAI vuelve a trabajar en modo normal, en el transitorio del paso de modo bypass a modo normal.

Para este ensayo se requiere de un osciloscopio con el que medir las ondas de tensión a la entrada y a la salida y una carga que produzca una sobrecarga, carga de 110% de la carga nominal.

Ensayo 21.H: Escalones de carga, modo normal.

Con el SAI trabajando el modo normal y sin carga, se aplica una carga del 100% para la potencia nominal (S) como conjunto de dos cargas, una del 20% y otra del 80%. Aplicar un cambio de carga desconectando la del 80% y comprobar que la tensión de salida no sale de los límites establecidos en la Fig.2-1.

Posteriormente se desconecta la carga del 20% y se comprueba que la tensión siga en los límites.

Para este ensayo se requiere de un osciloscopio con el que medir la onda de tensión a la salida y los elementos pasivos (resistencias, bobinas y condensadores) para conseguir las cargas necesarias.

Ensayo 22.H: Escalones de carga, modo de almacenamiento de energía.

Repetir el proceso del Ensayo 21.H, pero esta vez con el SAI trabajando en modo de almacenamiento de energía.

3.1.3. Carga no lineal

La carga no lineal queda modelizada en el capítulo 4.3 y los circuitos necesarios para los ensayos en el capítulo 5.3.

Los ensayos a realizar para superar la normativa son los siguientes:

Ensayo 23.H: Modo normal, carga completa:

Con el SAI trabajando en modo normal se aplica una carga no lineal que consuma la potencia aparente nominal (3000KVA). Se debe medir el voltaje de carga en estacionario, su componente fundamental y sus armónicos y comprobar que cumplen la normativa. Es decir, que la tensión no varíe un $\pm 5\%$ de su valor nominal y el THD $< 8\%$.

Para el ensayo se utilizan las cargas no lineales dimensionadas en la Tabla 4-4 y un osciloscopio capaz de hacer FTT de tensión, con el que medir la onda de tensión a la salida.

Ensayo 24.H: Modo de almacenamiento de energía, carga completa:

Con el SAI trabajando en modo de almacenamiento de energía se aplica una carga no lineal que consuma la potencia aparente nominal (3000KVA). Se debe medir el voltaje de carga en estacionario, su componente fundamental y sus armónicos y comprobar que cumplen la normativa. Es decir, que la tensión no varíe un $\pm 5\%$ de su valor nominal y el THD $< 8\%$.

Para el ensayo se utilizan las cargas no lineales dimensionadas en la Tabla 4-4 y un osciloscopio capaz de hacer FTT de tensión, con el que medir la onda de tensión a la salida.

Ensayo 25.H: Transición modo almacenamiento de energía-modo normal.

Con el SAI trabajando en modo normal y con carga no lineal nominal se debe interrumpir el suministro de energía de entrada durante al menos 1s en dos situaciones distintas. Cuando la tensión de alimentación esté pasando por 0 y cuando esté pasando por su pico. Se debe comprobar los límites de las tensiones del lado de red y del de carga. Además, se debe medir esta última durante el cambio en las 3 ocasiones, y comprobar que se encuentra en los límites establecidos en la Fig.2-1.

Para realizar el ensayo se necesita el simulador de huecos que se describirá en capítulos posteriores, la carga no lineal nominal y un osciloscopio con dos sondas, una a la entrada y otra a la salida del SAI para medir la tensión.

Ensayo 26.H: Transición modo almacenamiento de energía-modo normal:

Con el SAI trabajando en modo de almacenamiento de energía y a potencia nominal, se reconecta la alimentación (en cualquier momento, no importa en qué valor de tensión). Se debe observar la sincronización del SAI midiendo el ángulo de desfase entre la tensión del

lado de carga y del de red (marcado por el fabricante). Comprobar también que los voltajes de entrada y de salida no exceden los límites.

Para realizar el ensayo se necesita el simulador de huecos que permite volver a alimentar la alimentación del SAI en valores nominales en cualquier momento, la carga no lineal nominal y un osciloscopio con dos sondas, una a la entrada y otra a la salida del SAI para medir la tensión.

Ensayo 27.H: Escalones de carga, modo normal.

Para $SAI \leq 4kVA$ (en el lado de carga):

Inicialmente el SAI está trabajando en modo normal sin carga y se le aplican una carga no lineal para obtener a la salida el 25% S_{nom} . Tras esto, se le aplica una carga adicional hasta que se obtenga el 75% S_n de la salida. Posteriormente, se desconecta dicha carga adicional.

Se deberá medir en todo momento la desviación del transitorio de tensión de salida y comprobar que no sale de los límites marcados en la Fig.2-1.

Para realizar el ensayo se necesitará el circuito que se muestra en la Fig.5-1 y un osciloscopio para medir la tensión en el lado de carga.

Ensayo 28.H: Escalones de carga, modo de almacenamiento de energía.

Repetir el proceso del Ensayo 27.H, pero esta vez con el SAI trabajando en modo de almacenamiento de energía.

3.1.4. Almacenamiento

En la Fig.3-3 se ve la parte del SAI que se va a poner a prueba en los ensayos de este apartado.

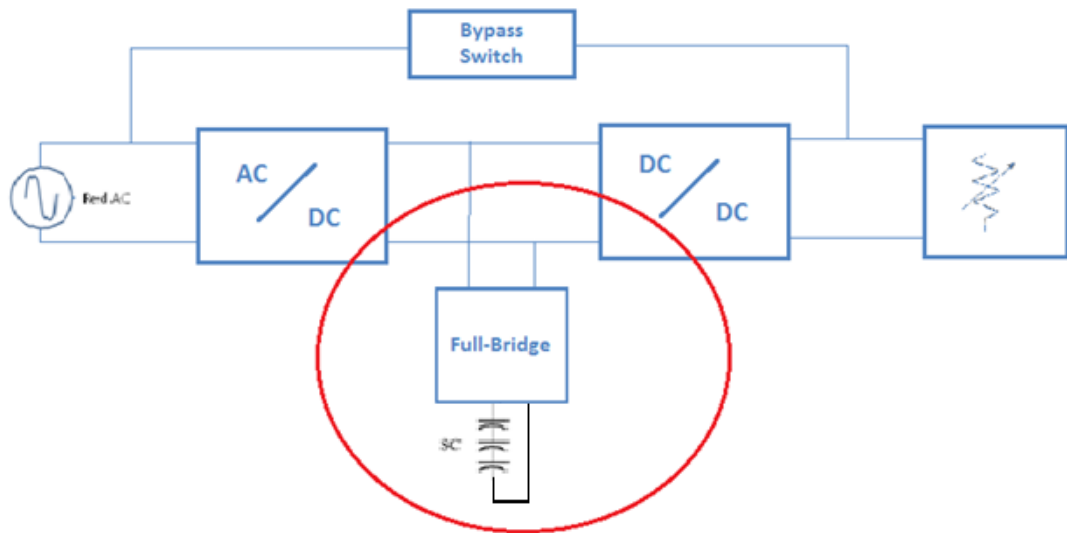


Figura 3-3. Lado de las baterías en el SAI.

Los ensayos a realizar son los siguientes:

Ensayo 29.H: Tiempo de almacenamiento de energía:

Con la carga lineal nominal conectada y asegurando una temperatura en la batería 25°C, se interrumpe la tensión de red para forzar el modo de almacenamiento de energía. Se debe medir el tiempo de modo almacenamiento de energía hasta que el SAI se apague, se agote la energía en los ultracaps.

Comprobar que el tiempo de back-up es realmente de 25s y que la tensión del lado de carga no supera el THD<8% ni salimos de los valores de la Fig.2-1 en el transitorio. Medir también la tensión durante todo el ensayo y comprobar que está dentro del límite del $\pm 5\%$.

Para este ensayo además de necesitar la carga nominal, se requiere del analizador de potencias YOKOGAWA WT-3000 para medir la tensión y el tiempo, además de un termopar y un datalogger (AGILENT 34970 A) para medir la temperatura en la batería. Otra opción para medir el tiempo y la tensión durante tanto tiempo es incorporar a un osciloscopio el Picoscope 2205A.

Ensayo 30.H: Tiempo de restablecimiento de la energía:

Tras el ensayo 29.H, en el que el SAI ha quedado en modo de almacenamiento de energía, volver a aplicar el suministro de red y operar en modo normal, con Snom a la salida y medir la máxima corriente de entrada.

Tras acabar el tiempo de carga de la batería, 25s en este caso, repetir el ensayo 29.H y comprobar que el tiempo de descarga no difiera en un 90% ($25s \pm 2,25s$).

Para este ensayo se necesitarán lo mismo dispositivos de medida que para el ensayo 29.H.

Ensayo 31.E: Medida del rizado de corriente en la batería:

Con el SAI trabajando en modo normal y la batería totalmente cargada, medir para distintas potencias el rizado de la corriente que alimenta las baterías.

3.2. 62040-2: Requisitos de compatibilidad electromagnética

En este apartado de la normativa se regulan las emisiones electromagnéticas que puede dar el SAI a los aparatos a los que va conectados y de su entorno y la capacidad del SAI de funcionar adecuadamente en distintas condiciones, inmunidad.

3.2.1. Conceptos teóricos

En primer lugar, hay que clasificar el SAI como marca la norma según el entorno y su categoría, corriente nominal de salida.

Según el entorno:

- Primer entorno, incluye zonas residenciales, comerciales e iluminación industrial conectada mediante transformador o directamente a la red de baja tensión.
- Segundo entorno, incluye todos los comercios, iluminación industrial y establecimientos industriales.

Según la categoría:

- Categoría C1: incluye a todas los SAI que pertenecen al primer entorno sin ningún otro tipo de restricción.
- Categoría C2: incluye a los SAI que pertenecen al segundo entorno con una corriente de salida que no supere los 16A.
- Categoría C3: incluye a los SAI que pertenecen al segundo entorno con una corriente de salida superior a los 16A.
- Categoría C4: esta categoría incluye aquellos SAI que se encuentran en entornos complejos y con límites de emisiones e inmunidad marcados por un acuerdo entre fabricante y comprador.

Por lo tanto, el SAI diseñada por Saprem queda definida como categoría C2, debido a que tiene una potencia de salida de 2100W y una tensión eficaz de 230V y por ello una corriente que no supera los 16 A.

3.2.2. Ensayos de emisión

Existen dos tipos de emisiones, las conducidas que van del rango de 0,15-30MHz y las radiadas de 30-1000 MHz.

Los ensayos se realizarán bajo las siguientes condiciones

- A voltaje de entrada nominal.
- En modo normal y modo de almacenamiento de energía.
- Cargas lineales que proporcionen el mayor nivel de interferencia.

Ensayos de emisiones conducidas

Ensayo 1: Emisiones conducidas a la red

El SAI no debe superar los límites de emisiones marcados en la normativa que se recogen en la siguiente tabla:

Rango de frecuencia MHz	Limits dB(μ V)			
	Categoría C1		Categoría C2	
	Quasi-peak	Average	Quasi-peak	Average
0,15 to 0,50	65 to 56 ^a	56 to 46 ^a	79	66
0,50 to 5 ^b	56	46	73	60
5 to 30	60	50	73	60

a El límite decrece linealmente con el logaritmo de la frecuencia
b El límite inferior se aplica al cambio de frecuencia

Tabla 3-3. Límites de interferencia de voltaje en el rango de frecuencias de 0.15MHz a 30MHz [5].

Como nuestra SAI es de categoría C2 las emisiones deben de estar por debajo de los límites que marcan la Fig.3-4 y la Fig.3-5:

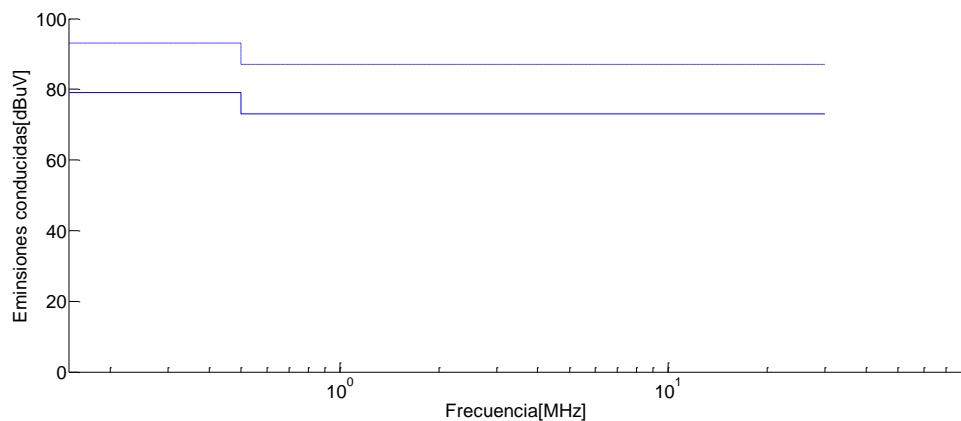


Figura 3-4. Límites de interferencia de voltaje, valor quasipico.

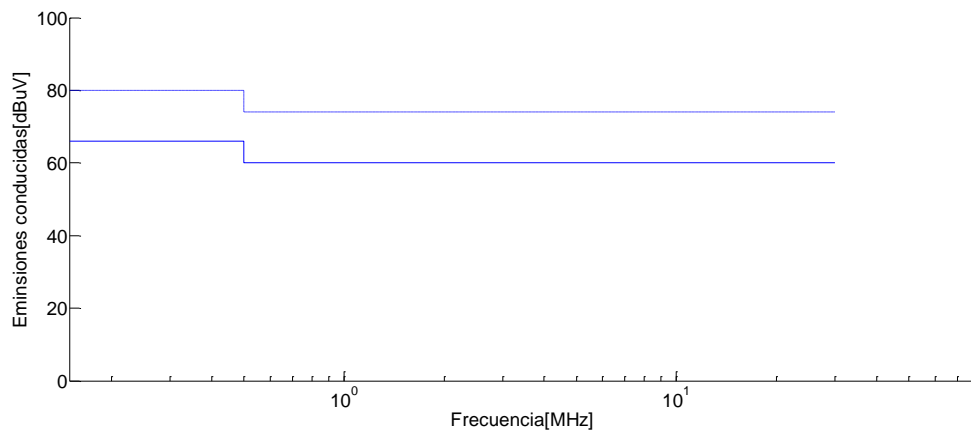


Figura 3-5. Límites de interferencia de voltaje, valor medio.

Donde las unidades de decibelios microvoltio (dBuV) son:

$$\text{dB}\mu\text{V} = 20 \log (V \cdot 10^6) \quad (3.1)$$

Y los valores Cuasi-pico (QP) y el valor medio (AVG) se obtienen a partir de:

$$\text{QP}(\text{dB}\mu\text{V}) = \text{PK}(\text{dB}\mu\text{V}) - 6 \text{ dB} \quad (3.2)$$

$$\text{AVG}(\text{dB}\mu\text{V}) = \text{QP}(\text{dB}\mu\text{V}) - 10 \text{ dB} \quad (3.3)$$

Para la medida de los valores quasi-pico y el valor medio se utilizan los aparatos con las características definidas en la CISPR 16, una red artificial de $50\Omega/50\mu\text{H}$ [6]. La función de la LISN es impedir que las componentes de alta frecuencia de la corriente (en el rango de frecuencias que se quiere medir) vayan hacia la red y obligar a que circulen por el aparato de medida [7].

Se han desarrollado dos opciones para realizar esta red artificial:

Opción-1: Red monofásica+LISN

Para la medida de la tensión, que posteriormente se pasará a dBuV, se debe conectar el inversor a la red por medio de un dispositivo llamado LISN (Line impedance stabilization network). Se debe colocar una en la fase y otra en el neutro.

Por definición una LISN es una red de resistencias, inductancias, y condensadores que forma una impedancia variable con la frecuencia. Su circuito habitual y que cumple con las especificaciones de la CISPR 16 [7].

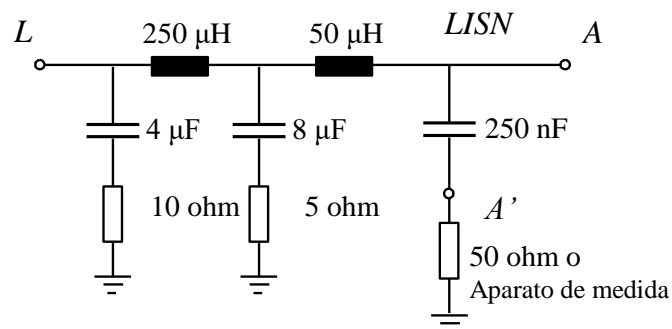


Figura 3-6. Circuito de una LISN [7].

Donde:

- A: terminal del dispositivo a prueba (DUT).
- A': terminal de conexión del aparato de medida (analizador de espectros) o resistencia de terminación de línea de 50 Ω.
- L: terminal de conexión a la red.
- Potencial nulo de referencia (tierra).
- El aparato de medida es un *analizador de espectros* que calcula el valor deseado de cada componente de tensión (PK, QP o AVG) y suma todos los componentes comprendidos en un rango de medida de ± 4500 Hz respecto a la frecuencia de medida.

Opción-2: AMN

AMN, una red artificial de alimentación sirve para [4]:

- Obtener una impedancia de radio frecuencia definida en los bornes del equipo sometido a ensayo.
- Aislar el circuito de ensayo de las señales RF (radio frecuencias) no deseadas en el suministro de red.
- Acoplar la tensión perturbadora al receptor de medida.

