



**ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIEROS  
INDUSTRIALES Y DE TELECOMUNICACIÓN**

Titulación:

**MÁSTER EN INGENIERÍA INDUSTRIAL**

Título:

**“DISEÑO Y VALIDACIÓN DE INVERSORES  
FOTOVOLTAICOS”**

**Alumno:** Luis Fernando Basarte Bozal

**Tutor UPNA:** Roberto González Senosiain

**Tutor Ingeteam:** Mikel Borrega Ayala

Pamplona, Junio de 2016



En primer lugar agradecer a mis tutores, Roberto y Mikel, la oportunidad que me dieron de realizar el “Trabajo Fin de Máster” en una empresa como INGETEAM, haciéndome participe de su proyecto. Ha sido una experiencia muy enriquecedora.

Gracias a Martín por su ayuda constante, su apoyo y por saber transmitirme todas sus ideas de manera precisa, concisa y clara.

A todo el equipo de 3Play y comprobadores gracias por haberme enseñado tanto y haberme facilitado el trabajo, Javier, Aritz, Jokin, Nerea... sin vosotros esto no hubiera sido posible.

Agradecer a todos mis compañeros el buen ambiente laboral con el que me han acogido, hubiera sido difícil sin vosotros.

También a toda mi familia, sin olvidarme la de Calahorra, por haberme apoyado en estos meses tan intensos.

Y a ti, por toda la atención, paciencia y calma con la que me has ayudado.

Gracias



## Índice

1.- Introducción y objetivos .....	9
1.1.- Introducción.....	9
1.2.- Objetivos y desarrollo .....	9
2.- Normativa .....	11
2.1.- UL1741. Standard for Inverters, Converters, Controllers and Interconnection System Equipment for Use with Distributed Energy Resources.....	11
2.2.- IEEE 1547. Standard for Interconnecting Distributed Resources with Electric Power Systems .....	12
2.3.- IEEE 1547.1. Standard Conformance Test Procedures for Equipment Interconnecting Distributed Resources with Electric Power System .....	13
2.3.1.- Requisitos del equipo comprobador.....	13
2.3.2.- Desarrollo de los tests.....	14
2.3.3.- Funciones rampa y escalón .....	16
3.- Análisis de las necesidades de tensiones y frecuencias .....	19
3.1.- Parámetros para UL1741 [1] [3] .....	19
3.1.1.- Ensayo de rampas para UL1741.....	19
3.1.2.- Ensayo de escalón para UL1741.....	21
3.2.- Parámetros para IEEE1547 [2] [3].....	22
3.2.1.- Ensayo de rampas para IEEE1547 .....	22
3.2.2.- Ensayo en escalón para IEEE1547 .....	23
4.- Análisis de las necesidades de potencia.....	25
5.- Estudio de soluciones .....	27
5.1.- Fuentes de tensión alterna .....	27
5.1.1.- Ametek/California Instruments [6] .....	27
5.1.2.- Chroma .....	27

5.1.3.- Conclusiones .....	28
5.2.- Amplificadores de audio .....	28
5.3.- Inversor conmutado o 3Play .....	29
5.3.1.- Topología 1 .....	29
5.3.2.- Topología 2 .....	30
5.3.3.- Conclusiones .....	30
6.- Empleo de 3Play TL M como fuente .....	31
6.1.- Descripción del equipo .....	31
6.2.- Lay-out .....	32
6.3.- Análisis de viabilidad .....	33
6.3.1.- Puertos de salida .....	33
6.3.2.- Puertos de entrada.....	34
6.3.3.- Conexiones de potencia .....	34
6.4.- Simulaciones .....	35
6.4.1.- Test de relés y adaptación del mismo.....	35
6.4.2.- Equipo sin generación de neutro .....	36
6.4.3.- Equipo con generación de neutro y sin carga .....	37
6.4.4.- Equipo con generación de neutro, conexión a punto medio de bus y sin carga.....	38
6.4.5.- Equipo con generación de neutro, conexión a punto medio de bus y con carga .....	39
6.4.6.- Intercambio de fases .....	41
6.4.7.- Conclusiones .....	41
6.5.- Validación de las simulaciones .....	42
6.5.1.- Tensiones generadas en vacío .....	42

6.5.2.- Tensiones generadas bajo carga .....	42
6.5.3.- Otros parámetros .....	43
6.5.4.- Conclusiones .....	43
6.6.- Simulación de rampas con inversor 3Play en PSIM .....	44
6.6.1.- Modelización del equipo .....	44
6.6.2.- Resultados obtenidos.....	46
6.6.3.- Tensión del punto medio del bus.....	47
7.- Implementación del equipo comprobador .....	49
7.1.- Desarrollo de la aplicación para generar los ensayos .....	51
7.1.1.- Capa de aplicaciones .....	51
7.1.2.- Capa de control .....	51
7.1.3.- Capa de máquinas de estados .....	53
7.1.4.- Notas .....	61
7.2.- Comprobación fw_abm1010 en simulación PSIM.....	62
7.2.1.- Modificaciones en el esquemático .....	62
7.2.2.- Resultados obtenidos.....	62
7.3.- Comprobación preliminar fw_abm1010 en maqueta .....	67
7.3.1.- Calibración de equipo .....	67
7.3.2.- Creación de controles en la aplicación Freemaster .....	67
7.3.3.- Validación de la configuración empleada .....	68
7.3.4.- Conformidad a normativa en condiciones nominales .....	71
7.3.5.- Lanzamiento de ensayos .....	81
7.4.- Resultados obtenidos en los ensayos .....	84
7.4.1.- Ensayos en escalón.....	84
7.4.2.- Ensayos en rampa .....	87

8.- Conclusiones .....	91
9.- Líneas futuras .....	95
10.- Bibliografía.....	97
11.- Índice de figuras .....	99
12.- Índice de tablas.....	103
13.- Anexos .....	105
13.1.- Anexo 1. Calibración del equipo fuente y el equipo a ensayar .....	105
13.2.- Anexo 2. Guía FreeMaster para el Generador de Rampas.....	106
13.2.1.- Test RampGen .....	106
13.2.2.- TestParams.....	109
13.2.3.- NominalValues .....	112
13.2.4.- BaseValues .....	113
13.2.5.- TripValues.....	114
13.2.6.- UltValues .....	115
13.2.7.- RampStandardValues .....	116



# **1.- Introducción y objetivos**

## **1.1.- Introducción**

La familia de inversores trifásicos de conexión a red INGECON SUN 3Play, diseñada y fabricada por la empresa INGETEAM POWER TECHNOLOGY-ENERGY S.A, continua su crecimiento en materia de potencia. Dispone actualmente de una gama con equipos que van desde los 10 a los 40kW y con perspectivas de seguir incrementándose hasta valores cercanos a 100kW.

Para poder ser comercializados, los equipos deben ser ensayados previamente conforme a pruebas de calidad y rendimiento tanto externas como internas. Es en ese punto donde se integra el propósito de este proyecto, conseguir dar conformidad a las pruebas de diseño y fabricación de la gama de inversores 3Play. La normativa a cumplir por estos equipos es tremendamente extensa, varía en cada país e incluso por regiones. Este proyecto se centrará en las normas relacionadas con pruebas para la distribución de inversores en Estados Unidos y que se encuentran contenidas en el Standard UL1741.

Para la ejecución de dichas pruebas se dispone actualmente de un equipo diseñado a tal efecto, pero con el mencionado aumento de potencia de la gama sus características quedan limitadas, por ello se requiere la fabricación de otro equipo comprobador cuyo desarrollo será el eje central de este trabajo.

## **1.2.- Objetivos y desarrollo**

El fin de este proyecto es permitir evaluar y dar conformidad a los equipos en ensayos de validación de diseño y producción. Para el desarrollo de las citadas pruebas es necesario generar una red alterna trifásica variable en tensión y frecuencia, para posteriormente evaluar la respuesta del equipo a las condiciones anómalas simuladas. Estas redes anómalas presentan funciones características que se encuentran descritas en los estándares UL1741, IEEE1547 e IEEE1547.1, además fijan unos límites y sus respectivos criterios de actuación que deberán ser estudiados.

La metodología que se seguirá para el desarrollo del proyecto y del equipo comprobador pertinente será la presentada a continuación:

- Estudio de las normas UL1741 e IEEE1547 y aquellas otras que pudieran estar relacionadas. Se evaluarán los procedimientos necesarios para el desarrollo de las pruebas y las características de tensiones y frecuencias de la red a generar por parte de nuestro comprobador.
- Se partirá de la actual configuración del equipo comprobador y se preverán las necesidades de potencia en función de la evolución los equipos que deban ensayarse para, de forma conjunta a los requerimientos de la norma, realizar un análisis completo de las necesidades del equipo a implementar.
- Se procederá a la búsqueda de otros equipos existentes en la actualidad y dedicados al desarrollo de estas pruebas con el fin de tomar ideas o completar los requerimientos.
- Se diseñarán los circuitos y esquemáticos que sean necesarios para la generación del comprobador. Posteriormente se procederá a su validación mediante simulación.
- Se desarrollará un prototipo que cumpla con las especificaciones obtenidas en los distintos análisis y se comprobará su adecuado funcionamiento evaluando ensayos frente al inversor objeto de validación.
- Tras ensayar el equipo comprobador se estudiarán posibles puntos de mejora y se establecerán las líneas futuras del mismo.
- Finalmente se procederá a la validación del equipo comprobador definitivo, a la fabricación del mismo y a la integración de este en los procesos de validación y producción de la familia de inversores 3Play.

## 2.- Normativa

En este apartado se incluye el análisis de la normativa relacionada con los ensayos de diseño y producción que deben superar los equipos 3Play para su distribución en Estados Unidos. Se centra en las pruebas que requieren de la generación de una red alterna trifásica variable tanto en tensión como en frecuencia.

La finalidad de este estudio es la de obtener una serie de necesidades que deberá cumplir el comprobador que se va a implementar. Se partirá de las normas vigentes actualmente: Standard UL1741, Standard IEEE1547 y Standard IEEE1547.1.

### **2.1.- UL1741. Standard for Inverters, Converters, Controllers and Interconnection System Equipment for Use with Distributed Energy Resources**

Es el estándar aplicado a inversores y demás sistemas de interconexión para uso con fuentes de energía distribuidas. Contiene los requerimientos de los equipos que vayan a ser usados en instalaciones aisladas o de conexión a red [1].

El apartado "*MANUFACTURING AND PRODUCTION TESTS*" contiene en el punto 68 "*Utility Voltage and Frequency Variation Test*" los valores de tensión y frecuencia límites, junto a unos tiempos de desconexión máximos, que permiten al equipo estar energizando la red a la que está conectado. Se encuentran recogidos en la "*Table 68.1 Voltage and frequency limits for utility interaction*".

El fundamento de estos rangos es comprobar que el equipo, partiendo de una situación de funcionamiento en condiciones nominales, tiene la capacidad de detectar situaciones anómalas en la red y cesar el aporte de energía cuando ciertos niveles son superados durante un determinado tiempo. Establece que para la validación el equipo deberá ser examinado en al menos una ocasión para cada una de las condiciones especificadas.

El Standard UL1741 contiene por lo tanto unos límites pero no define los procedimientos a desarrollar durante las pruebas. En base a lo establecido en el punto 1.2 de la introducción, que permite usar de forma complementaria el estándar IEEE1547, se realizará la validación con los procedimientos presentes en este.

## 2.2.- IEEE 1547. Standard for Interconnecting Distributed Resources with Electric Power Systems

Estándar para la conexión de recursos distribuidos a redes eléctricas. Provee una serie de especificaciones y requerimientos técnicos además de los procedimientos de los ensayos a realizar [2].

Establece en el apartado 5.2 "*Production tests*" que estos deberán realizarse dentro del procedimiento de fabricación o puesta en marcha del equipo y que deberán seguir los requerimientos de los puntos 5.1.1 y 5.1.2.

El punto 5.1.1 nos remite a los apartados de límites de tensión y frecuencia (4.2.3 y 4.2.4), como respuesta que debe dar el equipo ante una situación anómala de red. En cambio el punto 5.1.2 presenta requerimientos para la sincronización del equipo, aspecto que no se encuentra dentro del ámbito de este proyecto y por lo tanto no será abordado.

La importancia de los límites definidos radica en que valores fuera de los mismos, de forma continuada, pueden acarrear problemas de seguridad tanto personales como en los propios equipos o recursos a los que están conectados, de ahí que se establezcan también unos tiempos máximos durante los cuales puedan seguir inyectando energía aún persistiendo las anomalías. Los tiempos tienen también la función de histéresis, evitando que en instalaciones con muchos equipos conectados, ante las mínimas variaciones en la red, se provoque que muchos equipos se conecten o desconecten al mismo tiempo provocando cambios bruscos en la inyección o demanda y debilitando aún más la red.

El apartado "*4.2.3 Voltage*" incluye la "*Table 1—Interconnection system response to abnormal voltages*" con los valores de tensión y sus respectivos límites de tiempo. De igual forma el apartado "*4.2.4 Frequency*" presenta los límites y tiempos para frecuencias en la "*Table 2—Interconnection system response to abnormal frequencies*".

## 2.3.- IEEE 1547.1. Standard Conformance Test Procedures for Equipment Interconnecting Distributed Resources with Electric Power System

Es el estándar que contiene los procedimientos para los ensayos que permiten dar conformidad a los equipos con respecto al estándar IEEE1547. Incluye pruebas de diseño, producción y puesta en marcha [3].

### 2.3.1.- Requisitos del equipo comprobador

El estándar presenta en el apartado "*4. General requirements*" una lista de características que deben cumplirse durante el desarrollo de las pruebas y que serán parte fundamental de los requisitos a cumplir por nuestro equipo.

En "*4.3 Measurement accuracy and calibration of the testing equipment*" se establece que los equipos de medida deberán tener trazabilidad en su calibración.

El punto "*4.5 Test reports*" señala que los resultados deberán ser incluidos en un informe, donde estarán también otros aspectos relevantes del ensayo como condiciones o criterios de aceptación, consideraciones ingenieriles y modificaciones o excepciones así como sus justificaciones.

En "*4.6 Testing equipment requirements*" se encuentran las características que deberá cumplir la red de prueba a generar, los más significativos son:

- Deberá permitir confirmar el desempeño declarado por el fabricante.
- Los armónicos de voltaje deberán ser inferiores al 2.5% de la distorsión armónica total (THD).
- Los armónicos individuales deberán ser menores al 50% de los límites recogidos en la tabla 3 de la IEEE1547.
- Durante los tests, cuando el voltaje deba ser constante, este no variará más de un  $\pm 1\%$  del valor nominal.
- Para tests de disparo a cierto nivel de tensión o frecuencia, la resolución de la red simulada deberá ser de 0.5a del voltaje o la frecuencia nominales, siendo "a" la precisión declarada por el fabricante.
- El número de conexiones para fases y neutro deberá ser compatible con el equipo a ensayar.