El circuito que indica la IEC EN 55016-1-2, equivalente a la CISPR 16 para una AMN es el siguiente:

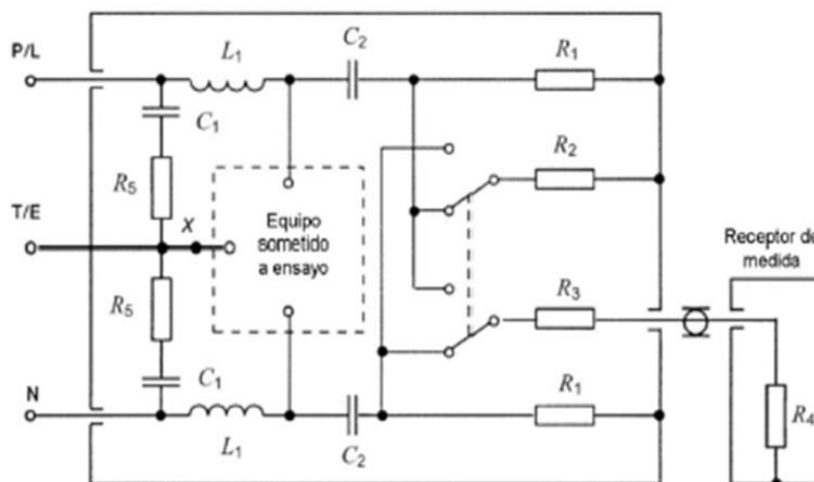


Figura 3-7. Esquema de una AMN [8].

También define los valores de las diferentes inductancias, resistencia y condensadores que componen la AMN, como se muestra en la Tabla 3-4.

Componente	Valor
R_1	1 000 Ω
R_2	50 Ω
R_3	0 Ω
R_4	50 Ω (impedancia de entrada del receptor de medida)
R_5	0 Ω
C_1	1 μF
C_2	0,1 μF
L_1	50 μH

Como C_1 tiene una capacidad elevada, conviene, por razones de seguridad, bien colocar sólidamente a la tierra de referencia el chasis de la red, o bien utilizar un transformador de aislamiento.

Tabla 3-4. Dimensionamiento de cargas para una AMN [8].

En los ensayos de EMC es importante las distancias entre los distintos elementos del sistema por lo que la norma especifica como debe ser el montaje del banco de ensayos, diferenciando entre si el SAI van instalada en el suelo Fig.3.8 o va localizada a cierta altura Fig.3.9.

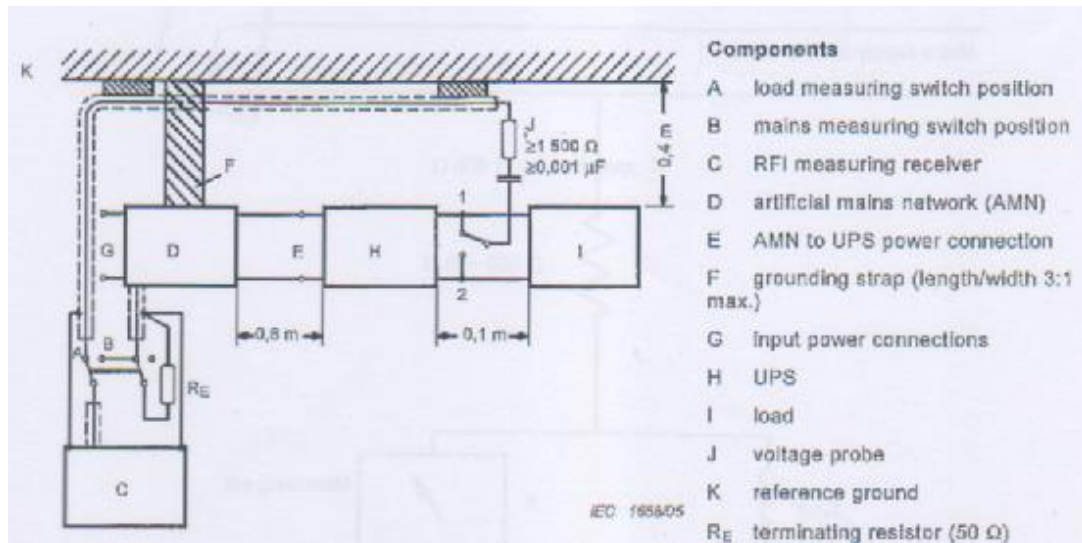


Figura 3-8. Configuración de los elementos para la medida de emisiones conducidas para SAI en el suelo [5].

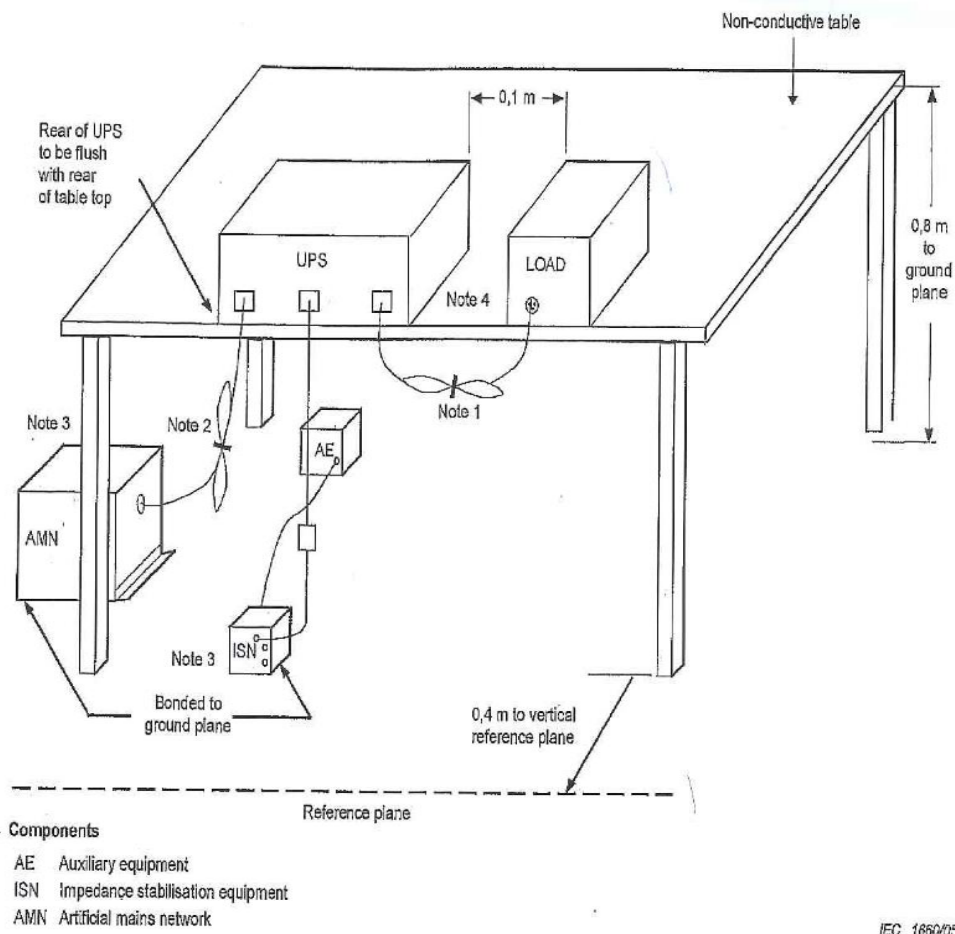


Figura 3-9. Configuración de los elementos para la medida de emisiones conducidas para SAI en altura [5].

Ensayo 2: Emisiones conducidas en el lado de carga

Para el lado de carga se aplican los mismos límites que en el ensayo anterior, pero se permite una tolerancia de +14dB. Los límites están indicados en la Fig.3-4 y Fig.3-5 con la línea discontinua.

En este caso el aparato de medida viene especificado por la propia norma en el Anexo A de la IEC-62040-2 que además de medir estandariza la impedancia a tierra, y es el siguiente:

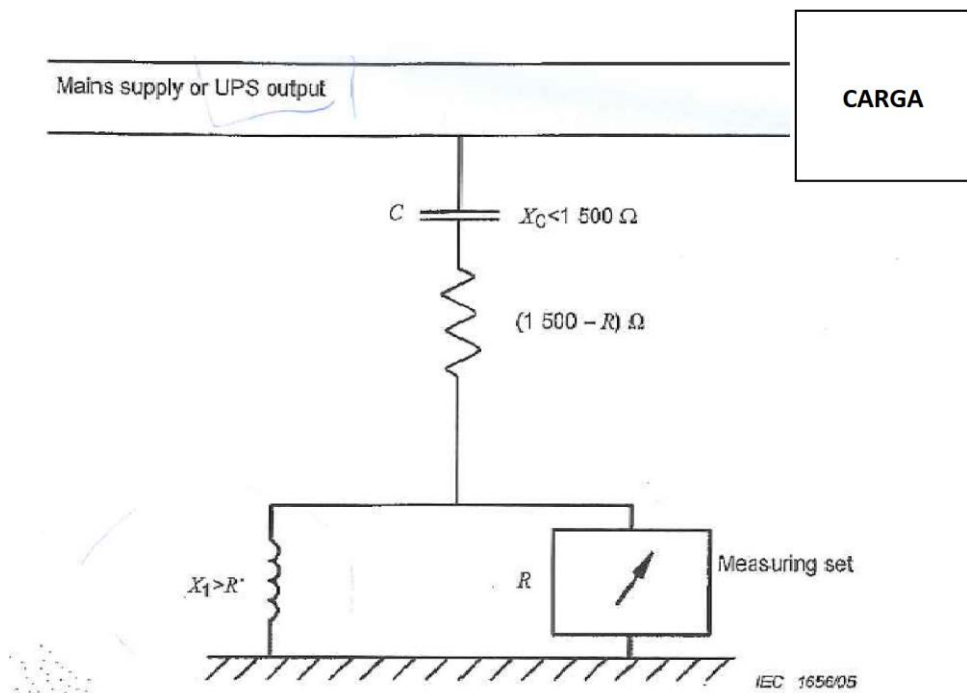


Figura 3-10. Circuito de medida de emisiones conducidas en el lado de carga [5].

Ensayos de emisiones radiadas

Ensayo 3: Emisiones radiadas en el lado de red (campo electromagnético)

El SAI debe cumplir con los límites especificados en la Tabla 3-5 si la lectura muestra fluctuaciones cerca del límite, se debe de seguir midiendo durante 15s a dicha frecuencia.

Rango de frecuencia MHz	Quasi-peak limits dB (μV/m)		
	Categoría C1	Categoría C2	Categoría C3
30 to 230	30	40	50
230 to 1000	37	47	60

Tabla 3-5. Límites de emisiones radiadas en el rango de 30MHz a 1.000MHz [5].

Para realizar las medidas se requiere del siguiente montaje:

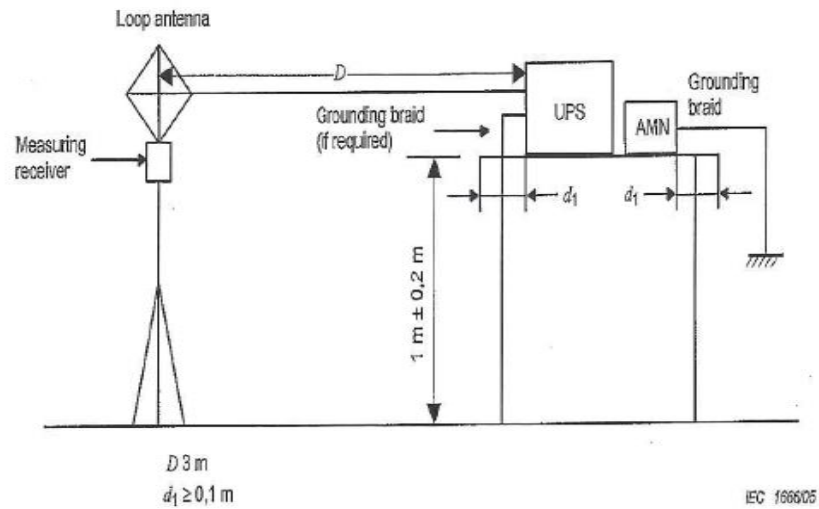


Figura 3-11. Esquema del montaje para medida de emisiones radiadas.

Debido a que no se disponen de los equipos necesarios para la medida y no es nuestro campo de aplicación, campo de telecomunicaciones, descartamos estos ensayos de la bancada de pruebas. Para superar este tipo de ensayos existe en Navarra una empresa llamada CEMITEC.

3.2.3. Ensayos de inmunidad

Los ensayos de inmunidad solo cubren el rango de frecuencias de 0Hz a 1GHz, los requisitos que exigen representan requisitos esenciales de inmunidad de compatibilidad electromagnética.

Los ensayos se realizarán bajo las siguientes condiciones

- A voltaje de entrada nominal.
- En modo normal de funcionamiento.
- Cargas lineales que hagan trabajar al SAI a potencia activa nominal o a carga suave (10% de la carga nominal).

Ensayo 4. Requisitos de inmunidad básicos – Altas frecuencias

Port	Fenómeno	Métodos test estandar	Nivel	Criterio de aceptación
Encapsulado SAI	ESD (distorsión electrostática)	IEC-61000-4-2	4kV CD a 8KV AD	B
	Radio frecuencias campo electromagnético, amplitud modulada	IEC-61000-4-3	80 to 1000MHz 10 V/m 80 % AM (1KHz)	A
Puerto de AC (entrada y salida)	Ráfaga de transitorios rápidos	IEC-61000-4-4	2KV/5 kHz	B
	Sobretensión 1,2/50 us, 8/20 us	IEC-61000-4-5	1kV 2 KV	B
	Radiofrecuencias conducidas en modo común	IEC-61000-4-6	0,15 to 80 MHz 10 V/m 80 % AM (1KHz)	A
Puerto de DC	Ráfaga de transitorios rápidos	IEC-61000-4-4	2KV/5 kHz	B
Puerto de señales y control	Ráfaga de transitorios rápidos	IEC-61000-4-4	2KV/5 kHz	B
	Sobretensión 1,2/50 us, 8/20 us	IEC-61000-4-5	1kV Fase-Fase	B
	Radiofrecuencias conducidas en modo común	IEC-61000-4-6	0,15 to 80 MHz 10 V/m 80 % AM (1KHz)	A
CD= descarga directa AD=descarga por aire AM=amplitud de modulación				

Tabla 3-6. Requisitos mínimos de inmunidad.

El criterio A implica que a la tensión de salida se le permite variar solamente en las condiciones de estacionario (≥ 100 ms dentro de los límites marcados en la Fig.2.1). Mientras que el criterio B permite variar la tensión de salida en los transitorios (< 100 ms dentro de los límites marcados en la Fig.2.1).

Ensayo 5: Inmunidad a señales de baja frecuencia

El SAI funcionando debe soportar distorsiones conducidas de baja frecuencia en la red principal de alimentación. En el Anexo D de la norma especifica cómo deben de ser estas distorsiones.

Se modifica la red de alimentación, superponiendo a la onda principal, 230V 50Hz, una señal sinusoidal de 10V de amplitud y una frecuencia que se varía lentamente de 140Hz a 360Hz.

Bajo estas condiciones, el SAI debe de seguir funcionando dentro de los límites establecidos.

Ensayo 6: Inmunidad a señales de baja frecuencia (campo magnético).

El SAI debe soportar distorsiones inducidas por un power-frequency de campo magnético, con una intensidad de campo magnético que se especifica en la norma IEC-61000-4-8: nivel 4 (30 A/m) para categorías C2 y C3

El campo magnético se obtiene mediante la circulación de una corriente por una bobina de inducción. El campo se aplica al SAI por el método de inmersión.

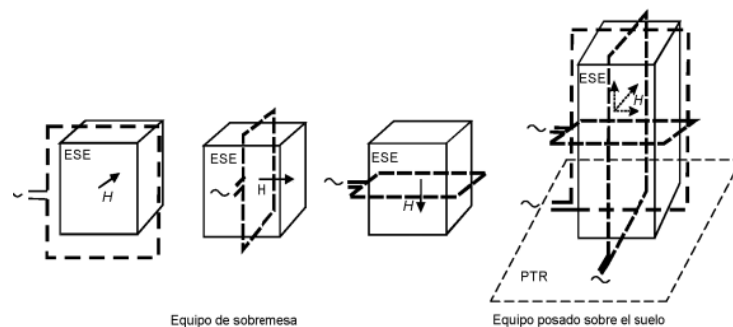


Figura 3-12. Esquema de implementación práctica para la medida de un campo magnético.

El equipo de ensayo comprende la fuente de corriente, la bobina de inducción y la instrumentación aplicada.

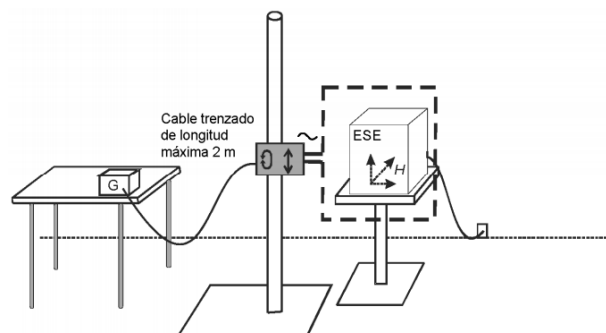


Figura 3-13. Esquema para medir el campo magnético



4. DISEÑO DE ELEMENTO

En este apartado se van a dimensionar todos los elementos necesarios para los ensayos. Los elementos pasivos: resistencias, inductancias y condensadores, los elementos activos: interruptores, puente de diodos. Así como los circuitos de señal necesarios.