- Una red multifase con neutro deberá proveer voltajes fase-neutro equilibrados con un margen de  $\pm 3\%$  del valor nominal y un desplazamiento de fase dentro de  $\pm 3^\circ$ .
- Para tests de temporización que deban disparar a cierto nivel de tensión o frecuencia, se deberá permitir el cambio desde una tensión  $V1$  a una  $V1 + 0.5(V2 - V1)$  y desde una frecuencia  $f1$  a una  $f1 + 0.5(f2 - f1)$ , dentro de un tiempo inferior al mayor de entre un ciclo o un 1% del tiempo de disparo del equipo a ensayar.
- Como requerimientos del sistema de medida se establece que cada medida no podrá tener una incertidumbre mayor a 0.5 veces la precisión del equipo a ensayo.

### 2.3.2.- Desarrollo de los tests

Se distinguen dos tipos de ensayos: de diseño y de fabricación.

#### 2.3.2.1.- Tests de diseño

Son aquellos que se realizan en una unidad representativa y, salvo otras especificaciones, el equipo debe ser instalado según las especificaciones del fabricante y operado bajo condiciones nominales.

Permite que en el equipo a ensayar, cuando no pueda ser evaluado en uno o más rangos, puedan efectuarse los tests en otros niveles alternativos acordados entre fabricante y la agencia comprobadora. En ese caso deberán realizarse demostrando que se usan las mismas medidas y precisiones y se presentarán estas condiciones en el informe, explicando además el motivo de un régimen de ensayo alternativo.

Los tests de diseño a abordar para el desarrollo del equipo comprobador son los incluidos en los puntos "*5.2 Test for response to abnormal voltage conditions*" y "*5.3 Response to abnormal frequency conditions*".

Existen dos tipos de procedimientos, los destinados a medir la magnitud, tensión o frecuencia, a la que el equipo deja de energizar la red y los encargados de medir el tiempo que esto tarda en suceder.

## Test de magnitud

Para definir la magnitud a la que dispara el equipo se parte de la conexión del equipo a ensayar conforme las instrucciones dadas por el fabricante. Se establecen los parámetros de la fuente en condiciones de operación nominales y se verifica que la configuración del equipo está también en parámetros nominales. Se graba la configuración aplicada y se ajusta el valor de una fase al nivel de comienzo de tensión o frecuencia base ( $V_b$  o  $F_b$ ). Se procede entonces en una fase con el inicio de la rampa que se encuentra definida en el "Annex A" y que se verá a continuación, es necesario asegurar que el resto de fases permanecen en condiciones de generación nominales. Finalmente se grabarán los valores de la magnitud a medir en el momento del disparo. Es necesario que se repita hasta un total de 5 veces por cada fase y para cada una de las fases, además se realizarán otros 5 ensayos en todas las fases simultáneamente.

## Test de tiempos

Para medir los tiempos de disparo del equipo, se parte como en el caso anterior de la instalación y ajuste a valores nominales tanto del equipo a ensayar como de la fuente. Se graba la configuración y se ajusta el parámetro a ensayar a un valor que no exceda, en un 10% en el caso de tensiones y un 1% para frecuencias, el límite de disparo. Tras esperar un periodo  $t_h$ , de al menos 2 veces el tiempo de disparo establecido, se procederá a introducir un escalón que provoque el disparo del equipo. Se mantendrá en ese valor hasta que suceda y se grabará el tiempo empleado. Este ensayo deberá repetirse hasta un total de 5 veces y en una de las fases.

### 2.3.2.2.- Tests de producción

Verifican el adecuado funcionamiento de cada uno de los equipos fabricados y pueden realizarse tanto en el proceso de fabricación como en el de puesta en marcha. El fin de realizar estos ensayos es más una verificación de la adecuada configuración del equipo que una comprobación de requisitos del IEC61730.

Para los tests realizados en esta cláusula, los parámetros funcionales deben ser recogidos sólo una vez. El informe deberá proporcionar una lista con la configuración final y los resultados obtenidos. Según el criterio del fabricante se podrán utilizar los tests que se detallan a continuación o sus correspondientes de diseño.

## Test de magnitud y tiempos

El procedimiento de estos tests podría considerarse un híbrido de los analizados anteriormente. Parte de la conexión y configuración del equipo a probar y de la fuente, verificando que ambos se encuentran en condiciones nominales de operación y grabando los ajustes aplicados. Se establece entonces un punto de disparo, únicamente para una de las funciones de tensión o una de las de frecuencia, situado al menos dos veces por encima de la precisión declarada por el fabricante. Se mantiene la magnitud y se espera hasta que el equipo dispara tomando en ese momento tanto el valor de la magnitud como el tiempo empleado. Para equipos con varias fases se repite este ensayo en cada una de ellas y con el resto de funciones de protección existentes.

### 2.3.3.- Funciones rampa y escalón

Se encuentran definidas en el Annex A, en los puntos A.1 y A.2.

#### 2.3.3.1.- Función rampa

Se emplea para determinar la precisión del parámetro a evaluar con respecto al valor configurado como límite. Parte de un punto de comienzo cercano al punto de disparo, dentro de un 10% en tensiones y un 1% en frecuencias, y sigue una pendiente que es cociente de la tensión o frecuencia nominales por la precisión declarada por el fabricante por un coeficiente de 0.5, todo ello dividido por el doble del tiempo de retardo para la desconexión más el de detección del equipo.

$$pendiente\ m = \frac{Parámetro\ nominal * precisión\ declarada * 0.5}{2 * (tiempo\ de\ retardo + tiempo\ de\ detección)}$$

- a) Parámetro nominal corresponde con los valores de tensión o frecuencia nominales del equipo.
- b) Precisión declarada corresponde a la declarada por el fabricante para el parámetro a medir.
- c) Tiempo de retardo establecido en el test para cada una de las condiciones anómalas.
- d) Tiempo de detección es el tiempo que tarda el equipo en evaluar si la condición está dentro de rango o no.



En la imagen inferior puede verse el desarrollo del parámetro a lo largo de la prueba, partiendo de condiciones nominales, llegando a la condición de partida de la rampa, permaneciendo en él durante el tiempo especificado y finalmente lanzando la rampa.

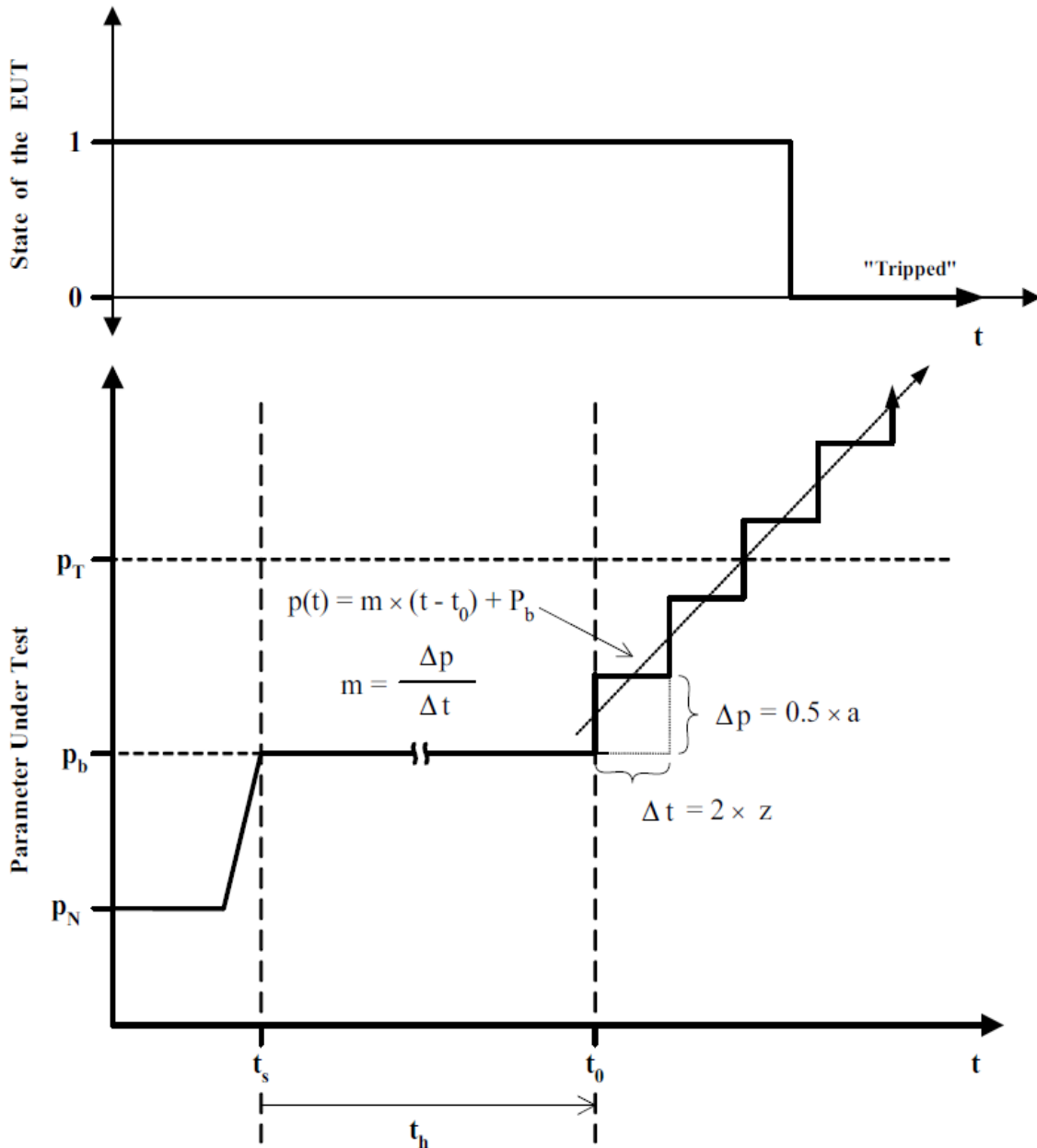


Figura 1: A.2 Graphical representation of magnitude test using ramp function for PUT [3]

Destacar que la pendiente está formada de pequeños escalones de paso 2 veces el tiempo de retardo más el de detección y una altura de 0.5 veces la precisión declarada por el fabricante.

### 2.3.3.2.- Función escalón

Es usada para determinar la precisión del tiempo de retardo que transcurre entre la condición anómala y el disparo o cese del flujo de energía.

Al igual que en el caso anterior el parámetro parte de un punto cercano al de disparo, dentro del 10% en tensiones y del 1% en frecuencias, y cambia en forma de escalón de una amplitud determinada hasta un valor que provoca el disparo del parámetro.

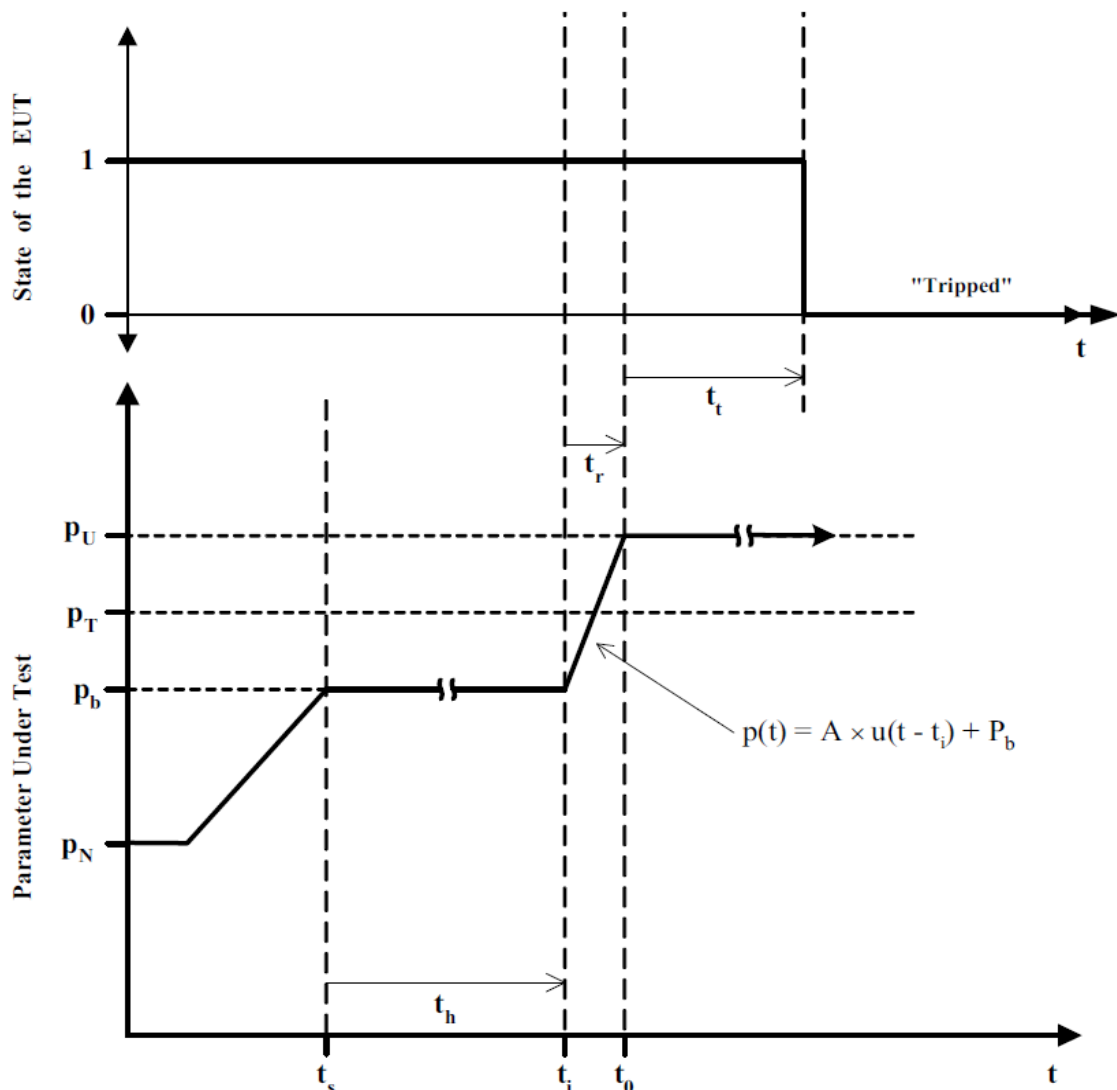


Figura 2: Graphical representation of time test using step function for PUT [3]

En la imagen superior puede verse el desarrollo del ensayo, partiendo de condiciones nominales, llegando a la condición de partida del escalón, permaneciendo en él durante el tiempo especificado y finalmente lanzando el escalón.

### 3.- Análisis de las necesidades de tensiones y frecuencias

Tras quedar definidos los procedimientos para los ensayos se calculan los valores de las tensiones y frecuencias necesarias para la realización de los mismos, para ello se ha implementado una hoja de cálculo de la que se han obtenido los siguientes datos.