4.1. Cargas lineales

De todo el conjunto de los ensayos se obtiene que se necesitan las siguientes cargas lineales:

1. Cargas resistivas del 25%, 50%, 75% y el 100% de la potencia nominal
2. Cargas inductivas y capacitivas de 10%, 20%, 80%, 100% y 110% de la potencia nominal

1. Para calcular los valores de resistencias se utiliza las siguientes ecuaciones:

$$V = R * I \quad (4.1)$$

$$P = V * I \quad (4.2)$$

A partir de (4.1) y (4.2) llegamos a la ecuación que relaciona el valor de la resistencia R, con la potencia disipada en ella P y la tensión U, de alimentación.

$$R = \frac{U^2}{P} \quad (4.3)$$

Sn (%)	100%	75%	50%	25%
Resistencia (Ω)	25,2	33,6	50	100,8
Potencia (W)	2100	1575	1050	525

Tabla 4-1. Valores para el dimensionamiento de cargas resistivas.

2. Para calcular los valores de las inductancias, en primer lugar se debe determinar como son los circuitos. En el caso de carga inductiva, se conectará una resistencia con una inductancia en serie. De esta forma se obtienen menores valores de L equivalente que son más fáciles de obtener de forma práctica. Para la carga capacitiva, se coloca una resistencia y un condensador equivalente en paralelo.

Para el cálculo de carga inductiva se tiene en cuenta un FP=0.7 y se utilizan las siguientes ecuaciones:

$$Z_{eq} = \sqrt{R^2 + X_L^2} \quad (4.4)$$

$$S = \frac{U^2}{Z_{eq}} \quad (4.5)$$

Para el cálculo de las cargas capacitivas además de la ecuación (4.3), se utiliza la siguiente ecuación:

$$X_C = \frac{U^2}{Q} \quad (4.6)$$

De aplicar estas ecuaciones para las distintas potencias se obtiene la siguiente tabla:

S (%)	Carga inductiva		Carga capacitiva	
	Resistencia (Ω)	Inductancia (H)	Resistencia (Ω)	Condensador (μ F)
110%	11,22	0,036	22,9	139
100%	12,46	0,0397	25,19	126
80%	15,43	0,05	31,5	101
20%	61,72	0,2	126	25,3
10%	123,4	0,4	250	12,7

Tabla 4-2. Valores teóricos calculados para carga lineal.

En la práctica solo se emplearán las cargas del 10%, 20%, 25%, 75%, 80%. El resto de cargas se aplicarán en una combinación de las otras, por ejemplo para la de 110% siguiendo el esquema de la Fig.3-2, se conectan las tres ramas, una de 10%, otra de 20% y la última del 80% y se consigue la carga del 110%.

Para estos elementos se busca en la distribuidora Farnell, los elementos con las características deseadas. Como de resistencias y bobinas se dispone en la Universidad solo se buscan condensadores.

Estos condensadores deben soportar la tensión de red 325V, y se sobredimensionan para aguantar hasta 400Vac. Los elementos elegidos son:

Para la carga del 10%: Genteq, modelo 27L572; 370Vac, 12,5uF [9]

Para la carga del 20%: Ducati, modelo 4.16.10.26.14; 450V, 25uF [10]

Para la carga del 80%: Cornell Dubilie, modelo PSU3030; 330V, 33uF (3 conectados en paralelo) [11]

4.2. Interruptores

Para conectar una rama u otra se utilizan interruptores de estado sólido, este tipo de interruptores evitan los rebotes que se producen con interruptores mecánicos. El rebote en un interruptor mecánico es un efecto mecánico-eléctrico que se presenta cuando se abre o cierra un interruptor. Aunque se haya pulsado el interruptor para abrir el circuito existen pequeños rebotes mecánicos, es decir el contacto se cierra y abre varias veces antes de quedar en la posición cerrada final, como muestra la Fig.4-1.

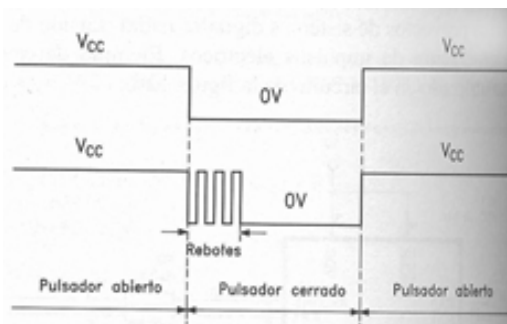


Figura 4-1. Apagado de un interruptor mecánico con rebote.

En nuestros ensayos no se admiten estos rebotes debido a que se desea evaluar el comportamiento del SAI en los transitorios de carga, por lo que se utilizarán interruptores de estado sólido.

Por otro lado, dadas las características del circuito de alterna, se requieren interruptores de cuatro segmentos, corriente y tensión tanto positiva como negativa. En un primer momento se piensa en utilizar un interruptor compuesto por dos ramas en antiparalelo formadas por un IGBT y un diodo, que son dispositivos ampliamente utilizados en electrónica de potencia, especialmente para frecuencias de conmutación altas. En este caso, la frecuencia que se va a utilizar para conmutar es la de red, quedando infrutilizados. En consecuencia, se descarta su uso en busca de otros elementos más adecuados, que supongan un coste más ajustado [12].

Se valora la opción de utilizar tiristores que soporten la tensión de red; estos son los TRIAC (tiristores de corriente alterna). El circuito eléctrico de estos dispositivos es equivalente al de dos tiristores unidireccionales (SCR) conectados en anti-paralelo, pero tienen la ventaja frente a estos de que se controlan a través de una sola puerta.

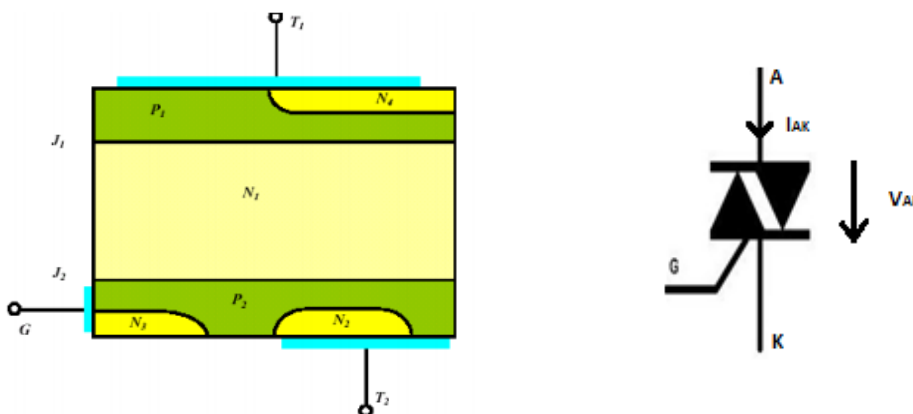


Figura 4-2. Construcción y símbolo del TRIAC.

Funcionamiento

El funcionamiento del TRIAC se puede ver como el de dos tiristores en antiparalelo controlados por la misma puerta G.

Encendido del TRIAC:

Para encender el TRIAC se debe introducir un pulso de corriente I_G de unas decenas de miliamperios y duración de microsegundos. Estos valores quedan limitados por cada TRIAC. Al introducir corriente por la puerta (I_G) se introducen portadores que vuelve la unión J2 conductora. Entonces si V_{AK} es mayor que cero el TRIAC conducirá I_{AK} será positiva, si V_{AK} es negativa la corriente I_{AK} será negativa.

Apagado del TRIAC:

En ausencia de corriente por la puerta G si el TRIAC está conduciendo y I_{AK} es positiva, cuando el semiciclo positivo de la onda V_{AK} se acaba, la corriente I_{AK} se anula y al ser V_{AK} negativo, se extraen las cargas de las uniones J1 y J2 quedando el transistor en corte. Análogo para cuando está conduciendo y I_{AK} es negativa.

Por lo tanto, el circuito externo controla el encendido del TRIAC a partir de la corriente que circula por la puerta G. Se apagará cuando la corriente I_{AK} se anule y no se alimente externamente por la puerta.

Entre sus aplicaciones más comunes destaca como troceador para modificar el valor eficaz de la tensión alterna de la fuente de entrada controlando el ángulo de disparo del TRIAC como se ve en la Fig.4-3.

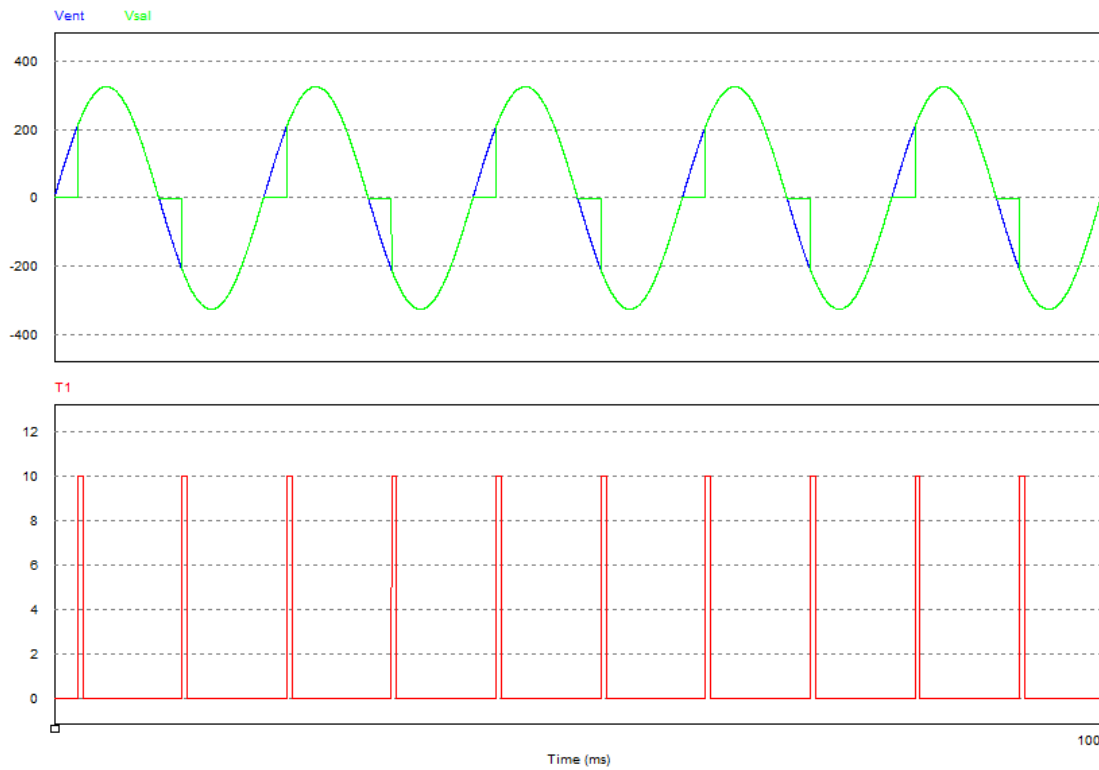


Figura 4-3. Funcionamiento del TRIAC como troceador.

El gráfico de T1 representa la tensión que se le aplica a la puerta G del TRIAC. En el momento que se aplica esta tensión y circular corriente por la puerta G, como el TRIAC ve una tensión positiva o negativa en función del semiciclo en el que se encuentre la tensión que lo alimenta, conduce en un sentido o en otro. Cuando la tensión de entrada (azul) se anula, también se anula la corriente por el TRIAC y este se apaga hasta que se le vuelva a dar la orden de encendido.

En nuestra aplicación se utiliza como interruptor, controlando el momento de disparo. Para ello se alimenta la puerta G con corriente a partir del momento de disparo.

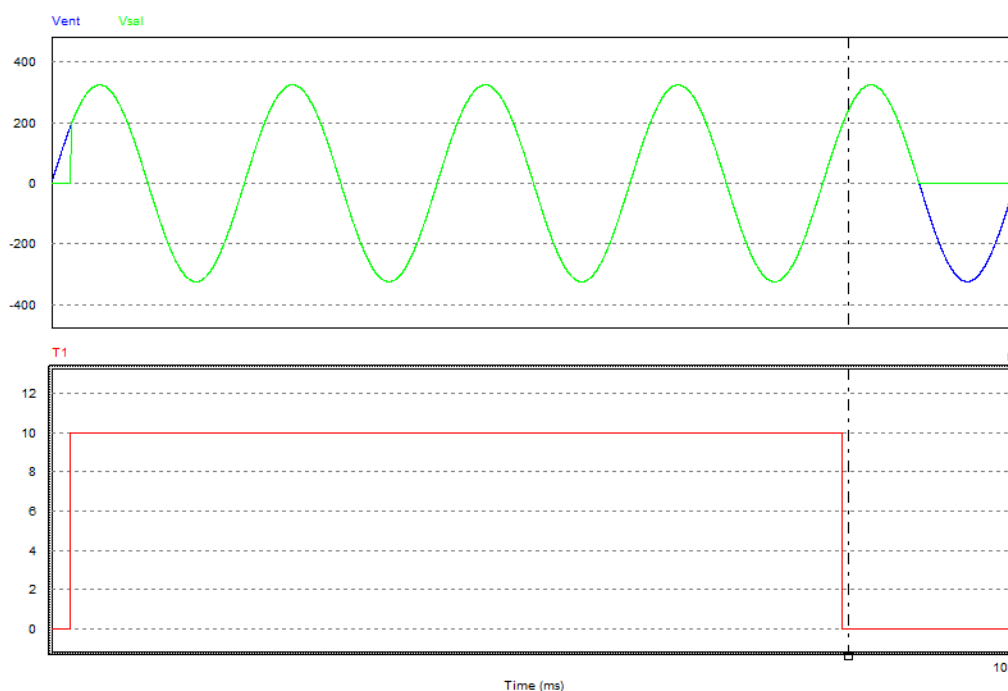


Figura 4-4. Funcionamiento del TRIAC como interruptor.

Alimentando con una tensión constante la puerta G del TRIAC, conseguimos que este no se apague hasta que no se desee tal y como se ve en la Fig.4-4.

Disparo del TRIAC

Para el disparo se utilizará el tiristor DIAC, que es un tiristor bidireccional, esta vez de dos patillas:

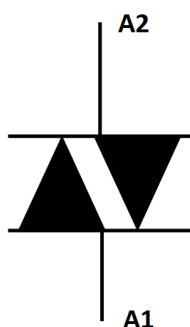


Figura 4-5. Simbología de DIAC.

En esta ocasión no existe el terminal de puerta, siendo el modo de funcionamiento el que se detalla a continuación:

El comportamiento es fundamentalmente el mismo para ambos sentidos de corriente; cuando la tensión en A2 supere el valor de la tensión de cebado o de disparo, entonces la corriente circulará de A2 a A1. Por el contrario, cuando la tensión en A2 sea negativa, y sea inferior a un valor de tensión de cebado dado, entonces la corriente circulará de A1 a A2.

Los dos dispositivos más extendidos para el disparo del TRIAC utilizan un DIAC, y son:

- **Quadrac:** Es un dispositivo que acopla el DIAC y el TRIAC ya conectados. No disponen de aislamiento entre ellos, circuito de señal no está aislado del de potencia, quedando:

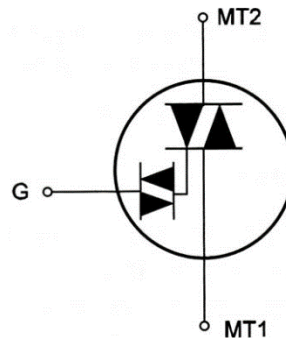


Figura 4-6. Esquema eléctrico de un QUADRAC.

- **Optotriac (optoacoplador + triac):** En esta ocasión, se utilizará un optoacoplador para dar la orden y enviar la corriente de disparo (I_G) al terminal G del TRIAC.

El optoacoplador está compuesto por un diodo LED, que se activará al recibir una señal de alto de un circuito de control. Al recibir la señal luminosa el DIAC se pone en conducción y a través del propio circuito de potencia con la resistencia R2 introduce la corriente de puerta necesaria para encender el TRIAC.

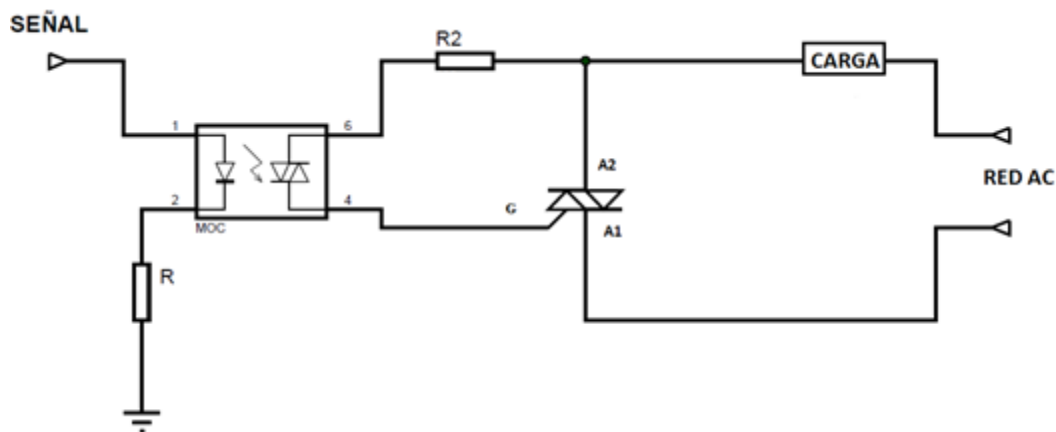


Figura 4-7. Circuito eléctrico de un optoacoplador más TRIAC.

A la hora de elegir el tipo de optoacoplador, hay que tener en cuenta que hay dos tipos, de paso por cero o de paso diferente a cero:

- Paso por cero:

Independientemente del momento en el que se envíe la señal de disparo, no será hasta el próximo paso por cero de la onda senoidal cuando se active el TRIAC. Esta solución permite evitar transitorios y demás ruidos eléctricos.

-Paso por no cero:

En este caso el TRIAC se activará en el momento en el que se active el DIAC, independientemente del paso por cero.

Finalmente, la opción elegida es un TRIAC con un optoacoplador de paso por cero que es el que se encarga de dar las órdenes de disparo, debido a que nos proporciona aislamiento galvánico entre el circuito de potencia y el de señal. El TRIAC deberá soportar una tensión de 325Vac y una corriente máxima de 16 A. Nuevamente se elige un modelo comercial tanto para el TRIAC como para el optoacoplador en la página de Farnell.

TRIAC: STMICROELECTRONICS, modelo BTA 20-600CWRG, 600-700 V, 20 A [13].

Optoacoplador: FAIRCHILD SEMICONDUCTOR, modelo MOC3061M, paso por cero, 600V [14].

4.3. Cargas no lineales

La carga no lineal viene definida en la normativa por el circuito de la Fig.4-8.

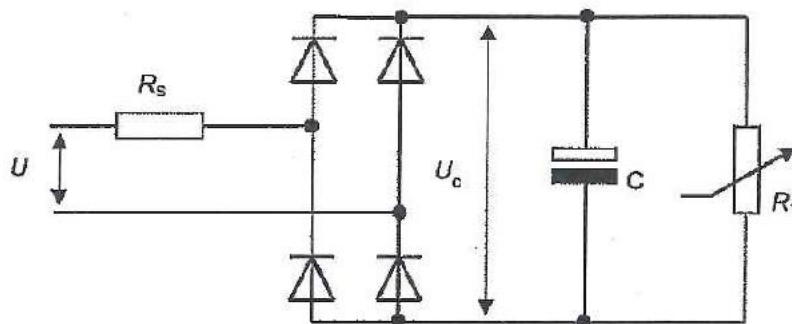


Figura 4-8. Esquema de una carga no lineal [3].

Además, en la propia norma se dan las ecuaciones para el dimensionamiento de los distintos elementos. Las ecuaciones que permiten el cálculo de los elementos de potencia se establecen para un factor de potencia de 0,7 y son los siguientes:

$$U_c = \sqrt{2} * 0,92 * 0,96 * 0,975 * U = 1,22 * U \quad (4.7)$$

$$R_s = 0,04 * U^2 / S \quad (4.8)$$

$$R_1 = U_c^2 / (0,66 * S) \quad (4.9)$$

$$C = 7,5 / (f * R_1) \quad (4.10)$$

Para los ensayos de carga no lineal, se necesitan cargas del 25%, 75% y 100% de la carga nominal. Los resultados se recogen en la Tabla 4-3.

S (%)	Uc (V)	Rs (Ω)	R1 (Ω)	C (mF)
100%	280,1	Rs1=0,705	R11=39,62	C11=3,79
75%	280,1	Rs2=0,94	R12=52,83	C12=2,84
25%	280,1	Rs3=2,82	R13=158,5	C13=0,946

Tabla 4-3. Dimensionamiento carga no lineal según norma IEC-62040-3.

Se simula en PSIM el comportamiento de este circuito y se obtiene que fijando una S=3000KVA, con el circuito y los parámetros de la Tabla 4-3 se consume una potencia superior a la nominal 2100W como se muestra en la Fig.4-9.

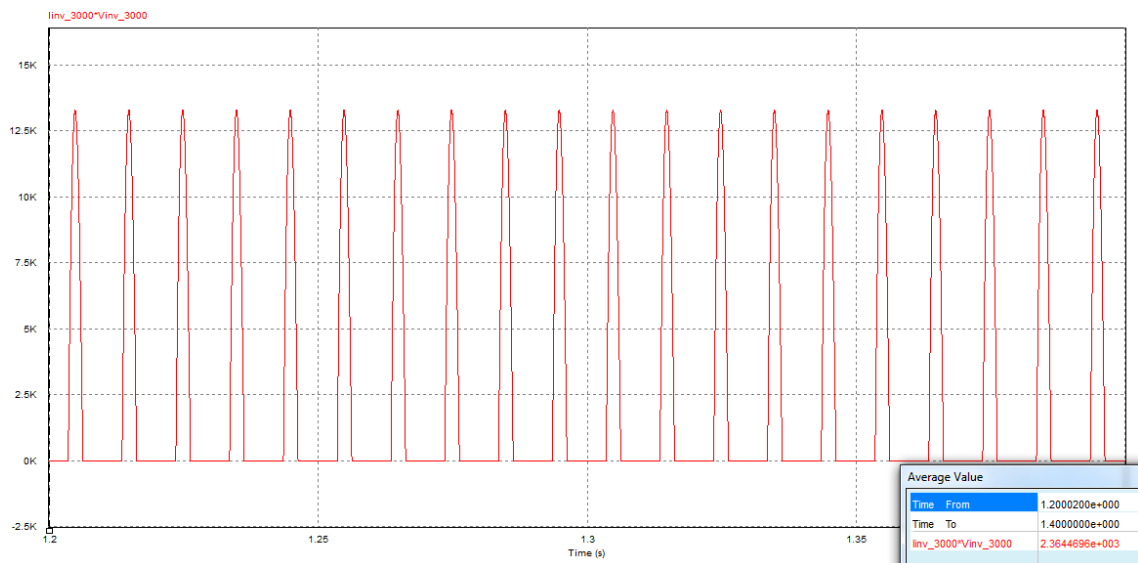


Figura 4-9. Potencia consumida por carga no lineal nominal.

Para calcular el valor de la potencia absorbida por la carga se hace el valor medio de la potencia de la Fig.4-9 obtenida al multiplicar la corriente y la tensión en la carga, dando un valor de 2360W.

Se recalculan los parámetros para una S=2800KVA y se comprueba que esta vez sí se consume la potencia nominal. Obteniendo el dimensionamiento final de los elementos que se muestra en la Tabla 4-4.

S (%)	Uc (V)	Rs (Ω)	R1 (Ω)	C (mF)
100%	280,1	Rs1=0,76	R11=42,6	C11=3,5

75%	280,1	Rs2=1	R12=57	C12=2,64
25%	280,1	Rs3=3,02	R13=170,4	C13=0,88

Tabla 4-4. Parámetros recalculados para carga no lineal.

Se comprueba que con estos nuevos parámetros si se consume la potencia nominal para carga nominal, véase la Fig.4-10.

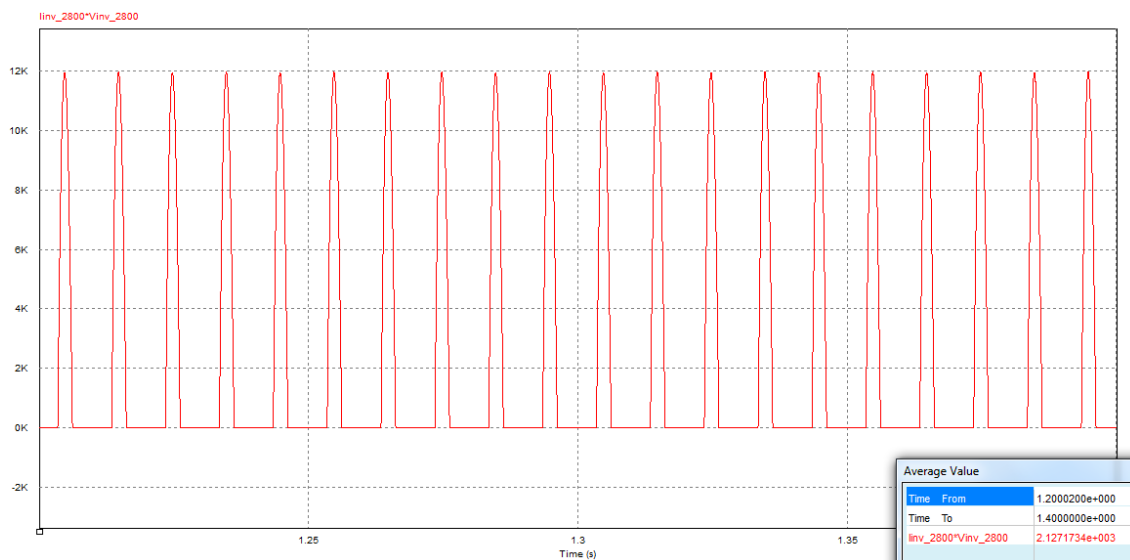


Figura 4-10. Potencia consumida por carga no lineal nominal corregida.

Nuevamente solo se necesita comprar los condensadores para implementar la bancada, en este caso serán condensadores DC, por lo que se decide escoger condensadores electrolíticos que soporten una tensión de 325V, se sobredimensiona a 450V.

Carga del 25%: Multicomp, modelo MCKLZ450M331O50Y, 330uF, 450V [15]

(3 colocados en paralelo)

Carga del 75%: Multicomp, modelo MCKLZ450M331O50Y, 330uF, 450V [15]

(9 colocados en paralelo)

La carga del 100% se consigue conectando simultáneamente la de 25% y 75%.

4.3.1. Puente de diodos.

Para los ensayos de carga no lineal necesitaremos también dos puentes de diodos, uno para la carga de 25% y el otro para la de 75%. Se simula el circuito de carga no lineal en PSIM para ver que corriente y tensión debe de soportar el puente de diodos.

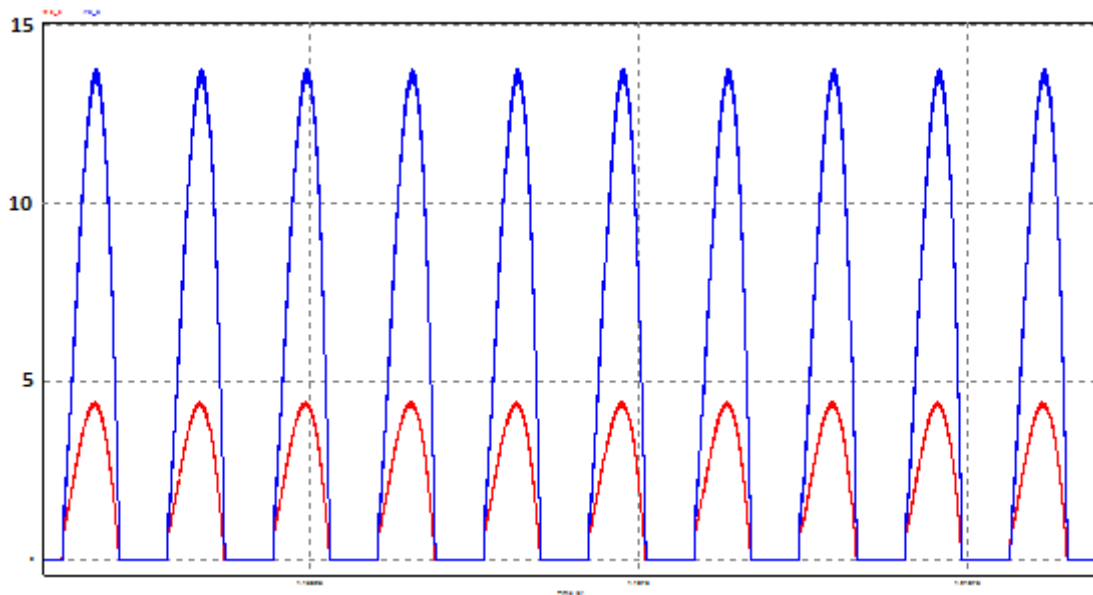


Figura 4-11. Corriente por el puente de diodos.

En la Fig.4-11, se muestra en azul la corriente a la salida del puente de diodos para carga de 75% de la nominal y en rojo la de 25%. Los diodos soportan la tensión de salida del SAI, es decir 325Vac. Se selecciona un puente de diodos monofásico de 50 a 1000V y de 25 A del que se dispone en la Universidad.

Puente de diodos monofásico: Fagor, modelo FB2506 [16].

Radiador

El puente de diodos se instalará junto con un radiador para evitar que sufra sobrecalentamientos. Para dimensionar el radiador se necesita calcular previamente las pérdidas de cada puente de diodos.

Cuando la tensión de red sea positiva, conducirá una pareja de diodos con la forma de onda que demanda la carga. Cuando la tensión de red sea negativa la otra pareja de diodos. Quedando la corriente por cada diodo con la forma mostrada en el Fig.4-12.

Se va a analizar cada puente de diodos por separado, en primer lugar al que va conectada la carga del 25% de la carga nominal. Midiendo los diferentes parámetros en la simulación de PSIM de la Fig.4-12 vemos que cada pareja de diodos conduce un tiempo de 0.00274s, y lo hace con una corriente de valor medio de 5.97 A.

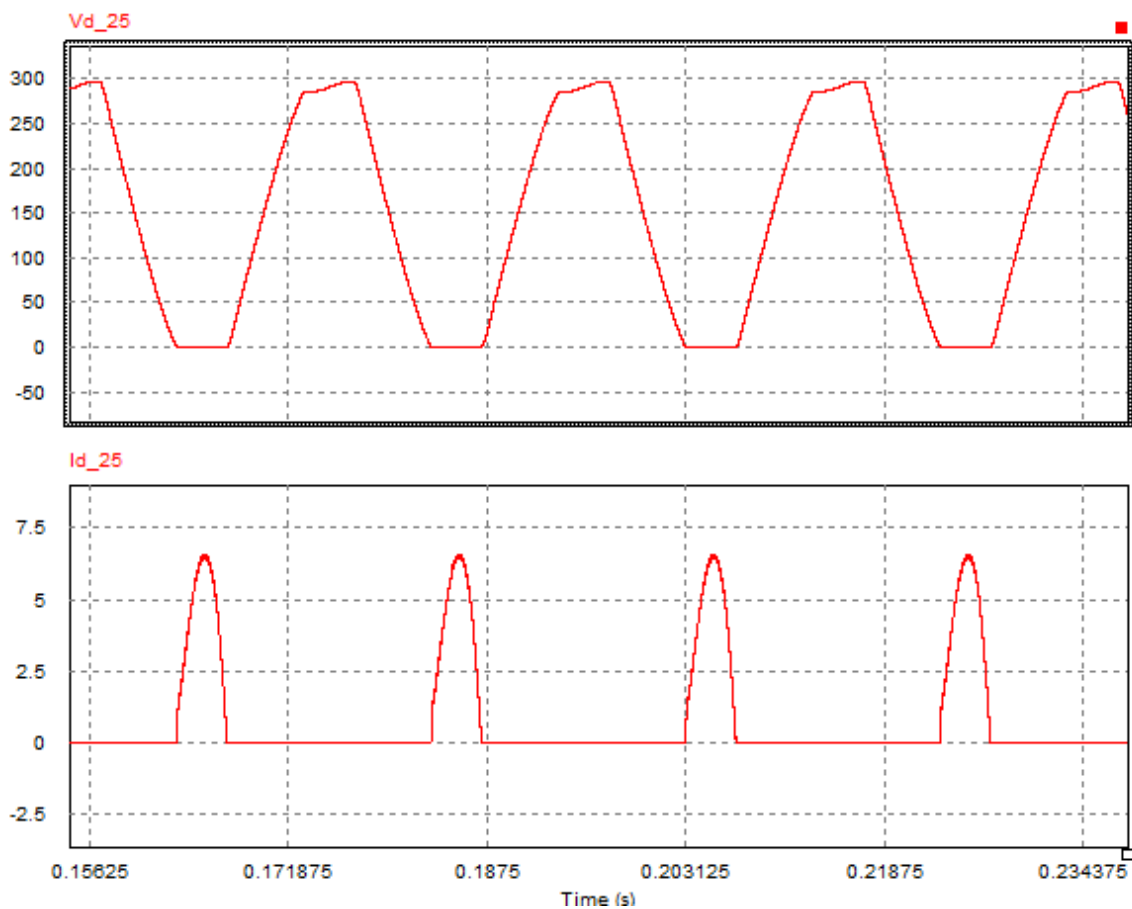


Figura 4-12. Evolución de la corriente y tensión del puente de diodos del 25%.

En los diodos hay dos tipos de pérdidas. Por conducción que se calculan a través de la siguiente fórmula:

$$P_{cond} = \frac{1}{T} \int_0^{t_{on}} V_F(I) * I_F * dt \quad (4.11)$$

Y las pérdidas de conmutación en el apagado, que debido a que conmuta a 50Hz se consideran despreciables frente a las de conducción.

Para calcular el valor de la caída de tensión en conducción se acude al datasheet del puente de diodos seleccionado y se obtiene de la Fig.4-12 tal que $V_F=0.87V$.