#### 3.1.- Parámetros para UL1741 [1] [3]

Como ya se ha observado, este estándar no proporciona un procedimiento a seguir, se van a diseñar los ensayos siguiendo los valores proporcionados por la norma y los procedimientos de la IEEE1547.

##### 3.1.1.- Ensayo de rampas para UL1741

En primer lugar se procede a calcular los valores de diseño que seguirán los ensayos de rampas. Los resultados obtenidos son los siguientes:

Tabla 1: Test de rampa según límites UL1741

UL1741												
Parametrización de ensayos de tensión y frecuencia (usando test rampas IEEE 1547)												
Test	Vnom (V)	lim. inf %	lim. sup %	Tmax (s)	Vt (V)	Vb (V)	Height (V)	Step (s)	m (V/s)	Vu (V)	Vu' (V)	Ttotal (s)
A	277	-	0,50	0,10	138,50	145,43	1,385	0,234	5,92	137,12	135,12	1,976
B	277	0,50	0,88	2,00	243,76	255,95	1,385	4,034	0,34	242,38	240,38	49,392
C	277	1,10	1,37	2,00	304,70	289,47	1,385	4,034	0,34	306,09	308,09	58,267
D	277	1,37	-	0,033	379,49	360,52	1,385	0,100	13,85	380,88	382,88	1,714
Test	Fnom (Hz)	lim. inf (Hz)	lim. sup (Hz)	Tmax (s)	Ft (Hz)	Fb (Hz)	Height (Hz)	Step (s)	m (Hz/s)	Fu (Hz)	Fu' (Hz)	Ttotal (s)
E	60	60,5	-	0,10	60,50	60,00	0,30	0,234	1,28	60,80	61,80	0,490
F	60	-	59,3	0,10	59,30	60,00	0,30	0,234	1,28	59,00	58,00	0,646

Donde:

- Test corresponde a los diferentes niveles a los que puede disparar la tensión (A a D) o frecuencia (E a F).
- Vnom y Fnom corresponden con los valores nominales de tensión y frecuencia.
- lim. sup y lim. inf corresponden con los límites definidos en cada tipo de test.

- T<sub>max</sub> corresponde con el tiempo límite de detección para cada prueba, es un valor especificado por la norma.
- V<sub>t</sub> y F<sub>t</sub> corresponden con la tensión y frecuencia de disparo, sería el nivel seleccionado para evaluar. Se calcula como la tensión o frecuencia nominal por el límite respectivo.
- V<sub>b</sub> y F<sub>b</sub> son los puntos de partida de la rampa, deben estar situados dentro del límite de disparo (un 10% en el caso de las tensiones y un 1% para las frecuencias). En la tabla superior se han aplicado valores del 5% y del 1%.
- Height corresponde a la altura de los escalones de los que se compone la rampa. Se calculan como la tensión o frecuencia nominal por el margen de detección declarado por el fabricante, que en nuestro caso es del 1%, multiplicado por 0.5.
- Step es el paso de cada escalón de la rampa. Se calcula como el doble del tiempo de detección para cada prueba más el tiempo de detección declarado por el fabricante, que en nuestro caso corresponde a un ciclo de red.
- m es la pendiente de la rampa a efectuar, cociente entre height y step. permite conocer la velocidad a la que varían las referencias de tensión y frecuencia.
- V<sub>u</sub> y F<sub>u</sub> son las tensiones y frecuencia últimas que alcanzarán los ensayos. Se han calculado como el punto de disparo más el tiempo de margen para la detección en cada caso.
- V<sub>u'</sub> y F<sub>u'</sub> corresponde a los puntos últimos a alcanzar más un margen para la prueba caso de que el equipo no dispare dentro de los rangos de tiempo especificados. Los márgenes son de 2V<sub>rms</sub> para las tensiones y 1 Hz para las frecuencias.
- T<sub>total</sub> es el tiempo total de duración de la prueba. tiempo desde que se parte del punto base hasta que se llega al punto ultimo más el margen asignado.

De los datos obtenidos se tienen los siguientes límites de diseño:

- La máxima tensión de rampa son 382.88V<sub>rms</sub> y la mínima 135.12V<sub>rms</sub>.
- La máxima frecuencia de rampa a alcanzar son 61.8Hz y la mínima 58Hz.
- Las mayores pendientes corresponden con 13.85V<sub>rms</sub>/s y 1.28Hz/s.
- La prueba de mayor duración se completa en 58.267s.

### 3.1.2.- Ensayo de escalón para UL1741

A continuación se presentan los valores de diseño que seguirán los ensayos en escalón. Los resultados obtenidos son los siguientes:

Tabla 2: Test de escalón según límites UL1741

UL1741										
Parametrización de ensayos de tensión y frecuencia (usando test escalón IEEE 1547)										
Test	Vnom (V)	lim. inf %	lim. sup %	Tmax (s)	Vt (V)	Vb (V)	Vu (V)	t0-ti (s)	A (V/s)	Ttotal (s)
A	277	-	0,50	0,10	138,50	145,43	124,65	0,017	-1246,50	0,117
B	277	0,50	0,88	2,00	243,76	255,95	219,38	0,017	-2193,84	2,017
C	277	1,10	1,37	2,00	304,70	289,47	335,17	0,017	2742,30	2,017
D	277	1,37	-	0,033	379,49	360,52	417,44	0,017	3415,41	0,050
Test	Fnom (Hz)	lim. inf (Hz)	lim. sup (Hz)	Tmax (s)	Ft (Hz)	Fb (Hz)	Fu (Hz)	t0-ti (s)	A (Hz/s)	Ttotal (s)
E	60	60,5	-	0,10	60,5	60,0	61,11	0,017	72,60	0,117
F	60	-	59,3	0,10	59,3	60,0	58,71	0,017	-71,16	0,117

Donde:

- Test corresponde a los diferentes niveles a los que puede disparar la tensión (A a D) o frecuencia (E y F).
- Vnom y Fnom corresponden con los valores nominales de tensión y frecuencia.
- lim. sup y lim. inf corresponden con los límites definidos en cada tipo de test.
- Tmax corresponde con el tiempo límite de detección para cada prueba, es un valor especificado por la norma.
- Vt y Ft corresponden con la tensión y frecuencia de disparo, sería el nivel seleccionado para evaluar. Se calcula como la tensión o frecuencia nominal por el límite respectivo.
- Vb y Fb son los puntos de partida del escalón, deben estar situados dentro, en un 10% en el caso de las tensiones y un 1% para las frecuencias, del límite de disparo. En la tabla superior se han aplicado valores del 5% y del 1%.
- Vu y Fu son las tensiones y frecuencia últimas que alcanzarán los ensayos. Se han calculado según normativa aplicando una mayoración del 10% de la tensión de disparo en tensiones y del 1% en frecuencias.
- Ttotal es el tiempo total de duración de la prueba. tiempo desde que se parte del punto base hasta que se llega al punto último más el margen asignado.

De los datos obtenidos se tienen los siguientes límites:

- La máxima tensión es de 417.44Vrms y la mínima 124.65Vrms.
- La máxima frecuencia a alcanzar son 61.1Hz y la mínima 58.71Hz.
- Los mayores escalones corresponden con 3415.41Vrms/s y 72.6Hz/s.
- La prueba de mayor duración se completa en 2.017s.

### 3.2.- Parámetros para IEEE1547 [2] [3]

Según lo establecido en el estándar se procede a calcular los puntos críticos de los ensayos. En este caso tanto los límites como los procedimientos seguidos pertenecen a la norma. Los resultados obtenidos son los siguientes:

#### 3.2.1.- Ensayo de rampas para IEEE1547

Los valores de diseño que seguirán los ensayos en rampa para esta normativa, con los parámetros calculados de forma análoga a la seguida para la “Tabla 1: Test de rampa según límites UL1741”, son los siguientes:

Tabla 3: Test de rampa según límites IEEE1547

IEEE1547												
Parametrización de ensayos de tensión y frecuencia (usando test rampas IEEE 1547)												
Test	Vnom (V)	lim. inf %	lim. sup %	Tmax (s)	Vt (V)	Vb (V)	Height (V)	Step (s)	m (V/s)	Vu (V)	Vu' (V)	Ttotal (s)
L_L_L	277	-	0,45	0,16	124,65	130,88	1,385	0,354	3,912	123,27	121,27	2,812
L_L	277	0,45	0,60	1,00	166,20	174,51	1,385	2,034	0,681	164,82	162,82	19,209
L	277	0,60	0,88	2,00	243,76	255,95	1,385	4,034	0,343	242,38	240,38	49,392
H	277	1,10	1,20	1,00	304,70	289,47	1,385	2,034	0,681	306,09	308,09	29,379
H_H	277	1,20	-	0,16	332,40	315,78	1,385	0,354	3,912	333,79	335,79	5,467
Test	Fnom (Hz)	lim. inf (Hz)	lim. sup (Hz)	Tmax (s)	Ft (Hz)	Fb (Hz)	Height (Hz)	Step (s)	m (Hz/s)	Fu (Hz)	Fu' (Hz)	Ttotal (s)
UF1	60	-	57,0	0,16	57,00	57,57	0,30	0,354	0,847	56,70	56,20	0,833
UF2	60	59,5	57,0	2,00	59,50	60,00	0,30	4,034	0,074	59,20	57,20	8,723
OF1	60	60,5	62,0	2,00	60,50	60,00	0,30	4,034	0,074	60,80	61,80	8,723
OF2	60	62,0	-	0,16	62,00	61,38	0,30	0,354	0,847	62,30	63,30	0,892

De los datos obtenidos se tienen los siguientes límites de diseño:

- La máxima tensión de rampa son 335.79Vrms y la mínima 121.27Vrms.
- La máxima frecuencia a alcanzar son 63.3Hz y la mínima 56.2Hz.
- Las mayores pendientes corresponden con 3.912Vrms/s y 0.847Hz/s.
- La prueba de mayor duración se completa en 49.392s.

### 3.2.2.- Ensayo en escalón para IEEE1547

Los valores de diseño han sido calculados de forma análoga a la seguida en la “Tabla 2: Test de escalón según límites UL1741”. Son los siguientes:

Tabla 4: Test de escalón según límites IEEE1547

IEEE1547										
Parametrización ensayos tensión y frecuencia (usando test escalón IEEE 1547)										
Test	Vnom (V)	lim. inf %	lim. sup %	Tmax (s)	Vt (V)	Vb (V)	Vu (V)	t0-ti (s)	A (V/s)	Ttotal (s)
L_L_L	277	-	0,45	0,16	124,65	130,88	112,19	0,017	-1121,85	0,177
L_L	277	0,45	0,6	1	166,20	174,51	149,58	0,017	-1495,80	1,017
L	277	0,6	0,88	2	243,76	255,95	219,38	0,017	-2193,84	2,017
H	277	1,1	1,2	1	304,70	289,47	335,17	0,017	2742,30	1,017
H_H	277	1,2	-	0,16	332,40	315,78	365,64	0,017	2991,60	0,177
Test	Fnom (Hz)	lim. inf (Hz)	lim. sup (Hz)	Tmax (s)	Frec. Ft (Hz)	Frec. Fb (Hz)	Frec. Fu (Hz)	t0-ti (s)	A (Hz/s)	Ttotal (s)
UF1	60	-	57	0,16	57	57,57	56,43	0,017	-68,40	0,177
UF2	60	59,5	57	2	59,5	60	58,91	0,017	-65,70	2,017
OF1	60	60,5	62	2	60,5	60	61,11	0,017	66,30	2,017
OF2	60	62	-	0,16	62	61,38	62,62	0,017	74,40	0,177

De los datos obtenidos se tienen los siguientes límites:

- La máxima tensión es de 365.64Vrms y la mínima 112.19Vrms.
- La máxima frecuencia a alcanzar son 62.62Hz y la mínima 56.43Hz.
- Los mayores escalones corresponden con 2991.6Vrms/s y 72.4Hz/s.
- La prueba de mayor duración se completa en 2.017s.





## 4.- Análisis de las necesidades de potencia

Los inversores de la familia 3play se encuentran formados, desde el punto de conexión de tensión continua o lado del panel fotovoltaico, hasta la salida de tensión alterna o lado de red, por:

- Filtro de entrada: condensadores diferenciales y de modo común, conforman un circuito de bobina y condensador (LC) encargado de filtrar la energía proveniente del panel y adecuarla al inversor [4].
- Bloque inversor: está formado por el bus de continua, encargado de almacenar la energía, así como por el conjunto de semiconductores encargados de, mediante su conmutación, generar la tensión alterna de la salida [4].
- Filtro de salida: formado por un conjunto de condensadores y bobinas que se encargan de adecuar la forma de onda de tensión y corriente a la salida. Eliminan armónicos y componentes de continua [5].

Este último bloque es el que estará conectado a la red simulada y por lo tanto constituye la carga que deberá ser alimentada, en nuestra simulación corresponde a Carga\_TR.

Para calcular de forma preliminar la energía que consumirá dicha carga se realiza una simulación en PSIM a condiciones de máxima tensión de ensayo:

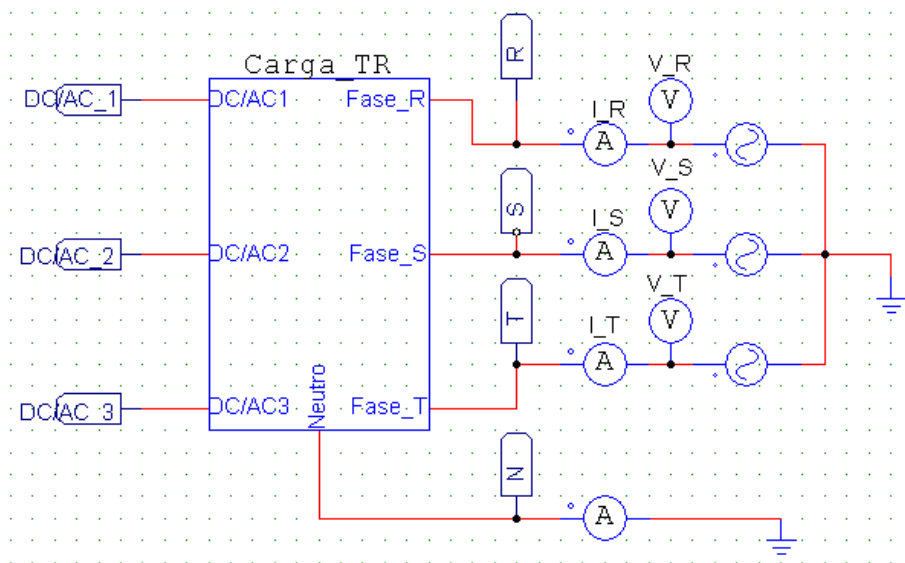


Figura 3: Circuito simulado para análisis de potencia (PSIM)

Se procederá en primer lugar a simular el circuito “Resultados de la simulación de análisis de potencia” a 350 Vrms por fase y 60Hz.