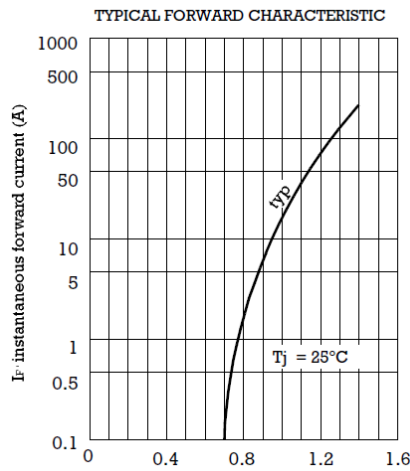


Figura 4-13. Voltaje directo instantáneo.

Por lo tanto, las pérdidas solo se asocian a la conducción y tienen un valor de 0.712W para cada diodo. Como tenemos cuatro diodos conduciendo en cada periodo, las pérdidas calculadas se multiplican por 4, quedando:

$$P_{\text{perd}}=2.85W$$

Se sigue el mismo procedimiento para la carga de 75% de la carga nominal. En primer lugar se calcula la corriente I_f a partir de la simulación en PSIM que se muestra en la Fig.4-14.

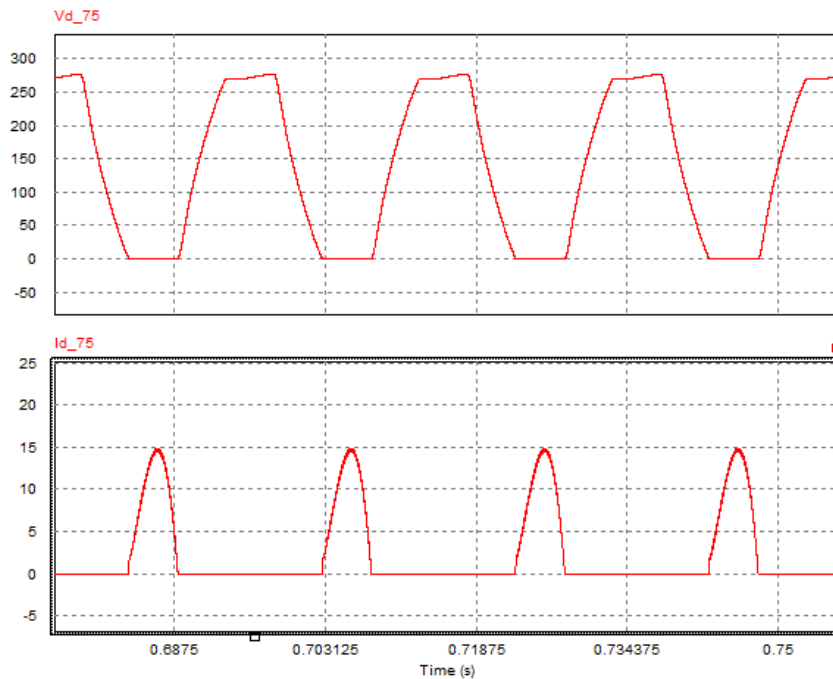


Figura 4-14. Evolución de la corriente y tensión del puente de diodos del 75%.

Se aplica el valor medio en el tiempo de conducción, obteniendo una corriente de 9.41A, a partir de la cual se calcula $V_F=0.95V$. Una vez conocido el tiempo de conducción que es de 5.1ms a partir de la ecuación (4.11) se calculan las pérdidas y se multiplican por cuatro como en el caso anterior.

$$P_{perd} = 2.28W * 4 = 9.11W$$

Por simplificar el montaje y ahorrarnos un radiador, como los puentes de diodos no sufren grandes pérdidas, se decide incorporar ambos puentes de diodos en un mismo radiador que tendrá que disipar la suma de todas las pérdidas.

En la Fig.4-15 se muestra el circuito eléctrico equivalente del proceso de disipación térmica.

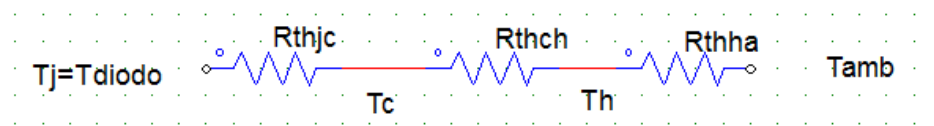


Figura 4-15. Circuito eléctrico equivalente del proceso de disipación térmica.

A partir del cual se obtiene la ecuación para dimensionar el radiador.

$$R_{thha} \leq \frac{T_j - T_{ambiente}}{P_{perd}} - R_{thjc} - R_{thch} \quad (4.12)$$

De la hoja de características [16] tenemos que:

$$R_{thjc} = 1.4^{\circ}C/W$$

$$T_{jmax} = 150^{\circ}C$$

De los datos de Saprem $T_{ambmax} = 70^{\circ}C$

Se determina la resistencia térmica entre la carcasa y el radiador (R_{thch}) de $0.038^{\circ}C/W$, se utiliza una pasta que favorece el intercambio de calor.

A partir de todos estos datos se obtiene la resistencia térmica del radiador que se necesita que es de:

$$R_{thjc} \leq 5.25^{\circ}C/W$$

Finalmente se elige el radiador FA-T220-51E que tiene una resistencia térmica de $3.4^{\circ}C/W$, mejor de la que se desea. Y cuyas dimensiones son 25x50mm, por lo que entrarían los dos puentes de diodos que miden 25x25mm.

4.4. Circuito emulador de hueco de tensión red monofásica

Para los ensayos es necesario que el SAI vea un hueco de tensión para cambiar de un modo de operación a otro, por lo que se necesita diseñar un circuito capaz de reproducir un hueco de tensión.

4.4.1. Características del hueco.

Se define como hueco de tensión una caída de la tensión de una o más fases a un valor que oscila entre el 90% y el 1% de la tensión nominal durante un espacio de tiempo comprendido entre 10 ms y 1 minuto. Los huecos se definen a partir de la profundidad, número de fases afectadas y su duración. La mayor parte de los huecos tiene una duración de menos de un segundo y una profundidad inferior al 60% [17].

El procedimiento de operación 12.3 muestra el comportamiento que debe de tener el aerogenerador ante un hueco de tensión. El aerogenerador no puede desconectarse de la red mientras se encuentre en la zona gris de la Fig.4-16.

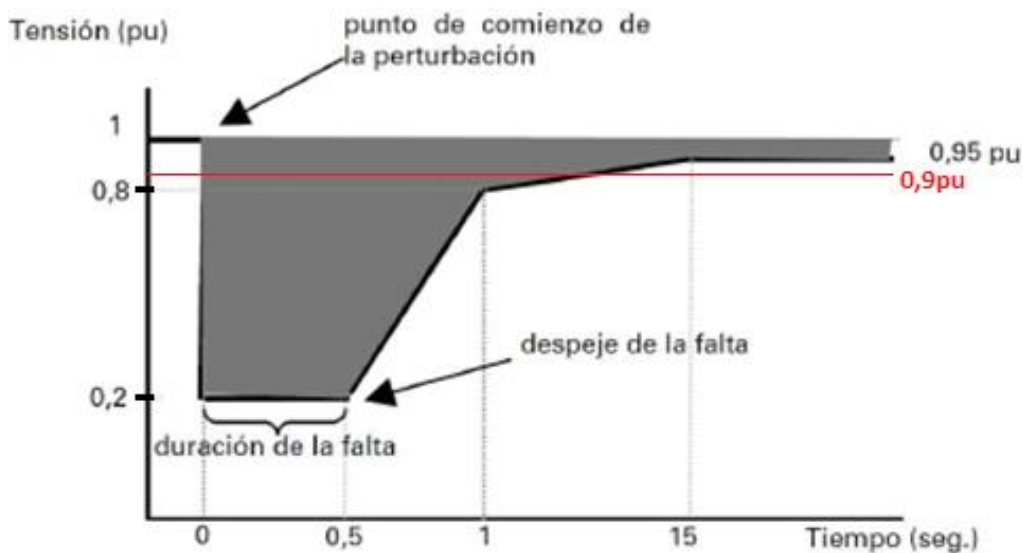


Figura 4-16. Curva tensión-tiempo admisible en el punto de conexión [18].

El SAI diseñada no tiene ningún problema en soportar los huecos de tensión ya que está diseñada para un tiempo de backup de 25s. Con todos estos datos y con las especificaciones de los ensayos se definen las características del circuito:

- Que permita elegir el momento a partir del cual se produce el hueco.
- Elegir a qué valor de tensión empieza el hueco.
- Cambiar la profundidad del hueco.

4.4.2. Circuito

Para el circuito que genere un hueco se ha pensado en un divisor resistivo controlado por interruptores de cuatro segmentos que permitan controlar la conexión y desconexión de cada una de las dos resistencias. Se descartan los tiristores porque se apagan cuando la corriente que circula por ellos se anula y en este caso se desea realizar la desconexión cuando esté circulando corriente por el interruptor. Se realiza el circuito empleando como interruptores IGBTs y diodos como se muestra en la Fig.4-17.

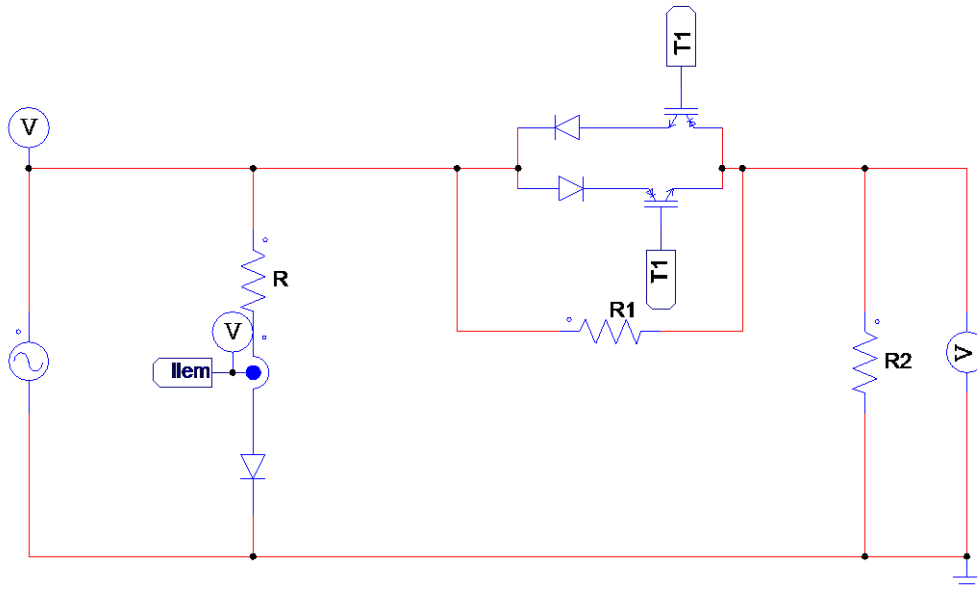


Figura 4-17. Circuito para simular el hueco de tensión.

El funcionamiento del circuito es el siguiente:

El hueco de tensión se controla a partir del encendido o el apagado del interruptor de cuatro segmentos T1. Cuando T1 está conduciendo puentea la resistencia R1 de tal manera que no se aplica el divisor de tensión. En el momento en que se da la orden de apagado del interruptor T1 la corriente pasa a través de R1 y R2 creándose así un divisor resistivo que atenuará el voltaje de salida que es igual al que ve R2.

Se realizarán huecos de tensión para las siguientes profundidades:

- El caso más desfavorable para una profundidad de 20%.
- El caso límite a partir del cual el SAI debe detectar el hueco y cambiar de modo de operación, profundidad del 89%
- Para un caso intermedio, profundidad del 50%

Para realizar estos huecos de tensión se necesitan una serie de resistencias que se calculan a partir de la ecuación de un divisor de tensión:

$$V_{\text{sal}} = \frac{R_2}{R_1 + R_2} * V_{\text{ent}} \quad (4.13)$$

Fijando un valor de R1 igual a 440 Ω a partir de la ecuación (4.14) se calculan los valores de R2, que serán los recogidos en la Tabla 4-5.

89%	50%	20%
3560 Ω	440 Ω	110 Ω
15 W	120 W	480 W

Tabla 4-5. Resistencias R2 para generar el hueco de tensión.

Tanto el circuito para disparar los interruptores como el sensor de tensión necesarios se describen en el apartado de montaje.



5. MONTAJE DE CIRCUITOS

En este capítulo se van a diseñar los circuitos eléctricos, tanto de potencia como de señal, necesarios para los distintos ensayos.

5.1. Ensayos de eficiencia.

Para este ensayo se necesitan cargas resistivas del 25%, 50%, 75% y 100% de la carga nominal. Para obtenerlas se utilizan dos cargas del 25% y una del 50% y se conectan de la siguiente manera:

- Los dos interruptores, T1 y T2, abiertos para la carga del 25%
- El interruptor T1 cerrado y T2 abierto para la carga del 50%
- El interruptor T2 cerrado y T1 abierto para la carga del 75%
- Los interruptores T1 y T2 cerrados para la carga del 100%

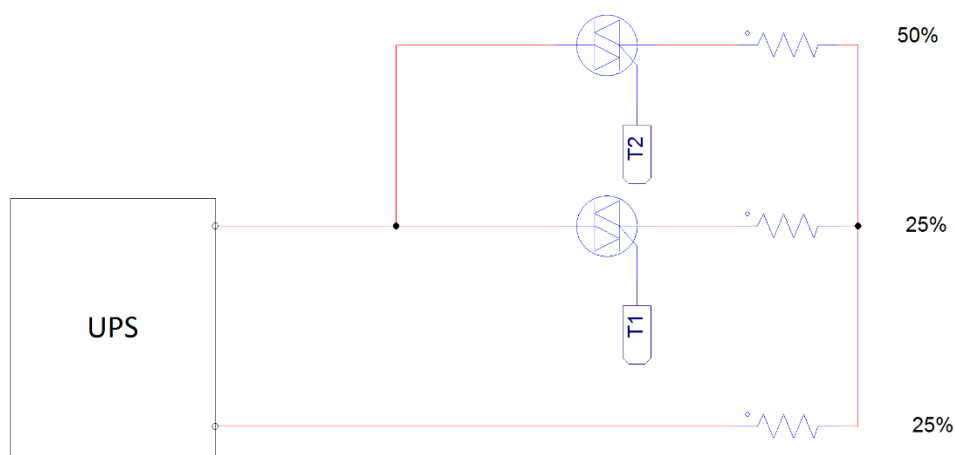


Figura 5-1. Circuito real para ensayos de eficiencia.

Las cargas del 25% y del 50% que se muestran en la Fig.5-1 son las de la Tabla 4-1.

En estos ensayos no se necesitarían los interruptores de estado sólido, bastaría con interruptores mecánicos, no hay que realizar mediciones en los transitorios, pero se aprovechan los de estado sólido que ya tenemos para otros ensayos.

5.2. Ensayo para carga lineal

Para los ensayos de carga lineal se requieren tanto cargas capacitivas como inductivas para las cargas de 10%, 20%, 100% y 110%. Para obtenerlas se conectarán tres cargas, una del 10% otra del 20% y la última del 80% y se conectarán:

- El interruptor C5 para la carga del 10%
- El interruptor C1 para la carga del 20%

- Los interruptores C1 y C2 para la carga del 100%
- Todos los interruptores para la carga del 110%

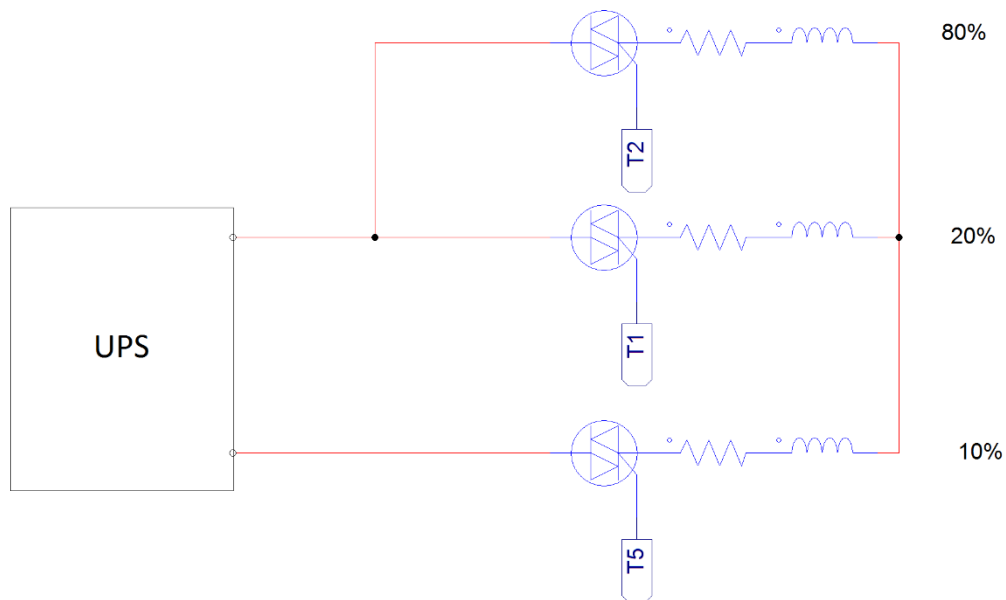


Figura 5-2. Circuito para ensayos con carga lineal inductiva.