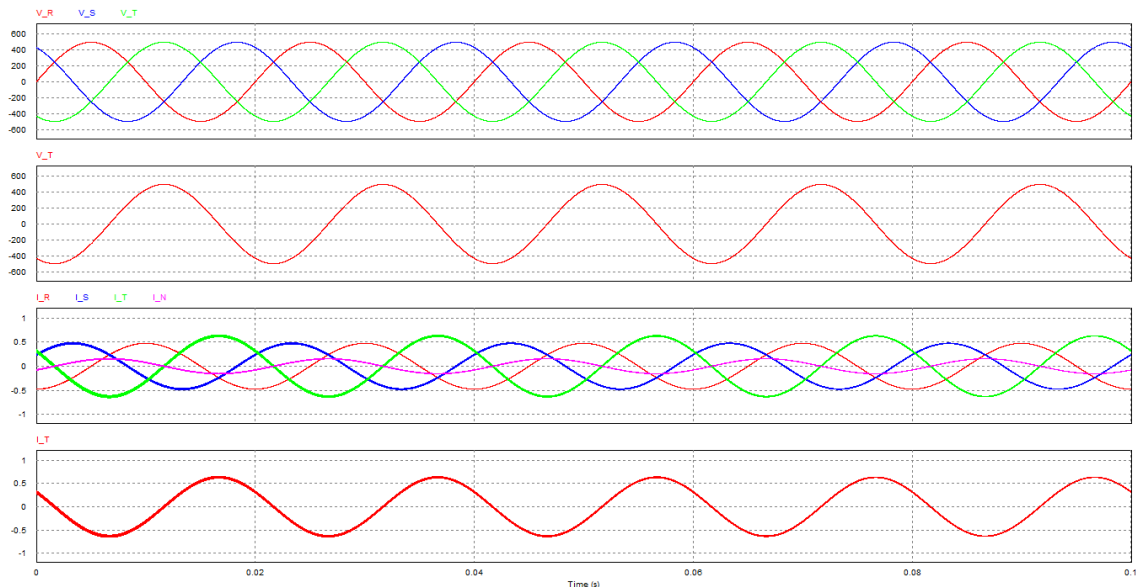


Figura 4: Resultados de la simulación de análisis de potencia (PSIM)

Como se puede comprobar en la primera gráfica obtenida de la simulación, la tensión de fase es de 350Vrms.

Posteriormente se estudian los valores de las intensidades que recorren las líneas escogiendo la mayor, la intensidad de la fase T, obteniendo un valor para la corriente de 0.447 Arms.

Combinando estos datos se obtiene la potencia demandada por la carga por fase, para la fase más desfavorable. El valor obtenido, producto de tensión y corriente, es de 175.031 VA.

En vista a este resultado se decide sobredimensionar en 2 sentidos. En primer lugar se tomará como potencia por fase la de resultado más desfavorable. En segundo lugar y como previsión a futuros aumentos en la demanda se optará por tomar un valor mínimo de 500 VA por fase, lo que conllevaría un segundo factor de sobredimensionamiento de 2.4 aproximadamente.

## 5.- Estudio de soluciones

Para la realización de los ensayos en rampa y escalón se han empleado hasta ahora fuentes genéricas con salida de tensión alterna programables o con entradas de señal externa que configuran las formas de tensión demandadas. Como otra opción se estudiará también la posibilidad de adaptar amplificadores de audio, utilizados en equipos musicales y que se encargan de dotar de potencia a una señal entrante. Por último se afrontará el diseño de un hardware específico, que partirá del existente e intentará dotarlo de mayor potencia y robustez.

### 5.1.- Fuentes de tensión alterna

Para los rangos de tensiones y frecuencias necesarios, así como para la potencia que demanda nuestra carga, las opciones existentes en el mercado serían:

#### 5.1.1.- Ametek/California Instruments [6]

En la gama de fuentes de tensión alterna variable de este fabricante encontraríamos como ejemplos más significativos:

- 225iX/X: tensión programable de fase de hasta 300Vrms y corriente de 3.25Arms, con una potencia total de 750VA por fase. La frecuencia parte de los 16 hasta los 1000Hz. Sus dimensiones son 133x483x584mm y pesa 26Kg. El precio de este equipo sería de 16.450€ + IVA.
- 3000Lx/Ls: fuente también programable con una tensión de fase de hasta 300Vrms y una corriente de 3.3Arms, 1000VA de potencia por fase. La frecuencia de operación también parte de 17 hasta 1000Hz. Dimensiones de 267x483x602mm y un peso total de 87.7Kg. Precio de 20.000€ + IVA.

#### 5.1.2.- Chroma [7]

- 61700: fuente programable trifásica de hasta 300Vrms por fase y de 500 a 2000VA de potencia también por fase. La frecuencia de trabajo parte desde los 15 hasta los 1200Hz y permite el control del ángulo de 0 a 360°. Precio de 69.157€ + IVA.

### 5.1.3.- Conclusiones

Como se observa ninguna de las fuentes llegan a ofrecer los niveles de tensión demandados por nuestra aplicación, por lo que sería necesario añadir un transformador que además de encarecer aún más el precio, conllevaría la posibilidad de distorsión de la onda a la salida. Por todo ello esta opción es rechazada. Todas las fuentes encontradas presentan además unas dimensiones que las hacen poco manejables, algo que podría resultar de interés a la hora de realizar los ensayos. Por último se estudia el factor económico, que resultaría elevado para desarrollar únicamente este tipo de ensayos.

### 5.2.- Amplificadores de audio

Dada la naturaleza del equipo, se valora también la posibilidad de emplear amplificadores de audio como etapa que proporcione potencia a una señal generada mediante Labview y un DAQ.

Esta opción es algo más incierta a la anterior ya que este tipo de equipos son diseñados para alimentar cargas muy concretas, con impedancias de 2, 4 y 8 ohmios, por lo que no conocemos el efecto que esto podría tener sobre a la carga que es principalmente capacitiva. De entre los fabricantes existentes se consulta la viabilidad de esta opción a Behringer, Samson y Crown, todos ellos nos remiten a los valores de potencia activa de sus equipos, a las impedancias de salida usuales y coinciden al señalar que sus equipos no son probados para trabajar alimentando cargas capacitivas o generando potencia reactiva.

Destacar también que estos equipos se caracterizan por una baja eficiencia de forma que debería escogerse uno que estuviera bastante sobredimensionado.

En conclusión, una solución que incluyera este tipo de equipos partiría de la base de no disponer de datos de funcionamiento en las condiciones de los ensayos. Además, aunque se ha solicitado información a los fabricantes, estos se encuentran demasiado especializados en aplicaciones de audio y no han considerado otros usos similares al nuestro ni probado esos casos. Desarrollar esta vía de estudio conllevaría tener que fabricar un primer prototipo que lo incluyera y hacer las pruebas que se considerasen por lo que, al igual que la anterior, esta opción también es descartada.

### 5.3.- Inversor conmutado o 3Play

Se estudian diversos esquemas pero la opción del diseño de un hardware de forma expresa para la aplicación se descarta debido a la ya existencia, dentro de la propia empresa, de herramientas que posibilitarían esa función como podría ser el emplear la etapa de salida de uno de los actuales inversores de la familia 3Play [4] [5].

Aprovechando esa etapa se plantean diversas topologías:

#### 5.3.1.- Topología 1

Partiendo de una alimentación monofásica, esta topología añadiría un sistema de precarga que evita picos de corriente en la carga del bus de continua. El posterior transformador elevador se encargaría de proporcionar una mayor tensión al bus además de aislamiento galvánico respecto de la entrada. Finalmente un elevador entre el bus y el bloque inversor permitiría conseguir mayores tensiones a la salida.

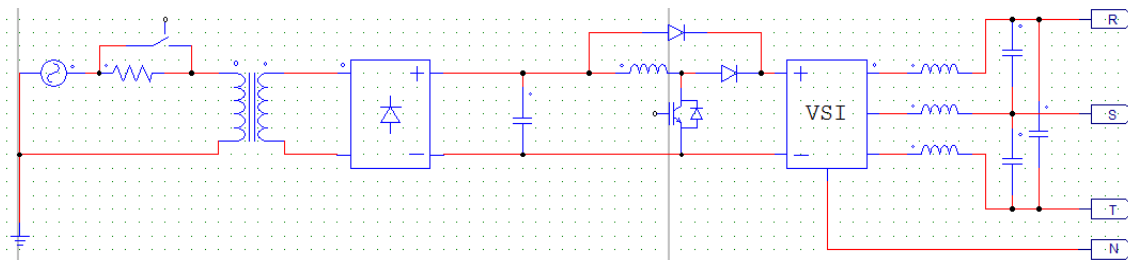


Figura 5: Inversor monofásico y topología 1 (PSIM)

Tabla 5: Coste topología 1

ZONA	ELEMENTO	DISPOSITIVO	UDS.	PRECIO UD.	PRECIO
Entrada	Transformador 1:1		1	150	150
	Relé	230 VAC 10A	1	10,77	10,77
	Resistencia	470Ω 15W	1	2,65	2,65
Rectificador	Puente rectificador	400V 12A	1	3,46	3,46
Bus DC	Condensadores	500μF 400Vdc	6	10	60
Elevador	Módulo IGBT	600V 12A	8	2,65	21,2
	Diodo de pot.	600V 12A	1	2,03	2,03
	Bobina	1000μH 10Aadc	1	7,07	7,07
	Condensador	20μF 800Vdc	6	8,36	50,16
Salida	Filtro LC Bobina	1000μH 10Aadc	3	7,07	21,21
	Filtro LC Condensador	20μF 800Vdc	3	8,36	25,08
	Fusible	600V 1,5A	4	10,95	43,8
COSTE TOP.1					397,43

### 5.3.2.- Topología 2

Desde una alimentación trifásica y con el consiguiente sistema de precargas, se necesitaría emplear un rectificador para la misma. Los condensadores necesarios para el bus deberían ser capaces de soportar mayores tensiones. Con esta topología no se llegarían a las tensiones de salida demandadas por lo que se necesitarían 3 transformadores elevadores monofásicos, con lo que esto conllevaría en coste y distorsión de la onda a la salida aunque proporcionando aislamiento galvánico.

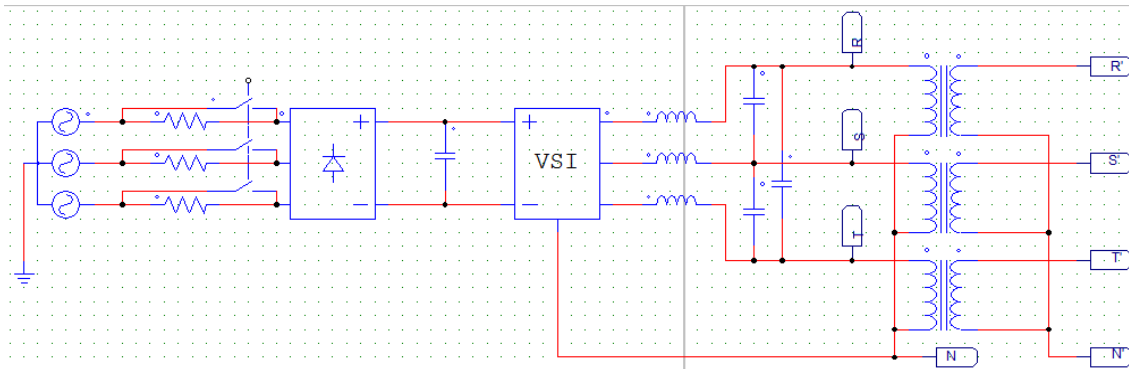


Figura 6: Inversor trifásico y topología 2 (PSIM)

Tabla 6: Coste topología 2

ZONA	ELEMENTO	DISPOSITIVO	UDS.	PRECIO UD.	PRECIO
Entrada	Relé	230 VAC 10A	3	10,77	32,31
	Resistencia	470Ω 15W	3	2,65	7,95
Rectificador trifásico	Puente rectif. Trifásico	800V 20A	1	11,95	11,95
Bus DC	Condensadores	1100V 25uF	6	10	60
Salida	Filtro LC Bobina	1000μH 10Adc	3	7,07	21,21
	Filtro LC Condensador	20μF 800Vdc	3	8,36	25,08
	Fusible	600V 1,5A	4	10,95	43,8
	Transformador 1:1		3	150	450
COSTE TOP.2					652,30

### 5.3.3.- Conclusiones

Como se aprecia en las tablas de costes, el elemento con mayor influencia es el transformador. Teniendo esto en consideración y también que los elementos que conforman la topología 1 se encuentran, de forma prácticamente idéntica, en lo que constituyen los modelos actuales de inversores 3Play TL M, se plantea el uso directo de uno de estos equipos como plataforma hardware a emplear aun teniendo en cuenta que existirían ciertas limitaciones en tensiones generadas.

## 6.- Empleo de 3Play TL M como fuente

Este apartado contiene el estudio del empleo de un equipo 3Play TL M como fuente generadora de tensiones y frecuencias variables para la realización de los ensayos previamente analizados.



*Figura 7: Inversor 3Play TL M [16]*

### 6.1.- Descripción del equipo

Los inversores 3Play TL M son equipos que permiten convertir la tensión continua de instalaciones fotovoltaicas en tensión alterna para uso aislado o conectados a red. Disponen de doble entrada fotovoltaica y de un sistema de doble seguimiento de punto de máxima potencia o MPPT. Este sistema está formado en parte por un convertidor elevador de continua que le permite conseguir la tensión óptima en el bus para una mayor eficiencia en la generación. El equipo dispone también de un bus de continua encargado de almacenar energía para que posteriormente el bloque inversor la transforme en una salida de tensión alterna. Posee (como puede verse en la imagen) de filtros tanto a la entrada como a la salida.