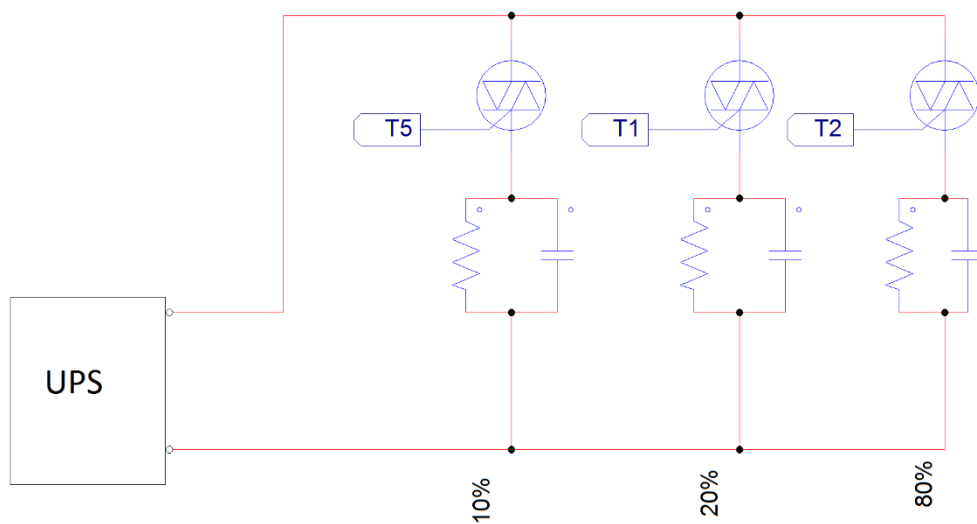


Figura 5-3. Circuito para ensayos con carga lineal capacitiva.

En estos ensayos se necesitarían los interruptores de estado sólido, debido a que hay que realizar mediciones en los transitorios, y por lo tanto se deben evitar los rebotes de los interruptores mecánicos. Estos interruptores serán TRIACS como ya se ha comentado en el capítulo 4.2. Por otro lado, las cargas asociadas a los circuitos de la Fig. 5-3 son las que contiene la Tabla 4-2.

5.3. Ensayo carga no lineal

Para los ensayos de carga no lineal se requieren cargas del 25%, 75% y 100%. Para obtenerlas se conectarán dos cargas, tal y como se especifica en la IEC 62040-3, una del 25% y otra del 75% y se conectarán:

- El interruptor T1 para la carga del 25%
- El interruptor T2 para la carga del 75%
- Los interruptores T1 y T2 para la carga del 100%

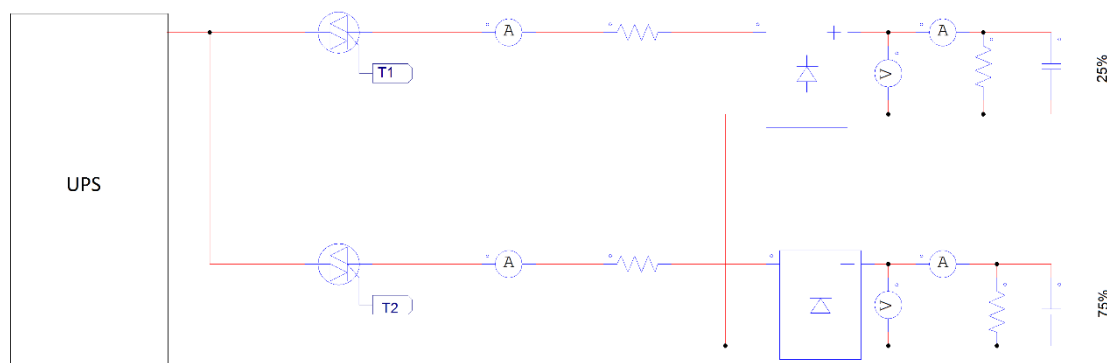


Figura 5-4. Esquema real de conexión de carga no lineal para ensayos.

En estos ensayos se necesitarían los interruptores de estado sólido, debido a que hay que realizar mediciones en los transitorios y, por lo tanto, se deben evitar los rebotes de los interruptores mecánicos. Por otro lado, como en los ensayos no se indica en que punto de la onda de tensión hay que realizar el cambio de carga, sirve con tiristores que realizan el cambio de carga cuando la corriente se anula. Estos interruptores serán TRIACS como ya se ha comentado en el capítulo 4.2.

5.4. Circuitos de disparo

Para controlar el encendido y apagado de los interruptores con los que se controla que carga se conecta a la salida del SAI se ha diseñado el siguiente circuito de señal, que se alimentarán con una fuente de tensión de $\pm 22V$, tensión de alimentación de los operacionales de la célula LEM y para el hueco de tensión.

El disparo de los TRIACs para realizar los cambios de carga en los ensayos de eficiencia, carga lineal y no lineal, se controla a partir de circuitos de señal que alimentan el optoacoplador con una tensión de 6V, tensión del diodo Fig.5-5.

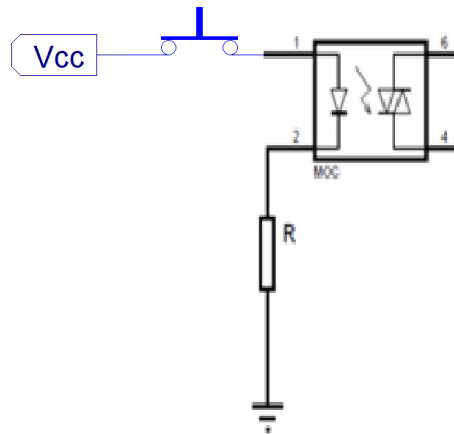


Figura 5-5. Control del disparo del TRIAC.

Como en nuestra aplicación queremos usar el TRIAC como interruptor como se ha explicado en el apartado 4.2, se requiere alimentar de manera constante la puerta G del TRIAC. Para ello se instalarán interruptores mecánicos que una vez se pulsan, se mantienen en conducción hasta que se vuelven a pulsar.

Se puede implementar de esta manera, debido a que en la norma no se especifica en que momento hay que realizar los cambios de carga. Por lo que la conexión de una carga adicional se hace en el instante en que se pulse el interruptor, mientras que las desconexiones se realizan en el siguiente paso por cero de la tensión de alimentación del TRIAC una vez se ha pulsado el interruptor.

5.5. Hueco de tensión

El circuito de potencia para el hueco de tensión ya ha sido descrito en el capítulo 4.6, por lo que solo queda diseñar el circuito de disparo de los interruptores.

5.5.1. Circuito de disparo

En apartados anteriores se ha definido las características del hueco:

1. Que permita elegir el momento a partir del cual se produce el hueco.
2. Elegir a qué valor de tensión empieza el hueco.
3. Cambiar la profundidad del hueco.

Las especificaciones se consiguen con el circuito de señal que se muestra a continuación:

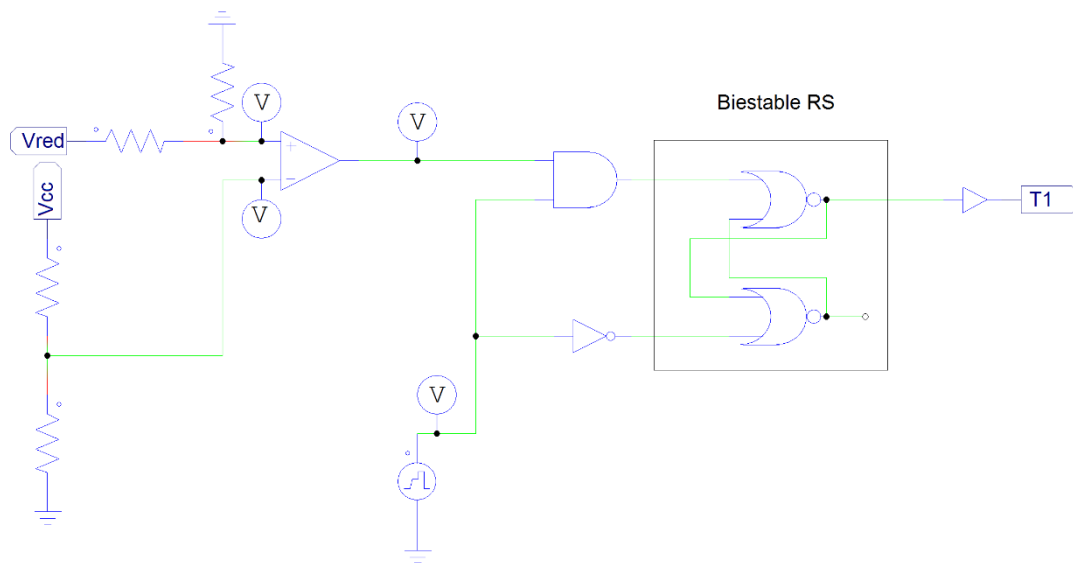


Figura 5-6. Circuito de señal para disparar el hueco de tensión.

Con el pulsador elegimos a partir de qué momento queremos que se genere el hueco. Si cuando el hueco este activado volvemos a pulsarlo el hueco se disipa al instante.

Para elegir el nivel de tensión al que se produce el hueco se varía el valor del potenciómetro. La tensión de red medida y adecuada se compara con la $V_{control}$ del potenciómetro, en el momento en el que la tensión de red supere el valor de referencia se generará el hueco que no se disipará hasta que se pulse el pulsador, como se muestra en la Fig.5-7.

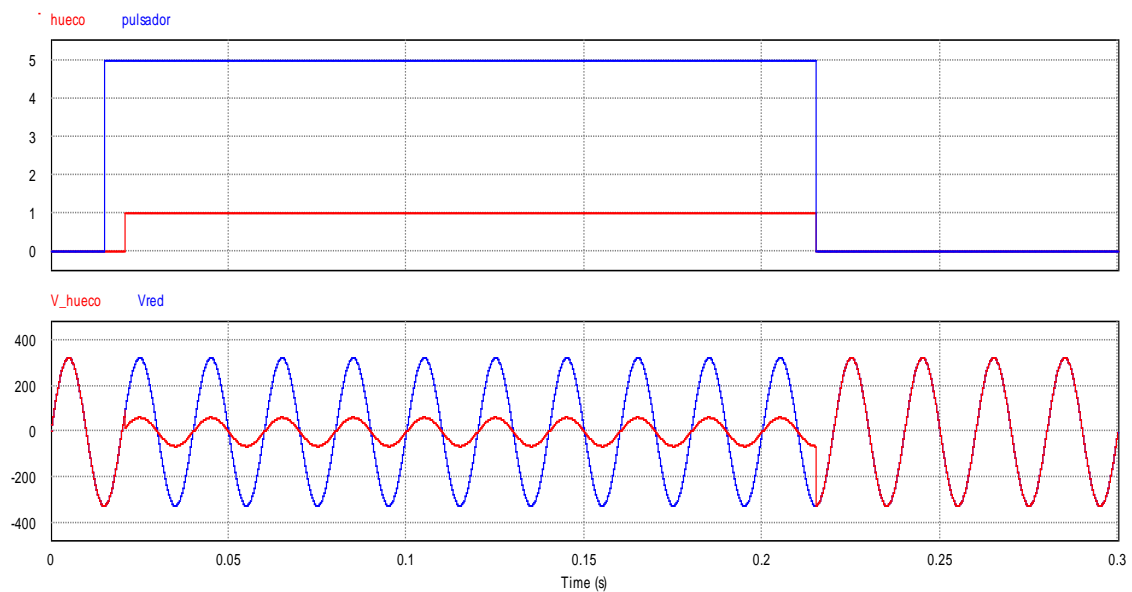


Figura 5-7. Simulación en PSIM circuito emulador de hueco de tensión.

Para evitar saturar los comparadores se medirán solo tensiones positivas, esto se consigue colocando un diodo que corte las tensiones negativas, como se muestra en la Fig.4-11.

La profundidad del hueco se consigue con el circuito de potencia, tal y como se ha explicado en el capítulo 3.6.

5.5.2. Sensor de tensión

Para el circuito de señal es necesario medir la tensión de la red, para ello se mide la corriente que circula por una resistencia conectada en paralelo con la red. Para los cálculos se toma como base de partida el proyecto de fin de grado de I. Lizarraga [19] y se ajustan los parámetros de entrada y de salida para el uso de la célula LEM [20] que tiene las siguientes características:

Main LV 25-P characteristics	
Input (Primary circuit)	Measuring current range $0 \pm 14 \text{mA}$
	$I_{PN} = 10 \text{mA}$
Output (Secondary circuit)	$I_{SN} = 25 \text{mA}$
Conversion ratio between PC and SC	$K_N = 2500:1000$
Supply Voltage	$V_C = \pm 12 \dots 15 \text{V}$
Measuring Resistance with $V_C = \pm 15 \text{V}$ and $@ \pm 10 \text{mA}_{\text{max}}$	$R_M = 100 \dots 350 \Omega$
Measuring Resistance with $V_C = \pm 15 \text{V}$ and $@ \pm 14 \text{mA}_{\text{max}}$	$R_M = 100 \dots 190 \Omega$

Tabla 5-1. Principales características LV 25-P.

Siguiendo el proyecto de I. Lizarraga, la célula LEM mide una corriente en el rango de $\pm 10 \text{mA}$. Con esto datos y a partir de la Ley de Ohm:

$$R = \frac{V}{I} = \frac{230 \text{V}}{10 \text{mA}} = 23.000 \Omega \quad (5.1)$$

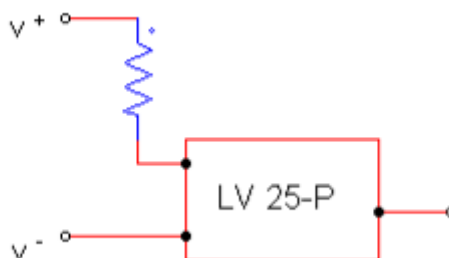


Figura 5-8. Circuito de entrada a la célula LEM [19].

La salida de LV 25-P se corresponde con una corriente que guarda una relación lineal con la corriente de entrada a través del parámetro K_N . En la salida de la célula se conecta un circuito R-C en paralelo que tiene como fin conseguir una tensión proporcional a la corriente de salida, y también actúa como un filtro de primer orden, cuya ecuación es:

$$FT_{\text{filtro}} = \frac{R}{1+s*C*R} \quad (5.2)$$

La ganancia del filtro es R, como se desea adecuar la tensión entre 0-22V, el valor de R debe ser 880 Ω . Para dimensionar la C, se elige una frecuencia de corte de 500Hz.

$$f_{\text{corte}} = \frac{1}{2\pi * R * C} \quad (5.3)$$

A partir de la ecuación 4.3 se calcula el valor de C, que es de 398nF. Quedando el siguiente circuito:

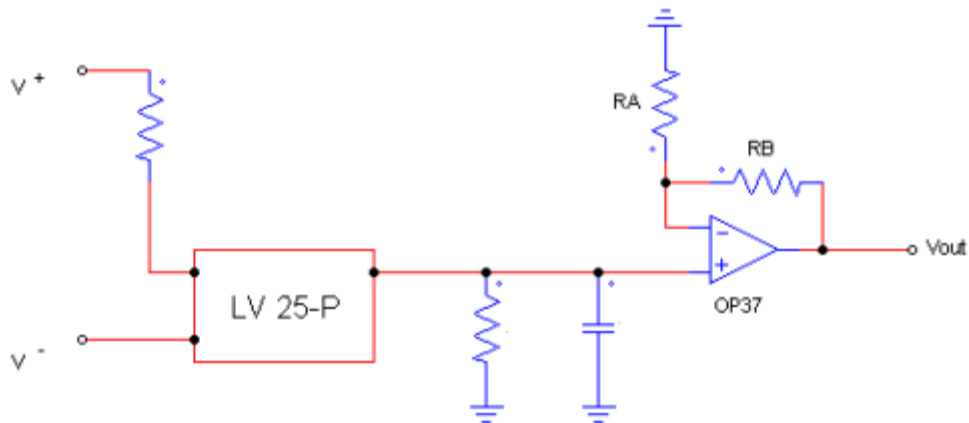


Figura 5-9. Circuito completo de medida de tensión.

De esta manera se obtiene un circuito que además de sensar la tensión de la red, también acondiciona la tensión a los valores deseados para compararlos con la referencia del hueco. El circuito del operacional es un amplificador que se utiliza con ganancia igual a 1 ($RA=RB$) [19], que se utiliza para desacoplar la siguiente etapa del circuito de señal de la etapa de sensado.



6. SIMULACIÓN DE ENSAYOS

A continuación se realizarán los ensayos al SAI diseñada en el trabajo de J.Seller [21], como en el proyecto se ha centrado en el cálculo y diseño del funcionamiento del SAI en modo de almacenamiento de energía, la descarga de los ultracaps, sólo se simularán los ensayos del capítulo 2.1 en los que se especifique que el SAI trabaja únicamente en modo de almacenamiento de energía.

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

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.6-1 es 233,5 V

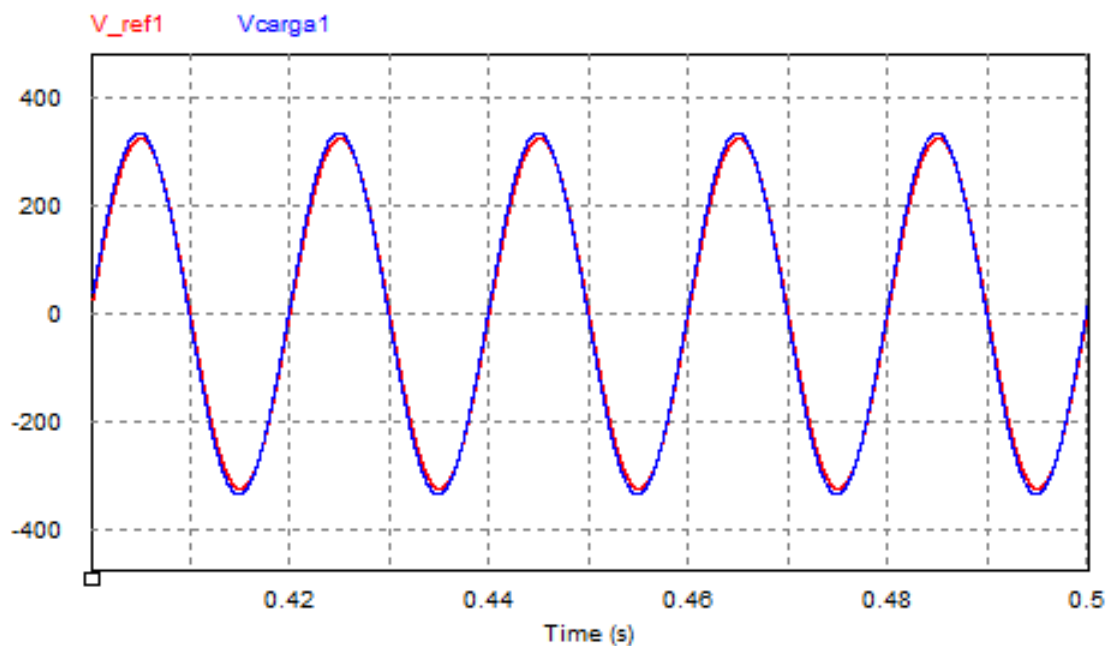


Figura 6-1. Valor rms de la tensión de salida del SAI.

- El THD queda representado en la Fig.6-2: Su valor es de 0,1%.

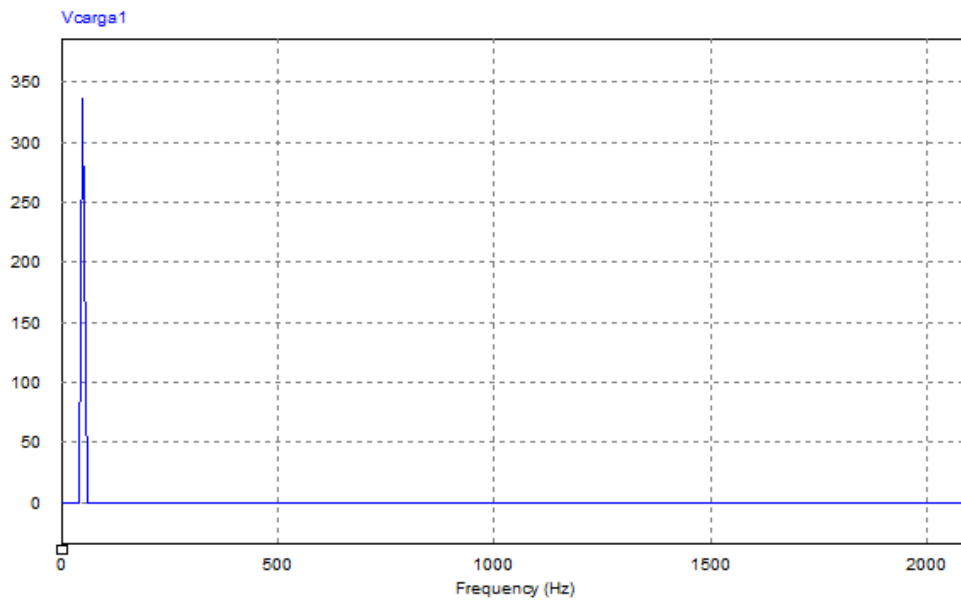


Figura 6-2. THD de la tensión de salida del SAI.

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.

- Para cargas inductivas:

De la Fig.6-3 se obtiene que el valor rms a su salida es de 219,9V:

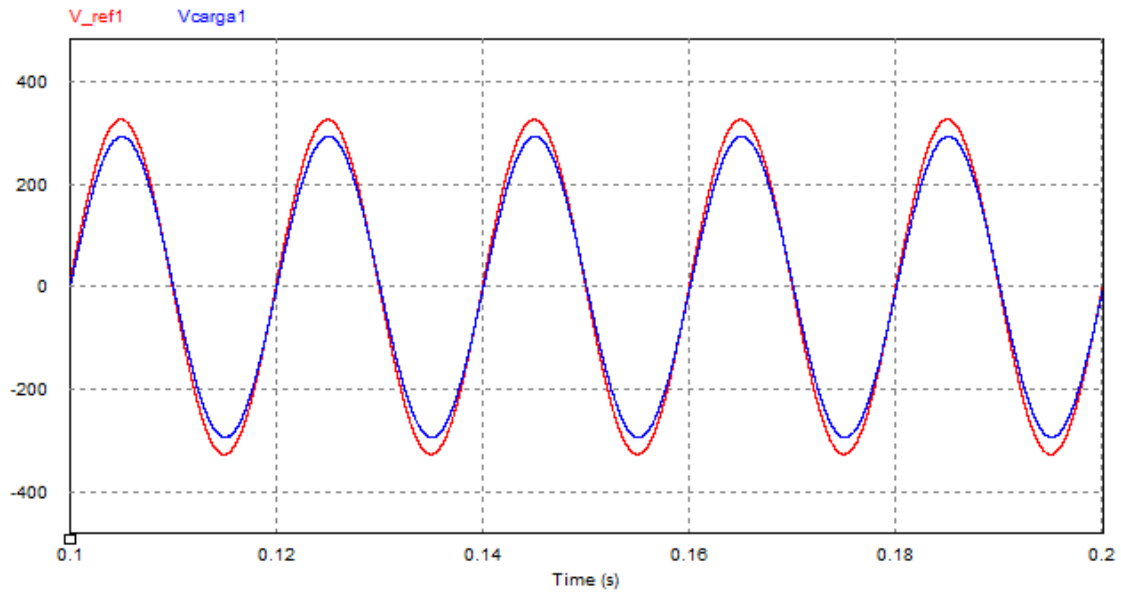


Figura 6-3. Valor rms de la tensión de salida del SAI para carga lineal inductiva.

- De la Fig.6-4 se obtiene un THD de 0.11%:

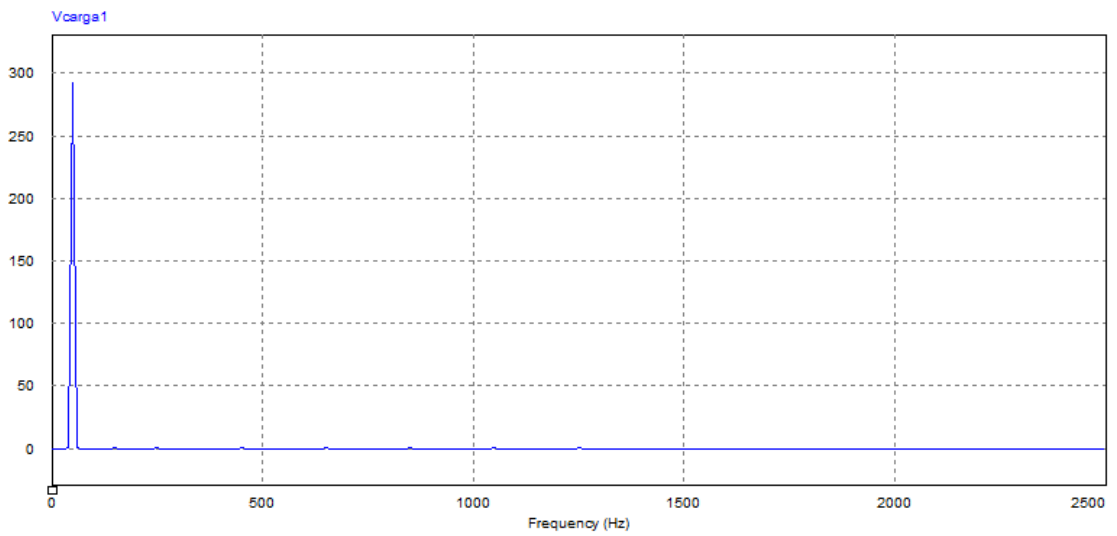


Figura 6-4. THD de la tensión de salida del SAI para carga lineal inductiva

- Para cargas capacitivas:

De la Fig.6-5 se obtiene un valor rms de 245V

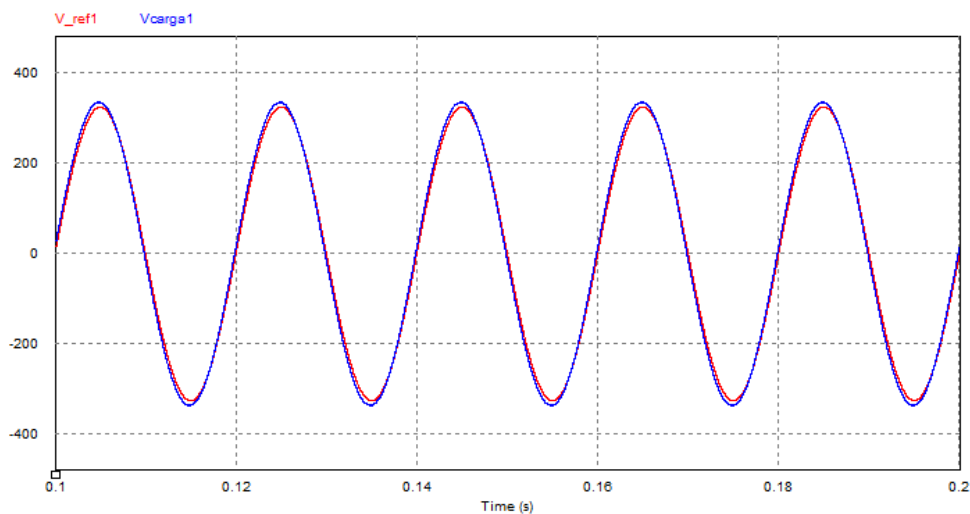


Figura 6-5. Valor rms de la tensión de salida del SAI para carga lineal capacitiva.

De la Fig.6-6 un valor de THD de 0.07%:

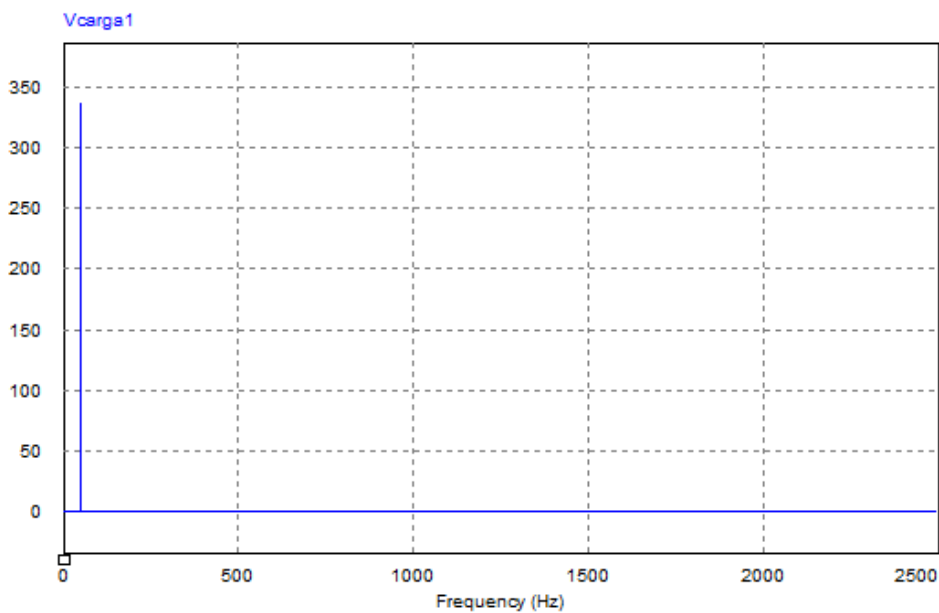


Figura 6-6. THD de la tensión de salida del SAI para carga lineal capacitiva

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.6-3 se muestra el valor $V_{DC}=0,046V$

- Cargas capacitivas:

En la Fig.6-5 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.6-9):

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

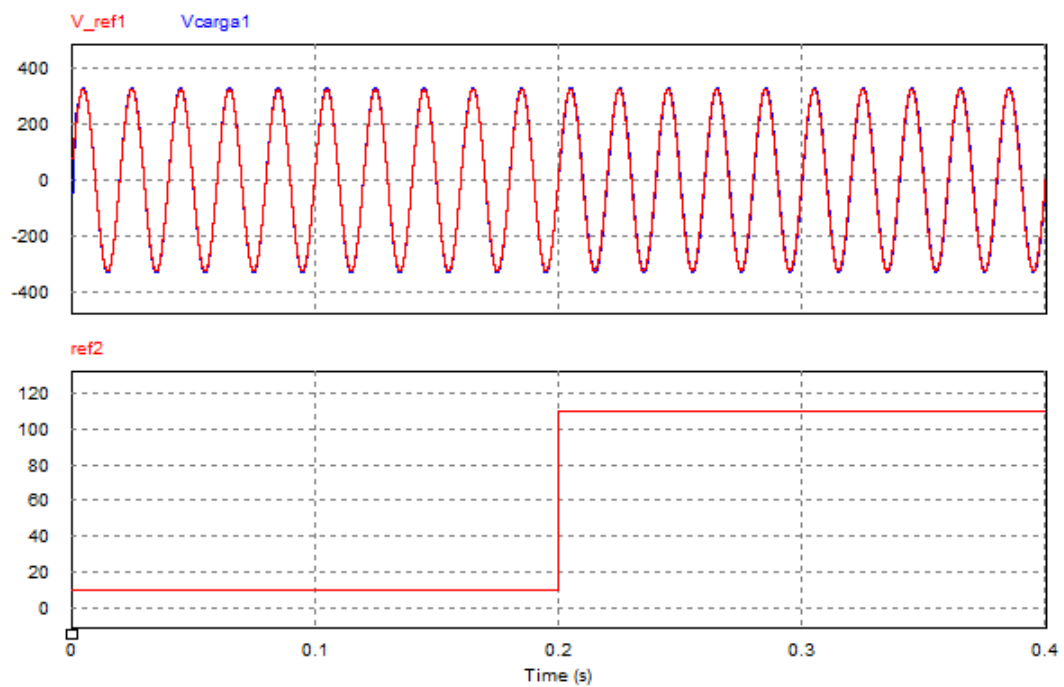


Figura 6-7. Tensión de salida del SAI cuando se produce una sobrecarga a 0.2s.

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 (Fig.2-1) 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, Fig.2-1 (no siendo superior al 7,5%), aunque en estacionario hay errores superiores al 5%; este comportamiento se observa en la Fig.6-8:

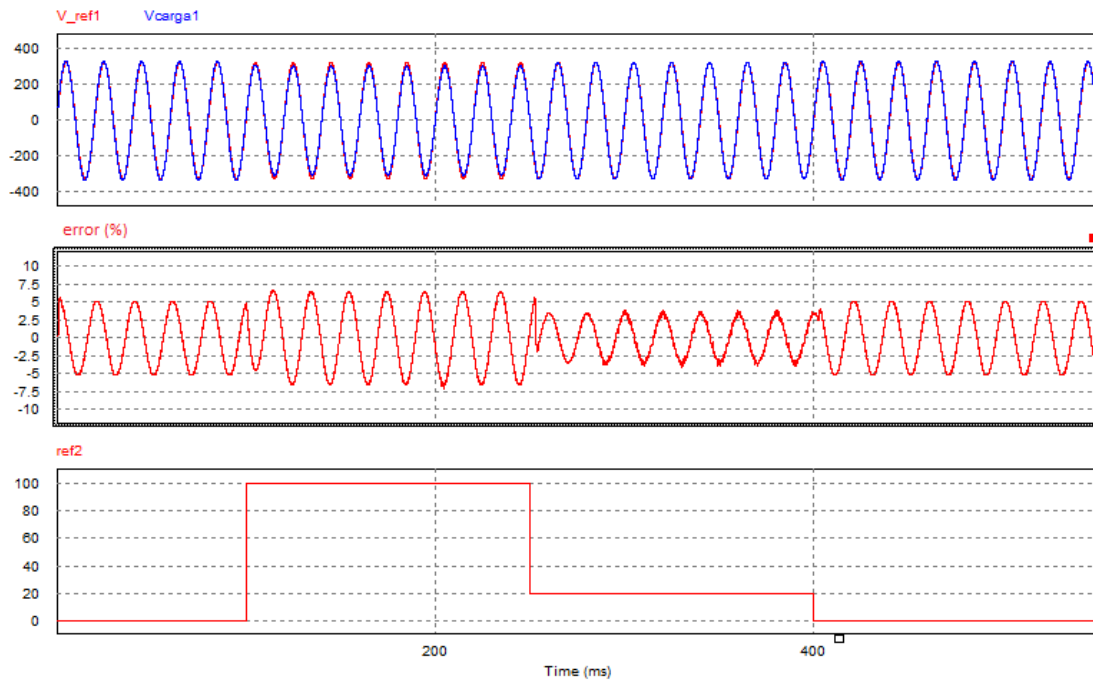


Figura 6-8. Transitorio de tensión ante cambios de carga lineal inductiva.

- 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, Fig.2-1 de la normativa (no siendo superior al 20%), aunque en estacionario hay errores inaceptables, superiores al 5%; este comportamiento se observa en la Fig.6-9.