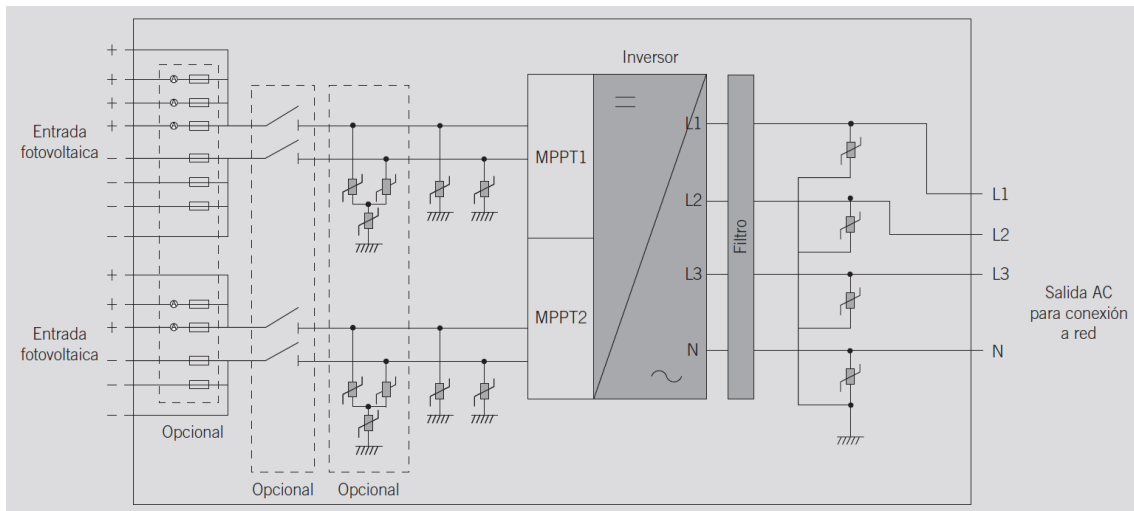


Figura 8: Esquema inductor 3Play TL M [16]

## 6.2.- Lay-out

Con el empleo de este equipo la disposición de los elementos necesarios quedaría de la siguiente forma:

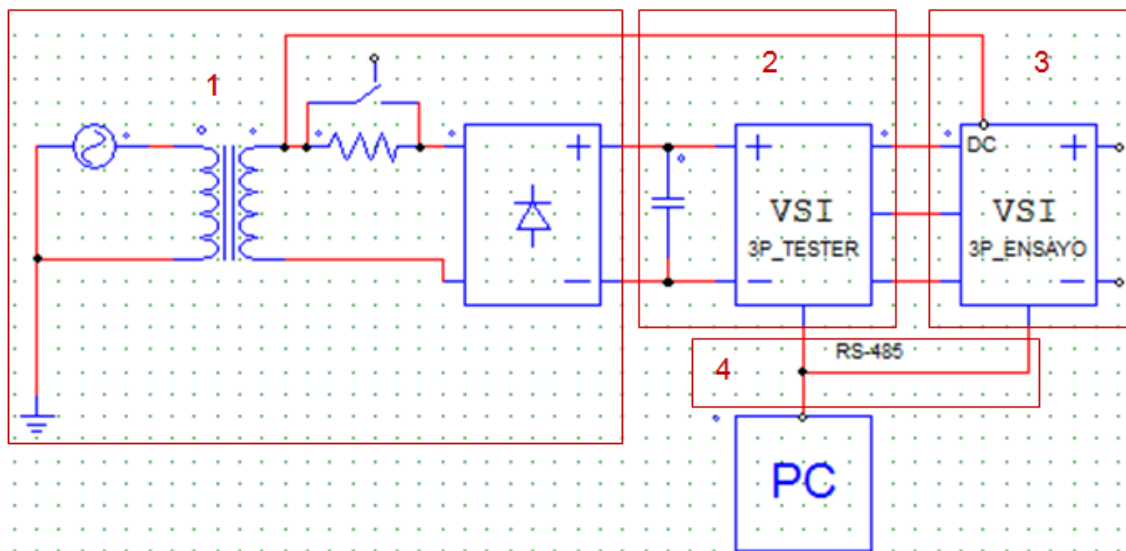


Figura 9: Disposición de elementos para los tests (PSIM)

El elemento 1 comprende la fuente de alimentación DC que se encargará de proporcionar, tanto al 3Play fuente como al 3Play a ensayar la tensión necesaria para su funcionamiento. Esta fuente estará constituida por una fuente de DC aislada además de un sistema de precarga que limite la corriente para una puesta en funcionamiento del bus de forma controlada. Se dispone en INGETEAM de fuentes como el modelo AQD0200 [8] que cumplen con los requerimientos necesarios por lo que no se incluirá el desarrollo de la misma en este proyecto.



El elemento 2 incluye el equipo que se encargará de proporcionar la red trifásica generada. Este equipo está formado por un inversor 3Play que estará comunicado con el inversor objeto de ensayo además de con un PC o DAQ que lo monitorizará.

El elemento 3 corresponde al equipo a ensayar y estará conectado a la red trifásica generada además del 3Play que actuara como fuente y a un PC vía RS-485.

El medio de transmisión y protocolo están incluidos en el elemento 4. Se estudiarán como opciones I2C y SPI, funciones soportadas por la tarjeta controladora del equipo, además de otros como RS-485 o UART ya que las velocidades de transmisión de estos son superiores.

Se considerará también la posibilidad de monitorizar todo el proceso desde el propio equipo fuente o mediante un PC de forma directa a través de un DAQ.

### **6.3.- Análisis de viabilidad**

Puesto que es necesario verificar para el desarrollo de las pruebas el tiempo que transcurre entre que comienza la situación anormal y que el equipo deja de energizar la red, necesitaremos una entrada de señales en el equipo que va a realizar el ensayo y una salida en el equipo a ensayar que nos de la información de esos momentos o puntos de disparo.

Para ello se analizan diversas entradas y salidas de comunicación del equipo [9] [10] a fin de establecer los tiempos de retardos de cada una de ellas, ya que es conveniente que sean lo más rápidas posibles a fin de tener unas medidas más precisas.

#### **6.3.1.- Puertos de salida**

Esta función ya se encuentra implementada actualmente en los equipos y emplea la salida OUT\_19, que debe atravesar desde el controlador únicamente un buffer que le introducirá un retardo máximo de 0.177us.

### 6.3.2.- Puertos de entrada

Para las entradas se han tenido en cuenta las siguientes posibilidades [10]:

Entrada IN\_19: corresponde a una entrada de conector auxiliar. Desde este conector hasta el pin del controlador la señal deberá atravesar un buffer o registro, que le introducirá un retardo aproximado de 20ns, además de un filtro RC que la retrasará 1.65us (hasta carga del 99% del condensador, para una carga del 63% serían 330ns), ambos en los casos más desfavorables. Esta entrada presentaría por lo tanto un retardo total de 1.67us.

Entradas P11 y P14: entradas libres situadas en el mismo conector. Tienen como principal desventaja que se encuentran controladas por el bus I2C y el tiempo de refresco del mismo es notablemente más lento respecto a la opción anterior.

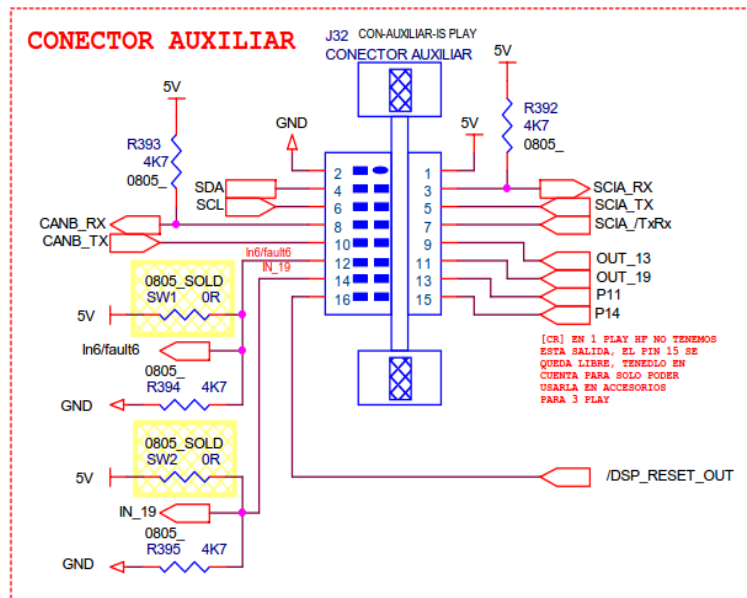


Figura 10: Localización salida OUT\_19 y entrada IN\_19 [9]

Se decide por lo tanto, por accesibilidad y menor retardo, emplear la entrada IN\_19 para recibir la señal de desconexión del equipo.

### 6.3.3.- Conexiones de potencia

Por último queda comprobar que los equipos son compatibles en cuanto a número de fases y conexiones a neutro. Puesto que tanto el equipo a ensayar como el que se va a tratar de adaptar como fuente son iguales, las conexiones entre ambos son perfectamente realizables al presentar 3 conectores para las fases más el neutro.

## 6.4.- Simulaciones

Este capítulo contiene las simulaciones realizadas sobre un modelo existente del inversor 3Play [11]. En primer lugar, empleando el programa VisualC++ sobre la programación del inversor obtendremos los archivos .dll necesarios para configurar el esquemático del equipo. Posteriormente y mediante Psim, realizaremos la simulación sobre los circuitos que éste contiene. Se modificarán también los esquemáticos para que incluyan las cargas correspondientes al filtro de salida del equipo a ensayar.

Como se verá a continuación se ha incluido además de la metodología seguida para realizar las simulaciones, el análisis de los resultados y las posibles alternativas a la topología de inversor existente.

### 6.4.1.- Test de relés y adaptación del mismo

De forma preliminar, para comprobar que el inversor es capaz de proporcionar la tensión que se le demanda, se partirá de la simulación desde el procedimiento creado para evaluar el estado de los relés. Este procedimiento se basa en generar una pequeña tensión en lazo abierto para que sea detectada por las captaciones del equipo. Se decidió aprovechar este proceso para, de una forma rápida y que no interviniera mucho en la programación existente, comprobar que el equipo era capaz de generar frente a una carga desequilibrada como es el caso de nuestro inversor.

El equipo que se utilizará en la simulación es un 3Play 20TL, a este esquemático será necesario realizarle las siguientes modificaciones:

- Se cambia la fuente que simula el panel por una fuente de tensión genérica para adaptar mejor el modelo a la configuración. Esta fuente de tensión deberá proporcionar un 20% más de tensión que la necesaria por el bus debido a la programación del modelo, por lo que esta se situará en 940V.

$$V_{bus} = V_{rms} * \sqrt{2} * 2 * 1.2 = 940.17V$$

- Se añade al módulo inversor la generación del neutro mediante un divisor capacitivo entre dos de las fases, necesaria para la conexión de la carga.
- Se crea un nuevo bloque para la carga que está compuesto por el filtro de salida del equipo e incluye en las salidas del inversor las conexiones a esta.

Ya que la tensión que genera el procedimiento es de 70Vrms, muy inferior a los 277Vrms de nuestro valor de tensión nominal para los ensayos, se modificará la programación para llevarlo hasta este nivel.

#### 6.4.2.- Equipo sin generación de neutro

En primer lugar se va a comprobar que los cambios efectuados son correctos y que el inversor genera la tensión de consigna. Se procede a la simulación del equipo con los siguientes parámetros de configuración:

- Modelo TL\_20K0.
- Tensión de salida deseada 277Vrms.
- Tensión de alimentación de 940V.
- Generación del neutro no conectada.
- Carga (filtro del 3PLAY a ensayo) no conectada.

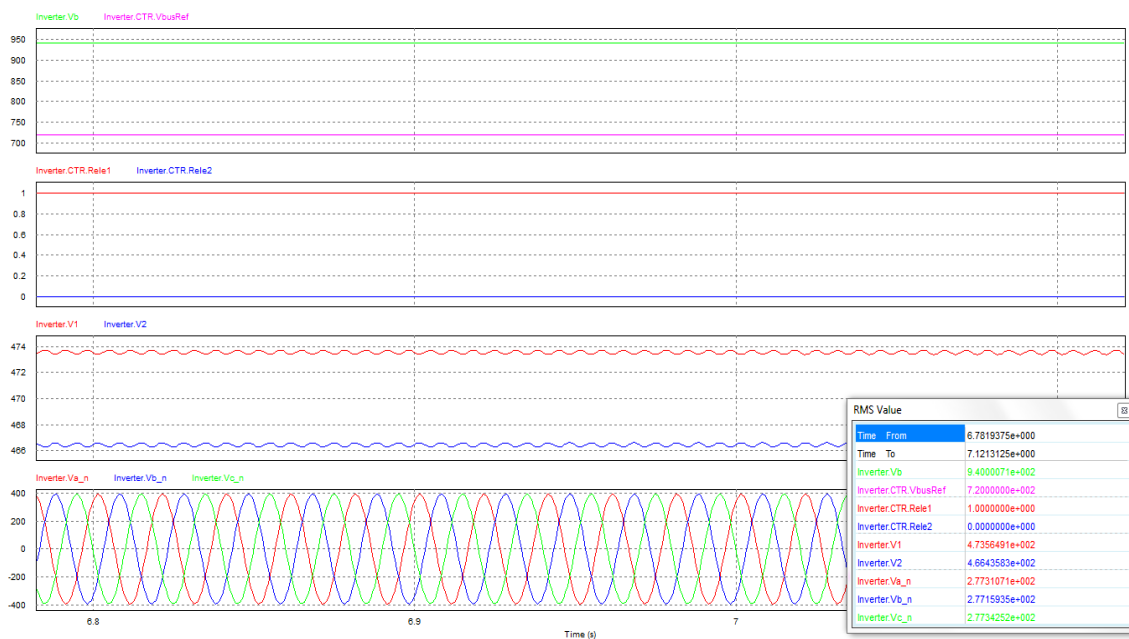


Figura 11: Resultado de la simulación sin generación de neutro II (PSIM)

Tabla 7 Tensión obtenida en las fases

Inverter.Va_n (Vrms)	Inverter.Vb_n (Vrms)	Inverter.Vc_n (Vrms)
277.31	277.16	277.34

Los valores obtenidos indican que la tensión en los semibuses permanece estable y que la tensión generada está equilibrada respecto al neutro, por lo que se considera que la configuración del inversor es la adecuada.

### 6.4.3.- Equipo con generación de neutro y sin carga

Simulación del equipo 3PLAY con los siguientes parámetros de configuración:

- Modelo TL\_20K0.
- Tensión de salida deseada 277Vrms.
- Tensión de alimentación de 940V.
- Generación del neutro mediante divisor capacitivo entre 2 de las fases conectada.
- Carga (filtro del 3PLAY a ensayo) no conectada.

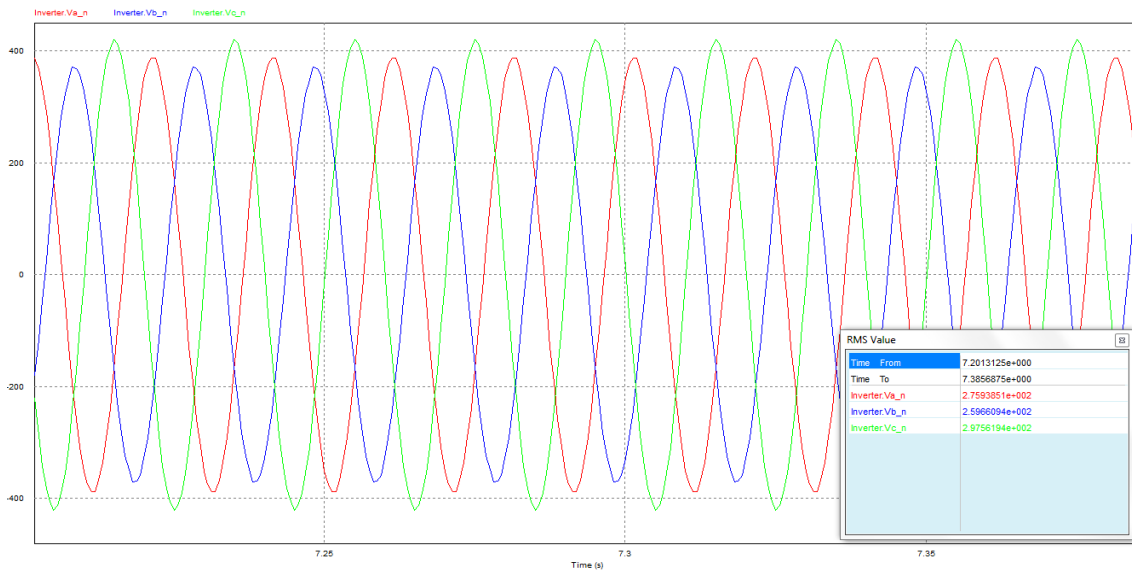


Figura 12: Tensión referida a tierra a la salida del inversor (PSIM)

Tabla 8: Tensión obtenida en las fases

Inverter.Va_n (Vrms)	Inverter.Vb_n (Vrms)	Inverter.Vc_n (Vrms)
275.94	259.66	297.56

Como se observa en este caso existe un desequilibrio de tensión entre las fases y el neutro, esto es debido a que el inversor opera generando en lazo abierto y al colocar en la salida una carga desequilibrada como la necesaria para la generación del neutro, hace que las tensiones a la salida no sean iguales.

En conclusión, este método para operar el inversor no es válido debido a que las tensiones no están equilibradas respecto al neutro, que queda flotante de estas, por lo que deberá implementarse otra topología que sí genere la red equilibrada necesaria.

#### 6.4.4.- Equipo con generación de neutro, conexión a punto medio de bus y sin carga

Como alternativa sencilla de implementar en la topología del inversor, se estima la posibilidad de operarlo con una conexión del neutro generado al punto medio de bus que provoque que este no quede flotante respecto de las tensiones generadas. La simulación se realiza en este caso siguiendo los siguientes parámetros:

- Modelo TL\_20K0.
- Tensión de salida deseada 277Vrms.
- Tensión de alimentación de 940V.
- Generación del neutro mediante divisor capacitivo entre 2 de las fases y unión al punto medio del bus.
- Carga (filtro del 3PLAY a ensayo) no conectada.

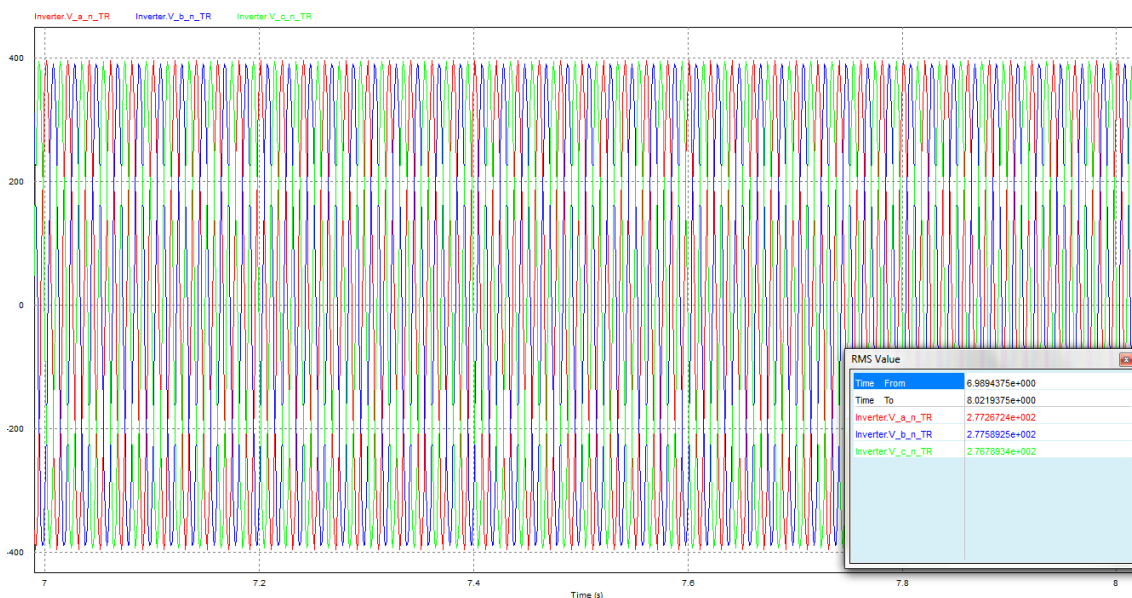


Figura 13: Tensión obtenida a la salida referida al neutro generado (PSIM)

Tabla 9: Tensión obtenida en las fases

Inverter.Va_n (Vrms)	Inverter.Vb_n (Vrms)	Inverter.Vc_n (Vrms)
277.27	277.59	276.79

La gráfica superior corresponde a los valores de tensión obtenida a la salida referida al neutro generado. Muestra que la salida respecto a ese punto se encuentra equilibrada y que cada fase proporciona 277Vrms.

En la figura inferior, en la primera gráfica, se encuentran recogidos los valores de tensión de los dos semibuses referidos al punto medio. Esta gráfica es de especial interés ya que si existiera una desviación en las tensiones de cada semibus, los condensadores que conforman estos podrían verse sometidos a tensiones mayores a las de diseño, provocando fallos en el funcionamiento o incluso su destrucción. El desequilibrio del bus deberá ser estudiado, por lo tanto, en caso de que fuera necesaria la realización de alguna estrategia de control en la tensión de estos elementos. La segunda gráfica contiene la tensión diferencial entre semibuses, se observa una aparente estabilidad, aunque será necesario simularla posteriormente por un tiempo prolongado para confirmar este hecho. En la última gráfica está representada la corriente en el punto medio del bus cuyo valor corresponde aproximadamente a unos 0.650Arms.

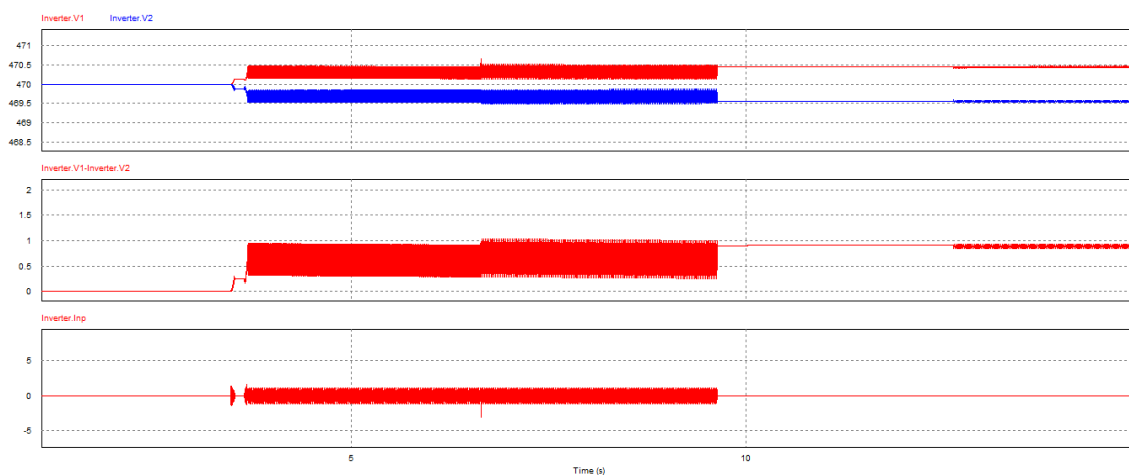


Figura 14: Tensión en los semibuses, diferencia de tensión entre ambos y corriente en punto medio del bus (PSIM)

#### 6.4.5.- Equipo con generación de neutro, conexión a punto medio de bus y con carga

Se comienza simulando el modelo realizado con los siguientes parámetros de configuración:

- Modelo TL\_20K0.
- Tensión de salida deseada 277Vrms.
- Tensión de alimentación de 940V.
- Generación del neutro mediante divisor capacitivo entre 2 de las fases y unión al punto medio del bus conectada.
- Carga (filtro del 3PLAY a ensayo) conectada.

Como puede verse en la siguiente figura las tensiones generadas son equilibradas y los valores de las mismas, recogidas en la tabla, son idénticos a los obtenidos en el caso del equipo sin la generación de neutro.

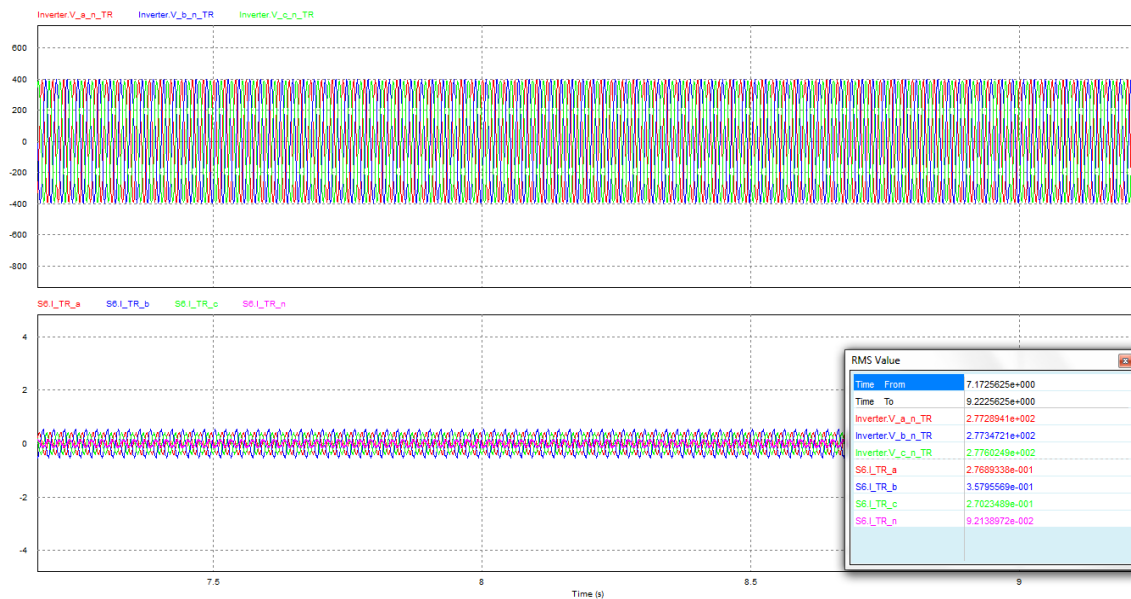


Figura 15: Tensión e intensidad de la carga (PSIM)

Tabla 10: Comparación de las tensiones obtenidas con los valores previos

Fase	S6.V_(fase)_n_TR	Inverter.V(fase)_n
a	277.29	277.31
b	277.35	277.16
c	277.60	277.34

Tabla 11: Comparación de las corrientes con el estudio de necesidades

Fase	S6.I_TR_(fase)	I_(fase)
a	0.277	0.266
b	0.358	0.267
c	0.270	0.354
n	0.092	0.087

Estos resultados se confirman al comprobar que las corrientes obtenidas en la simulación, que están recogidas en la tabla superior, coinciden con las del estudio de potencia realizado previamente.



Nuevamente en las formas de onda de la tensión en los semibuses se aprecia una aparente estabilidad que deberá ser confirmada con ensayos de mayor duración. La última grafica representa la corriente en el punto medio del bus cuyo valor es de aproximadamente unos 0.865Arms.

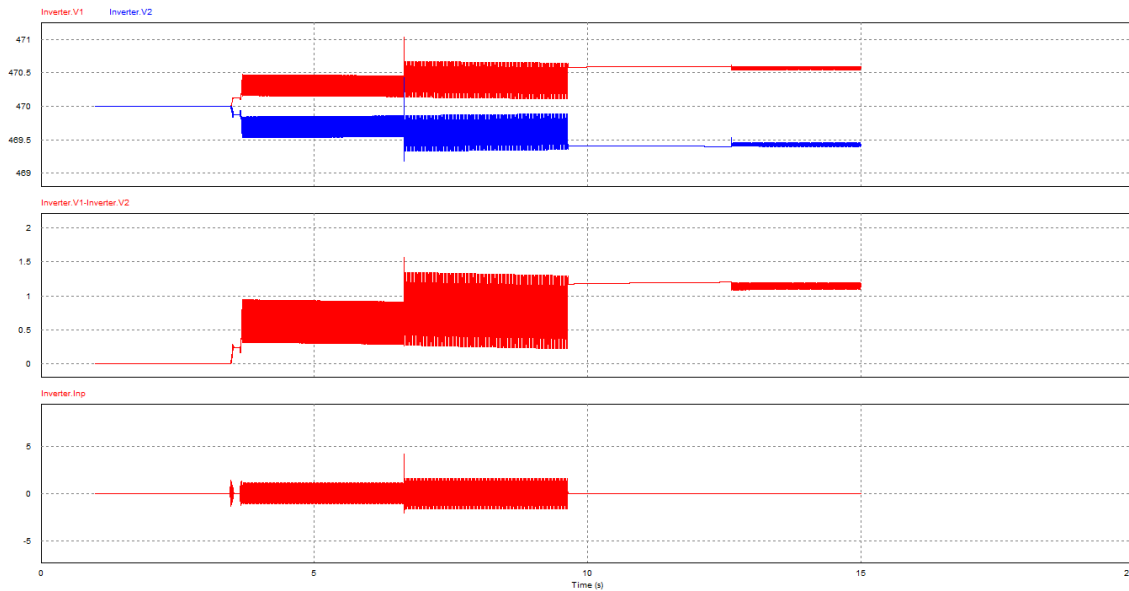


Figura 16: Tensión en los semibuses, diferencia de tensión entre ambos e intensidad en punto medio de bus (PSIM)

#### 6.4.6.- Intercambio de fases

Las diferentes fases, tanto a la salida del módulo inversor como en la carga, presentan cargas no equilibradas. Es por ello que se procedió a simular la conexión de diferentes fases del equipo generador y del equipo a ensayar a fin de conocer el caso de funcionamiento más desfavorable.

Las pruebas resultan en que los valores de tensiones obtenidos se mantienen equilibrados en torno a los 277Vrms. Las corrientes, como en el caso anterior, mantienen valores prácticamente idénticos a los obtenidos en el análisis de potencia necesaria.

#### 6.4.7.- Conclusiones

Con los resultados favorables obtenidos en las simulaciones de esta topología se considera que esta disposición es la adecuada para la generación de tensiones necesarias acorde a los ensayos previamente analizados.

## 6.5.- Validación de las simulaciones

Mediante el empleo de un equipo 3Play controlado vía Freemaster y una etapa de salida adicional como carga se efectuarán los procedimientos simulados en el apartado anterior. El equipo 3Play utilizado corresponde en este caso a un 10 TL, idéntico al anterior en cuanto a configuración pero de potencia inferior. Para alimentar este equipo se ha utilizado una fuente de continua a 650V. Recaltar también que la topología del equipo 3Play usado como fuente ha sido modificada para que la generación del neutro sea la estudiada en el apartado anterior.