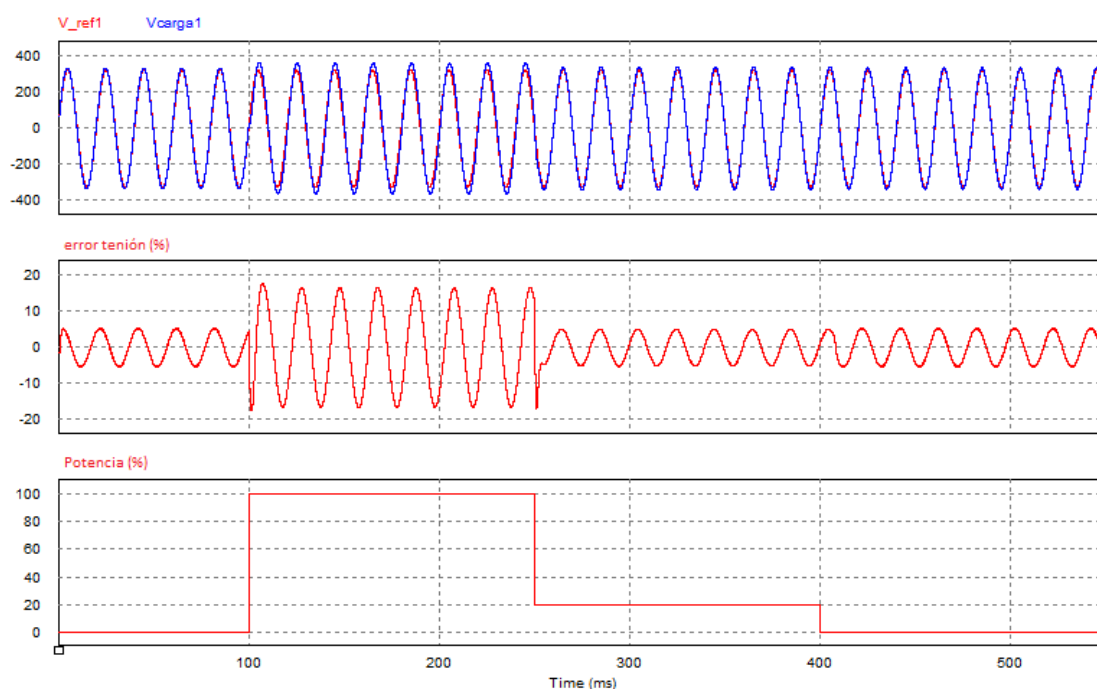


Figura 6-9. Transitorio de tensión ante cambios de carga lineal capacitiva.

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 completa (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.6-10 se muestra el valor rms, que es de 232,5 V.

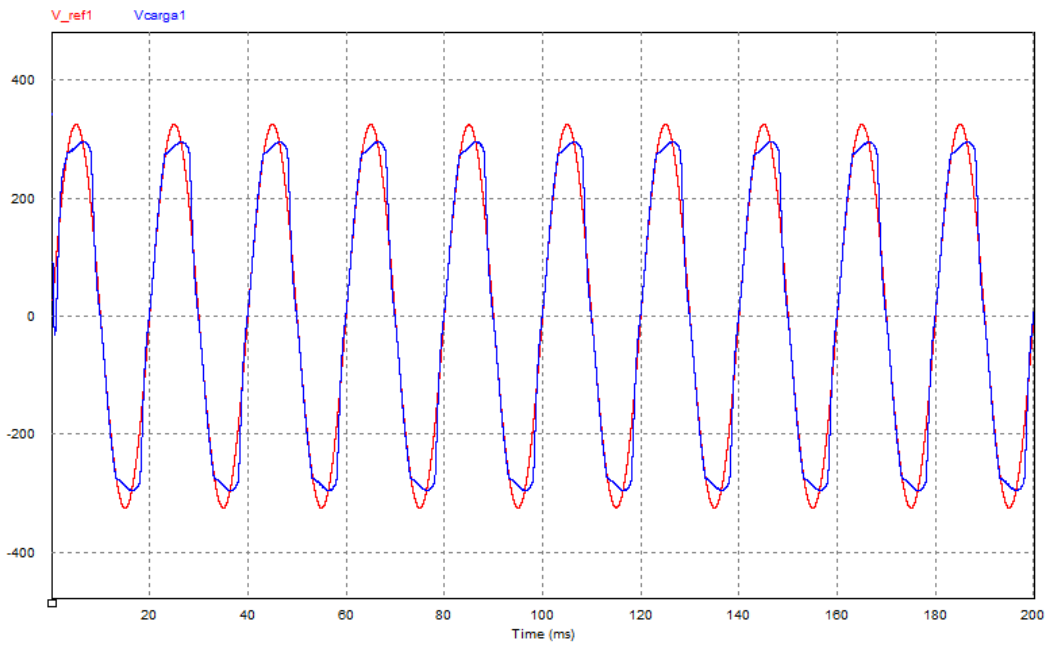


Figura 6-10. Valor rms de la tensión de salida del SAI para carga no lineal.

Por su parte, el THD queda representado en la Fig.6-11 y es de 13,3%.

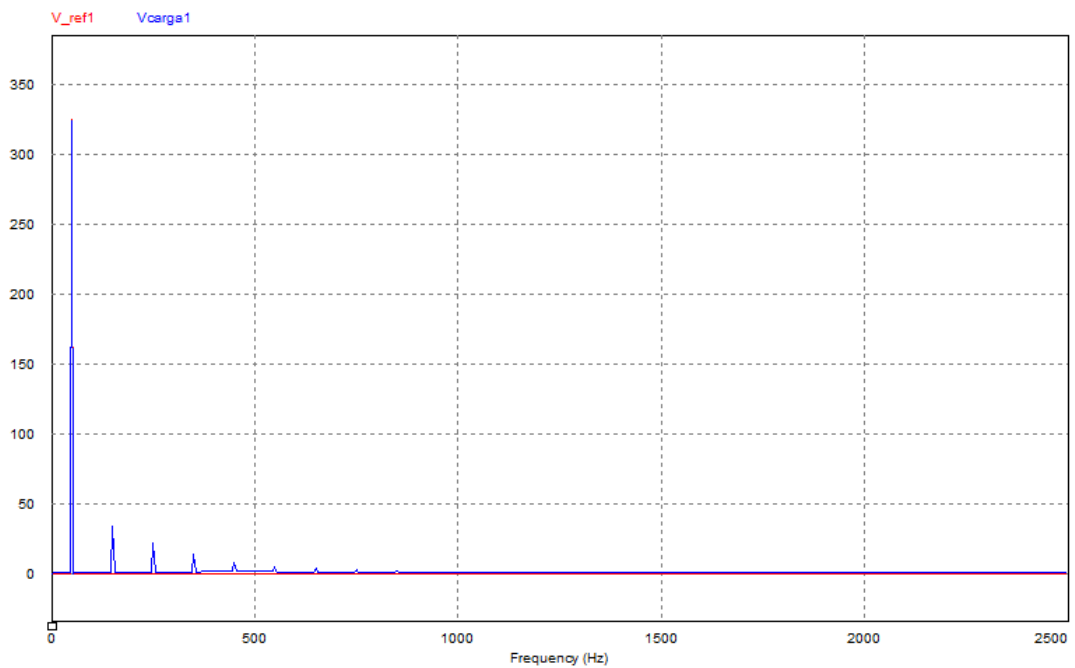


Figura 6-11. THD de la tensión de salida del SAI para carga no lineal.

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 Fig.2-1.

En la Fig.6-12 se observa claramente que la tensión de salida no está dentro de los límites marcados por la Fig.2-1, llegando a alcanzar errores de hasta el 75%.

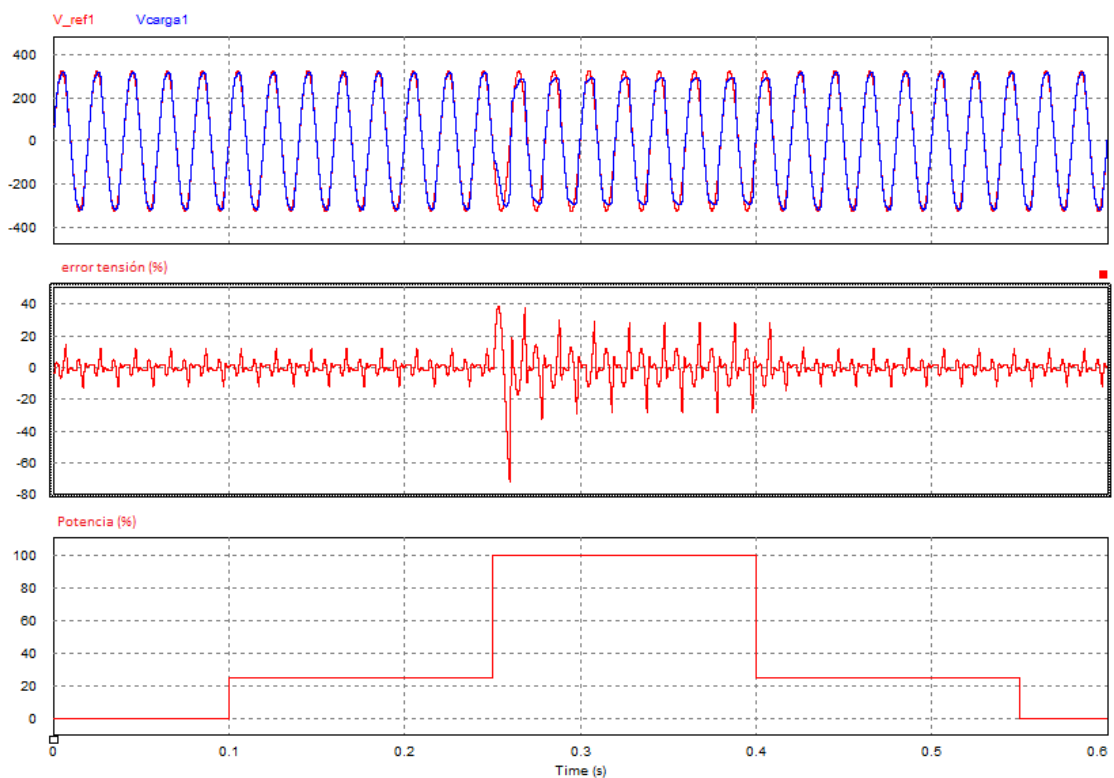


Figura 6-12: Transitorios de la tensión de salida ante cambios de carga no lineal.

En cargas no lineales el control realizado se encuentra con problemas para cumplir la normativa, no es capaz de generar una onda de tensión adecuada. La solución para la dificultad de seguir la referencia con cargas no lineales conectadas al SAI se detalla en el trabajo de J.Seller.

7. CONCLUSIONES

El SAI seleccionada es de la tipología online con interruptor de bypass que utiliza ultracondensadores como fuente de almacenamiento de energía. La carga y descarga de los mismos se controla a través de dos convertidores full bridge. Además, tiene integrada un convertidor AC/DC para extraer la energía de la red y un convertidor DC/AC para controlar la alimentación de las cargas.

De todos los ensayos que se describen en la normativa, a la hora de la implementación en la bancada el proyecto se centrará en los ensayos descritos en la IEC-62040-3 catalogados como ensayos de homologación (H). Los ensayos correspondientes a la IEC-62040-2, que hacen referencia a la compatibilidad electromagnética quedan descartados por su complejidad.

A partir del diseño de las diferentes cargas, tanto resistivas como capacitivas e inductivas, y de especificar los elementos que se necesitan para la medición de los parámetros especificados en cada ensayo se estima un presupuesto inicial para la bancada de pruebas.

Se van a hacer ensayos que midan la eficiencia del SAI, comprueben su correcto funcionamiento ante cambios de carga lineal y no lineal y con el SAI trabajando sin carga. También se medirá el tiempo de autonomía, tiempo de back up, y el tiempo que tardan en cargarse y descargarse los condensadores.

Se han dimensionado los elementos activos, pasivos y circuitos de señal y se ha comprobado su correcto funcionamiento a través de simulación en PSIM.

Por último se ha realizado la simulación de algunos de los ensayos, los correspondientes a la alimentación de las cargas en modo de almacenamiento de energía, para validar el diseño del control encargado de hacer funcionar el SAI en modo de almacenamiento de energía, realizado conjuntamente con J.Seller.

Las posibles líneas futuras de trabajo vinculadas a este proyecto son:

- Compra de material necesarios para el montaje de la bancada.
- Montaje de la bancada
- Establecer los protocolos de ensayos y la forma de realizar las mediciones.
- Someter a ensayo el SAI realizado por Saprem y ver si supera la normativa.



8. BIBLIOGRAFÍA

- [1] AEE, “Asociación Empresarial Eólica,” 2017. [Online].
Disponible en: <https://www.aeeolica.org/es/sobre-la-eolica/la-eolica-en-el-mundo/>.
- [2] UNEF, “Informe Anual 2016,” *Unión Española Fotovoltaica*, p. 100, 2016.
- [3] IEC, “IEC 62040-3: Uninterruptible power systems (UPS),” *Ergonomics*, 2007.
- [4] AENOR, “UNE-EN 61000-3-12: Compatibilidad electromagnética (CEM),” 2010.
- [5] IEC, “IEC 62040-2: Uninterruptible power systems (UPS),” *Order A J. Theory Ordered Sets Its Appl.*, vol. 2002, 2002.
- [6] AENOR, “UNE-EN 55016-1-1: Especificación para los métodos y aparatos de medida de las perturbaciones radioeléctricas y de la inmunidad a las perturbaciones radioeléctricas,” 2011.
- [7] E. Barrios Rípodas, “Tema3_FVmaster_FiltroSalida.” .
- [8] AENOR, “UNE-EN 55016-1-2: Especificación para los métodos y aparatos de medida de las perturbaciones radioeléctricas y de la inmunidad a las perturbaciones radioeléctricas Parte,” 2015.
- [9] Genteq, “27L572.” [Online].
Disponible en:
http://www.farnell.com/datasheets/703914.pdf?_ga=2.166717559.894067216.1498068967-1560229401.1496826739.
- [10] Ducati, “4.16.10.26.14.” [Online].
Disponible en:
http://www.farnell.com/datasheets/24524.pdf?_ga=2.166636663.894067216.1498068967-1560229401.1496826739.
- [11] CornellDubilie, “PSU3030.” [Online].
Disponible en:
http://www.farnell.com/datasheets/1885358.pdf?_ga=2.170913641.894067216.1498068967-1560229401.1496826739.
- [12] G. G. David, “TFG: Sistema Electrónico de Control para Toldo Conectado a Internet,” 2017.
- [13] STMICROELECTRONICS, “BTA20-600CWRG.” [Online].
Disponible en:
http://www.farnell.com/datasheets/2307022.pdf?_ga=2.197086949.894067216.1498068967-1560229401.1496826739.
- [14] FAIRCHILD, “MOC3061M.” [Online].
Disponible en:
http://www.farnell.com/datasheets/2303939.pdf?_ga=2.128434885.894067216.1498068967-1560229401.1496826739.

68967-1560229401.1496826739.

[15] Multicomp, "MCKLZ450M331O50Y." [Online].

Disponible en:

http://www.farnell.com/datasheets/2151201.pdf?_ga=2.128329797.894067216.1498068967-1560229401.1496826739.

[16] Fagor, "25 Amp . Glass Passivated Bridge Rectifier."

[17] I. de la Parra, "4. Huecos y cortes breves."

[18] Red Eléctrica Española, "P.O.12.3 Requisitos de respuesta frente a huecos de tensión de las instalaciones de producción de régimen especial."

[19] I. Lizarraga, "5. Measurements," pp. 89–114.

[20] Lem, "Voltage Transducer LV 25-P I PN = 10 mA V PN = 10 .. 500 V," *Data Sheet*, pp. 18–20, 2013.

[21] F. J. Sellar Asín, "Estudio de un SAI para aerogeneradores: Estado del arte y lazos de control de tensión de carga.," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 55, no. 8, pp. 2984–2996, 2008.

ANEXO A. Avance de presupuesto.

En este anexo, se elabora un avance de presupuesto de los materiales necesarios para elaborar los circuitos de ensayos.

ELEMENTO	CANTIDAD	COSTE UNITARIO (€)	COSTE MATERIAL (€)
Condensadores			0
27L572	1	28,19	28,19
4.16.10.26.14	1	10,90	10,90
PSU3030	3	16,06	48,18
MCKLZ450M331050Y	12	5,06	60,72
Puente de diodos			
FB2506	1	Disponible en la UPNA	
Radiador			
FA-T220-51E	1	1,72	1,72
Interruptores			
BTA 20-600CWRG	4	1,86	7,44
MOC3061M	4	0,74	2,95
Célula LEM			
LV 25-P	1	Disponible en la UPNA	
Aparatos de medida			
AGILENT 34970A	1	2.093,00	2.093,00
Picoscope 2205A	1	189,00	189,00
Tektronix MDO 3054	1	11.190,10	11.190,10
YOKOGAWA WT3000	1	15.000,00	15.000,00
GE30*	1	35.127,40	35.127,40
TOTAL:			63.759,60

* El GE30 es un emulador de red que daría la ventaja de poder producir cualquier tipo de hueco además de generar una tensión para distintas amplitudes y frecuencias.

No se incluyen las bobinas y resistencias, debido a que se dispone de ellas en la universidad, así como de los elementos de circuito de señal. Como resistencias se emplearán las bancadas de resistencias del laboratorio de energías renovables y las bobinas las del laboratorio de electrometría