En primer lugar se ha efectuado las pruebas en vacío, con periodos de duración de 30, 45 y 60s, y a continuación las pruebas de relés bajo carga también en periodos de 30, 45 y 60s.

Nota: la tensión a la salida generada en el test de relés son 70Vrms y el tiempo máximo posible de prueba configurable son 60s.

### 6.5.1.- Tensiones generadas en vacío

Las medidas de tensión han sido realizadas mediante sondas aisladas en los varistores y corresponden con la tensión diferencial fase-neutro para las medidas en vacío. Para los datos bajo carga se han situado las sondas diferenciales en los varistores de la tarjeta que actúa como carga.

En todas las pruebas, independientemente de su duración, las tensiones obtenidas han demostrado ser totalmente estables en el tiempo con variaciones inferiores al 1%. La desviación respecto al valor de consigna de 70V ha sido de un 1.3% en la fase Vac\_1, un 0.15% en la fase Vac\_2 y un 0.7% en la fase Vac\_3.

### 6.5.2.- Tensiones generadas bajo carga

Se procedió de forma análoga al caso anterior obteniendo en todas las pruebas, independientemente de su duración, tensiones totalmente estables en el tiempo con variaciones inferiores al 1%. La desviación respecto al valor de 70V de consigna en cada una de las fases ha sido de, en la fase Vac\_1 un 1.1%, en la fase Vac\_2 un 0.1% y en la fase Vac\_3 un 0.6%.

A continuación se ha incluido una figura con las formas de onda de la tensión generada y que alimentaba la carga.

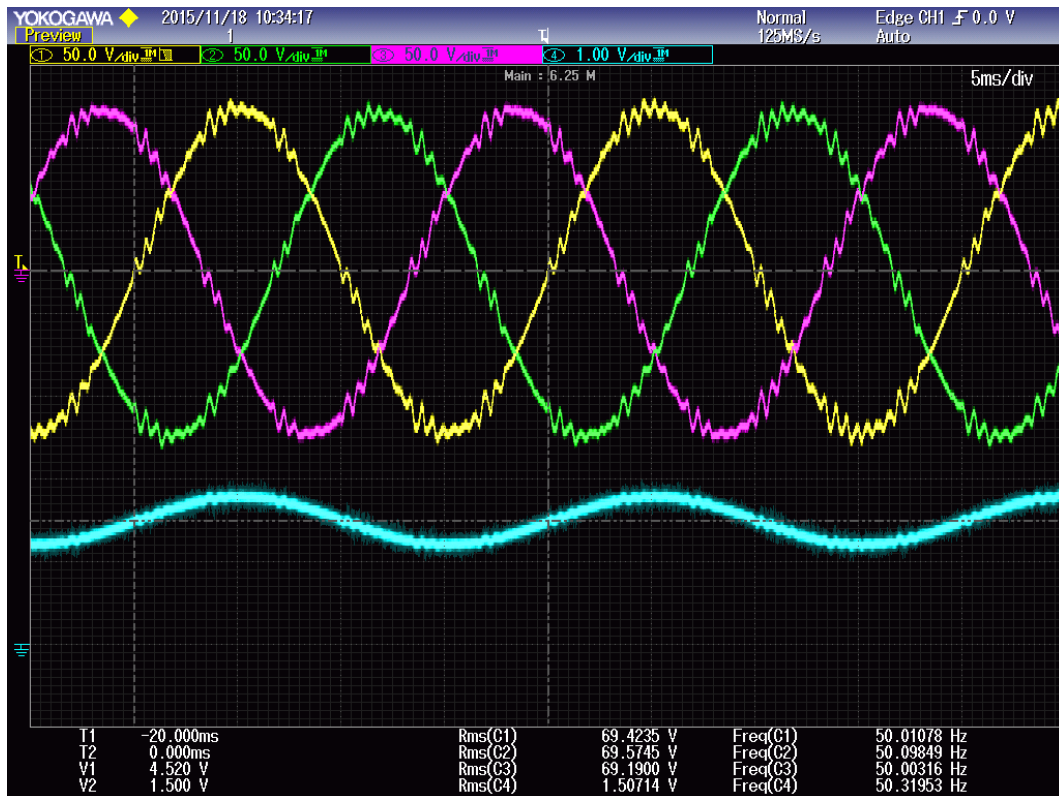


Figura 17: Formas de onda en las fases de la carga Vac\_1, Vac\_2 y Vac\_3 y en la captación de Vac\_1 (Yokogawa)

### 6.5.3.- Otros parámetros

Durante los ensayos también se monitorizaron las tensiones en cada uno de los semibuses a fin de comprobar la estabilidad de los mismos durante una generación prolongada. Los resultados fueron satisfactorios al constatarse que no había cambios significativos en las mismas.

De igual forma se comprobó que las frecuencias a las que se generaba eran iguales al valor de consigna de 50Hz y que el desfase entre fases era de 6.667ms correspondientes a un tercio de ciclo o 120°.

### 6.5.4.- Conclusiones

Tras los resultados favorables obtenidos en los niveles de tensión generada, desequilibrio de bus, frecuencia y desfase entre fases, se considera la plataforma como válida.

## 6.6.- Simulación de rampas con inversor 3Play en PSIM

Una vez comprobado que se dispone de una plataforma adecuada desde la que generar tensión de forma equilibrada, se procede a simular mediante PSIM el comportamiento del 3Play aplicando las rampas y escalones recogidos en la normativa.

Para las simulaciones se emplea una maqueta [12] distinta a la usada anteriormente y que tiene implementada la generación de tensión mediante modulación escalar, similar a la utilizada por el 3Play. El hecho de emplear una maqueta distinta a las anteriores parte nuevamente del interés por comprobar que el inversor permite realizar los ensayos en primer lugar desde el aspecto hardware.

### 6.6.1.- Modelización del equipo

En primer lugar se realiza la modelización del equipo en PSIM. Para ello se parte de un archivo de simulación existente [11] y se completa y adapta para que coincida de la forma más fiel posible al equipo comprobador. El modelo finalmente quedó de la siguiente manera:

- Etapa de entrada: constituida por una fuente DC y el filtro (LC).
- Bus de continua: incluye la generación de punto medio mediante los condensadores y resistencias que lo forman.
- Inversor: formado por el bloque que contiene los IGBT's en disposición NPC de cada una de las tres ramas.
- Etapa de salida: está compuesta por los filtros de armónicos y de modo común. Se implementaron varios modelos con diferentes cargas a fin de comparar resultados. Se incluyen en el sub-circuito de la figura: E\_S\_compl (Etapa de salida completa).
- Carga: al igual que en el elemento anterior también se implementaron varios modelos para poder comprobar el cumplimiento de las especificaciones. De forma análoga se incluyeron todos los sub-circuitos en un único bloque CargaTR (Carga para el Test de Rampas).
- Control: se realiza mediante modulación escalar. Se basa en la comparación entre una señal triangular y una señal sinusoidal que proporcionan las ordenes de encendido y apagado necesarias.

### 6.6.1.1.- Generación de la rampa

Dentro del control descrito se enmarca la generación de la rampa que se ha realizado. Esta señal está compuesta por otras 3 más sencillas y juntas forman la referencia con todos los pasos por tensiones incluidos en la normativa (tensión nominal, base y rampa). Según se ha implementado la referencia en primer lugar, tras un breve periodo de transición, genera la tensión nominal de 277Vrms en la que permanece hasta estabilizarse. Posteriormente sube o baja hasta la tensión base del ensayo, en la que permanece otro breve periodo de tiempo. Finalmente se genera una tensión que aumenta o disminuye de forma constante en el tiempo. El esquema que genera esta referencia puede verse en la siguiente imagen:

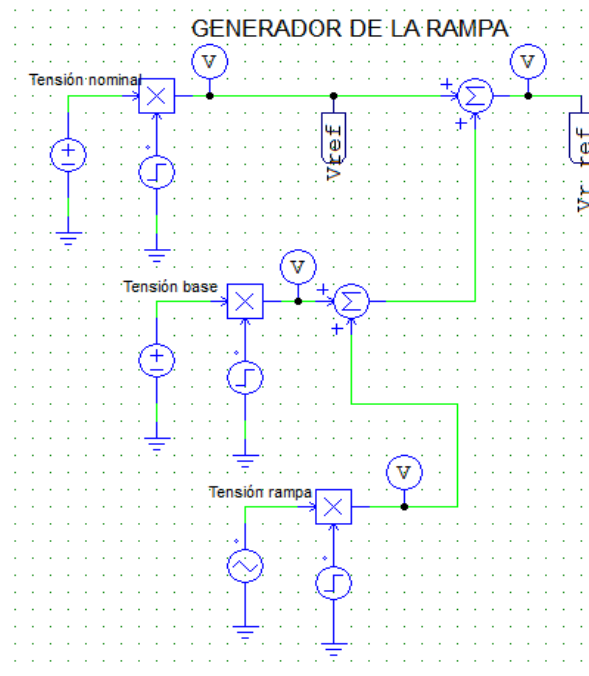


Figura 18: Esquema del generador de rampas (PSIM)

### 6.6.1.2.- Generación de escalón

De forma similar al generador de la rampa se implementa el generador de escalones. En este caso la referencia, tras un breve periodo de transición, se establece en la tensión nominal de 277Vrms. Posteriormente sube o baja hasta la tensión base del ensayo en la que se mantiene durante un breve periodo de tiempo. Finalmente se introduce el escalón hasta la tensión última deseada.

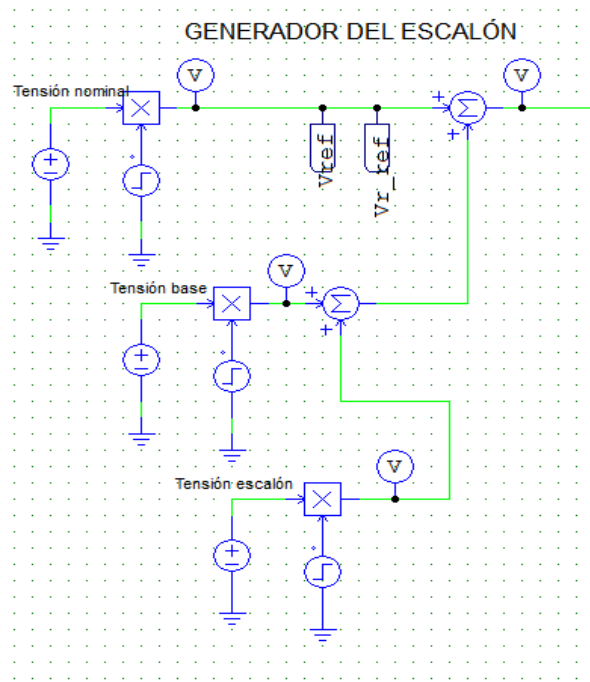


Figura 19: Esquema del generador de escalón (PSIM)

## 6.6.2.- Resultados obtenidos

### 6.6.2.1.- Respuesta rampa

Como puede verse en la figura, el inversor comienza a generar en el instante  $t=0.1s$ . Hay una primera fase de transición hasta alcanzar los 277Vrms que dura otros 0.1s. Posteriormente se mantiene la tensión estable en los 277Vrms hasta que a los 0.3s comienza una nueva etapa de transición. Se alcanza a los 0.4s la tensión base de 286.7Vrms y finalmente a los 0.5s comienza la rampa, puede verse como la tensión crece de forma uniforme hasta los 319Vrms en  $t=8s$ .

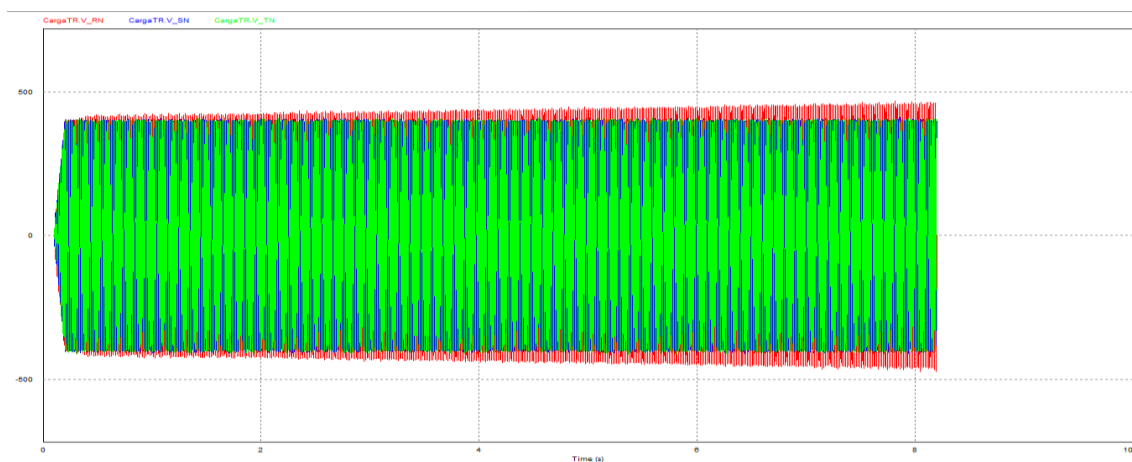


Figura 20: Test Rampa en fase R

### 6.6.2.2.- Respuesta escalón

Como puede observarse en la figura el inversor comienza a generar en el instante  $t=0.1s$ . Hay una primera fase de transición hasta alcanzar los 277Vrms que dura otros 0.1s. Posteriormente se mantiene la tensión estable en los 277Vrms hasta que a los 0.3s comienza una nueva etapa de transición. Se alcanza a los 0.4s la tensión base de 298Vrms y finalmente a los 0.6s se introduce el escalón, se comprueba como la tensión varía hasta superar los 360Vrms.

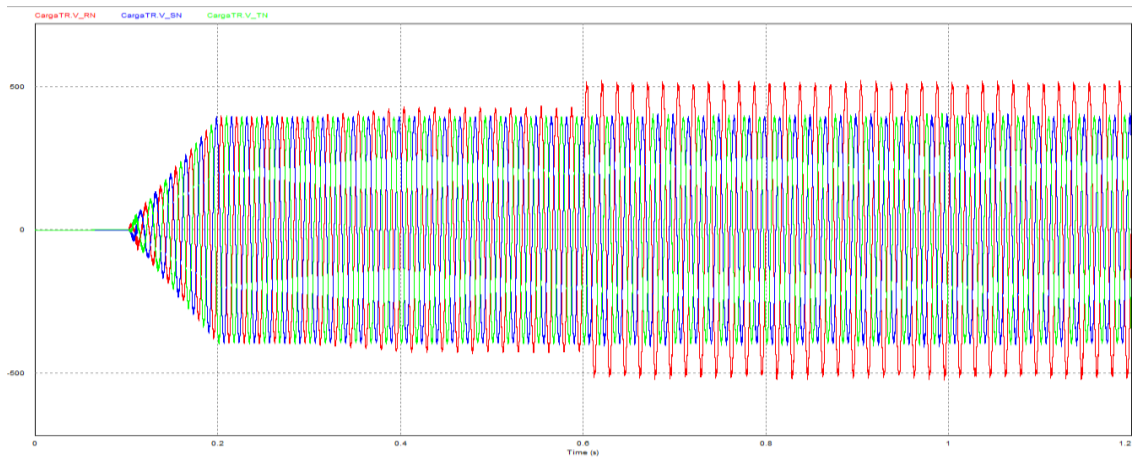


Figura 21: Test escalón en la fase R (PSIM)

### 6.6.3.- Tensión del punto medio del bus

Uno de los parámetros más importantes y que podría desencadenar efectos negativos es el desequilibrio del bus. En la siguiente imagen se ha incluido su evolución a lo largo del ensayo en rampa.

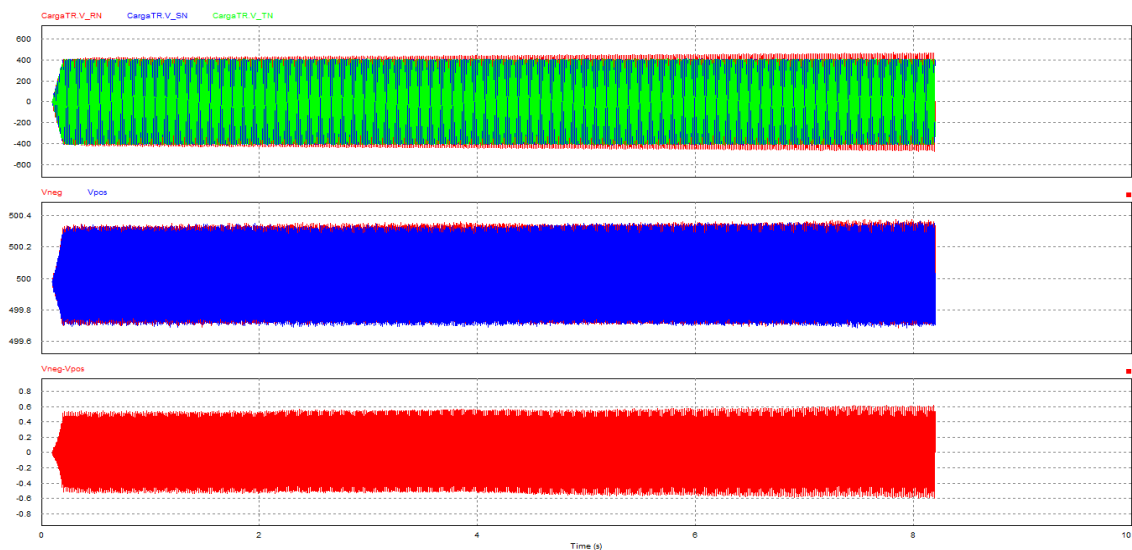


Figura 22: Simulación rampa en fase R con tensión de punto medio de bus (PSIM)

Para el caso del ensayo en escalón obtendríamos:

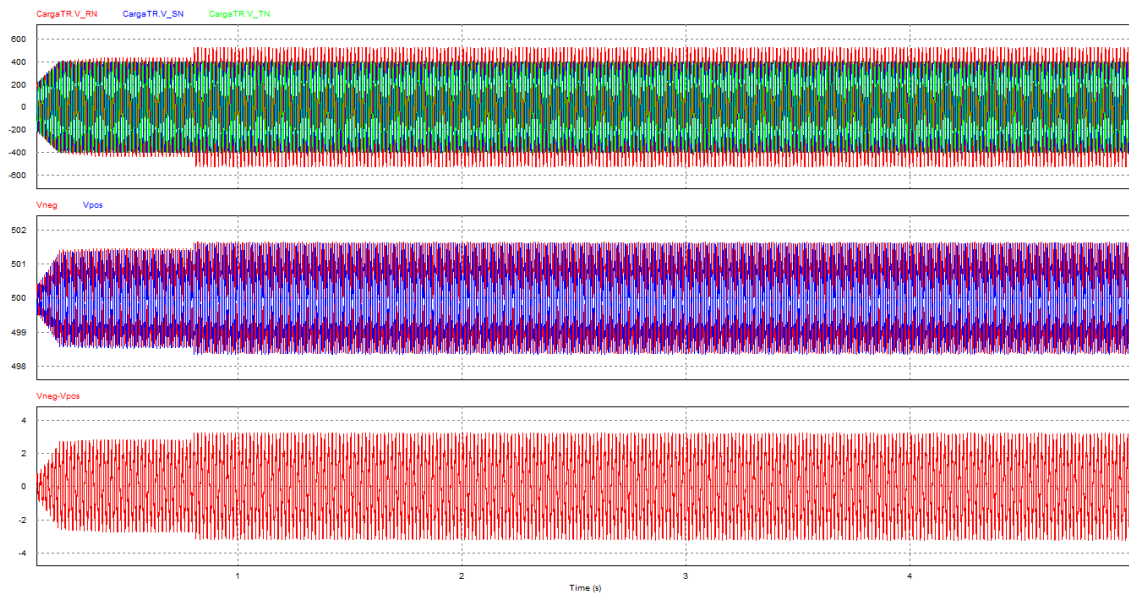


Figura 23: Simulación escalón en fase R con tensión de punto medio de bus (PSIM)

Los resultados obtenidos en simulación, recogidos en las imágenes anteriores, indican que existe un pequeño rizado en la tensión de bus, inferior a 1V en el caso del ensayo rampa y a los 3V en el escalón. Se considera que este valor está dentro de los límites aceptables de operación del equipo.

También se comprueba, mediante las gráficas que comparan los semibuses positivo y negativo, que no existe deriva de la tensión de bus.

Tras comprobar que en ambos efectos el resultado de las pruebas realizadas se ha resuelto satisfactoriamente se considera la simulación como favorable.



## 7.- Implementación del equipo comprobador

Una vez establecida una plataforma hardware válida para el desarrollo del equipo es necesario conocer el software encargado de la gestión de la misma.

Los inversores 3Play presentan un firmware basado en un sistema operativo (S.O.) [13] que es el responsable de gestionar todas las funciones según un sistema de prioridades establecidas en el propio S.O. De esta forma son gestionadas diferentes interrupciones o llamadas a funciones, algunas de las cuales pueden ser interrumpidas por otras de mayor prioridad. La consecución de distintas funciones por parte del sistema a lo largo de los ciclos de ejecución, con las respectivas llamadas a procesos y la atención de las mismas, crea los denominados hilos de ejecución.

Existen interrupciones hardware, software y otras definidas en funciones. Las prioridades de las interrupciones siguen este mismo orden de mayor a menor.

Tras el arranque e inicialización de variables y módulos se llega a la ejecución de la función principal, el S.O. procede entonces a atender los hilos de ejecución que van siendo creados. Estos hilos se ejecutan desplazándose entre capas cuya disposición se asemejaría a una estructura piramidal.

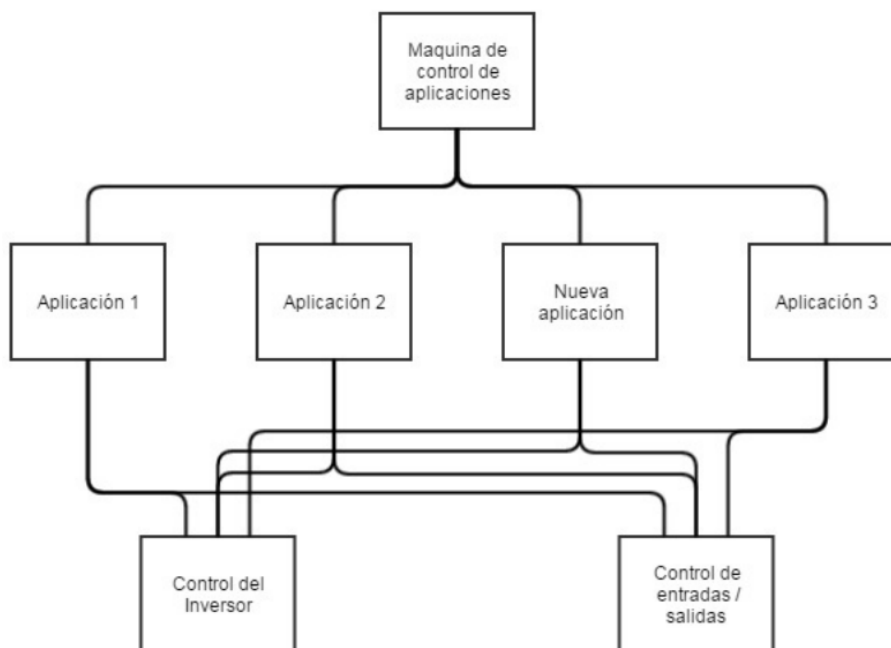


Figura 24: Jerarquía firmware

Como se ilustra en la imagen previa, el sistema operativo a lo largo de su ejecución detecta la necesidad de desarrollar alguna aplicación y, a través de la máquina de control, ejecuta una de las aplicaciones definidas. Estas aplicaciones una vez activas se encargan de, a través de cambios en los parámetros de control del equipo y de las entradas y salidas físicas del mismo, desarrollar las respuestas necesarias para satisfacer las funciones de dicha aplicación.

Para que la modificación para ejecutar los ensayos sea lo menos invasiva posible, se opta por incluir en la capa de aplicaciones una nueva a modo de las ya existentes. Incluirá como estas una máquina de estados propia para su desarrollo. También será necesaria la creación de un nuevo modo de funcionamiento y un estado para que, cuando sean señalizados como activos, el flujo de programa lleve hasta la aplicación del generador de rampas.

De forma preliminar, la aplicación deberá incluir:

- Creación de la correspondiente máquina de estados, denominada como FSM\_RampGen. Será la encargada de gestionar el desarrollo de los ensayos de rampa y escalón. Previsiblemente incluirá:
  - Rutina de inicialización para cargar la configuración.
  - Etapa inicial para detección de funcionamiento de relés, generación de tensión y detección de carga.
  - Etapa inicial para carga de capacidades a fin de no tener sobrecorrientes en los arranques.
  - Generación y gestión de alarmas en cada uno de los estados y sus transiciones
  - Sistema de seguimiento de la referencia de tensión activo que pueda generar alarmas.
- Creación de librería con los datos para la configuración inicial del modo y las funciones auxiliares que utilizará la máquina de estados.

## 7.1.- Desarrollo de la aplicación para generar los ensayos

Se incluye en este apartado un análisis más detallado de las modificaciones realizadas sobre el firmware existente. Se ha realizado acorde al estilo empleado y siguiendo los manuales internos [11] [14] [15].

### 7.1.1.- Capa de aplicaciones

Dentro de la gestión ya existente de la máquina de aplicaciones se han añadido los siguientes elementos:

- Se incluye un nuevo modo de trabajo *FSMAPP\_WM\_RAMPGEN* a fin de separar la generación de los ensayos del resto del FW del equipo, además de su estado correspondiente *FSMAPP\_STE\_RAMPGEN* para la máquina de estados de aplicaciones. También se declara un nuevo estado *GENERAL\_STE\_RAMPGEN* con las correspondientes máscaras de eventos y alarmas necesarias.
- La función *checkRampGenState()* gestionará el comienzo, fin y las alarmas e incidencias que pudieran darse durante el funcionamiento del nuevo modo.

Destacar que tanto el arranque como parada de la máquina de estados atienden al paro manual por motivos de seguridad. De esta forma para iniciar el equipo basta con retirar el paro y se inicia así automáticamente la aplicación hasta llegar a un estado de generación nominal. El apagado de la máquina de forma suave está implementado también desde este estado de generación nominal pero en cualquier punto puede interrumpirse volviendo a establecer el paro manual.

### 7.1.2.- Capa de control

Incluye los elementos para el control de la generación de tensión alterna.

- Creación de un nuevo estado *CTRFSM\_STE\_RAMPGEN* con permisos habilitados para la carga de bootstrap, la generación de tensión alterna, el control de la tensión de bus mediante los elevadores y el control de corriente de los mismos.
- Definición de la función *CtrFsm\_RampGenGenerating()* que genera las consignas de tensión alterna y de tensión de bus mínima necesaria.

- Definición de la función *CtrFsm\_IsRampGenState()* de la que se obtiene la confirmación de que se ha llegado al estado de generación de rampas RAMPGEN en la máquina de control.

En cuanto a la referencia a seguir por el control de la tensión de bus:

- Puesto que se va a necesitar llevar el bus a valores determinados para la correcta generación de la tensión alterna, se incluye una referencia para la tensión de bus en la función *H\_INLINE void busRefsSelectorINL(void)*, dicha consigna puede ser proporcionada por la máquina de estados del generador de rampas o manualmente asignando el valor deseado.

Para la modulación de la generación de tensión alterna:

- Uso de la función *CtrlInv\_ScalarModulationINL()* encargada de generar los ciclos de trabajo necesarios para la modulación. Esta función lee las consignas de frecuencia y tensión RMS de la máquina de estados del generador de rampas y las procesa de la siguiente forma:
  - Calcula, a partir del valor de frecuencia, el paso de la función seno para una frecuencia de refresco de 1 ms.
  - Uso de *Control\_IndexValueCheckINL()* y adición de un nuevo paso, se consigue así generar una rampa que va de 0 a 1. Además al introducir un desfase de 1/3 se genera una referencia para cada una de las fases con la que entrar a la tabla de seno correspondiente.
  - Se genera una referencia pico para cada una de las fases a partir de la consigna de tensión. El valor pico es calculada de la siguiente forma:

$$\text{Referencia } (0 - 1) = \frac{\text{Consigna Tensión (RMS)} * \sqrt{2} * 2}{\text{Tensión de bus}}$$

- Multiplicando la consigna de tensión  $A_c$  por  $\sqrt{2}$  se consigue hallar el valor pico de la misma.
- Al hallar el doble de ese valor, estamos consiguiendo la referencia pico-pico de la tensión, que sin tener en cuenta pérdidas, coincide con la mínima tensión de bus necesaria para su generación.

- Al dividir por la tensión de bus se consigue escalar, dentro de un valor de 0 y 1 la referencia, y poder llevarla a la función que recorre el seno.
- Con la función Control\_SineGeneration() e introduciendo en ella los valores previamente calculados se consiguen finalmente las cifras para la modulación de cada una de las ramas del inversor.

Se ha implementado la generación en rampa descendente y posteriormente sólo en -Vbus como arranque del equipo para la carga de bootstrap, esto se realiza mientras el tiempo en que la detección del estado de carga de bootstrap está activa.

Así mismo existe también una rutina para que la primera generación de tensión proporcione unos "duties" en rampa a fin de que no se produzcan variaciones bruscas de tensión que conlleven picos de corriente.

### 7.1.3.- Capa de máquinas de estados

Control y gestión de los tests de rampa y escalón:

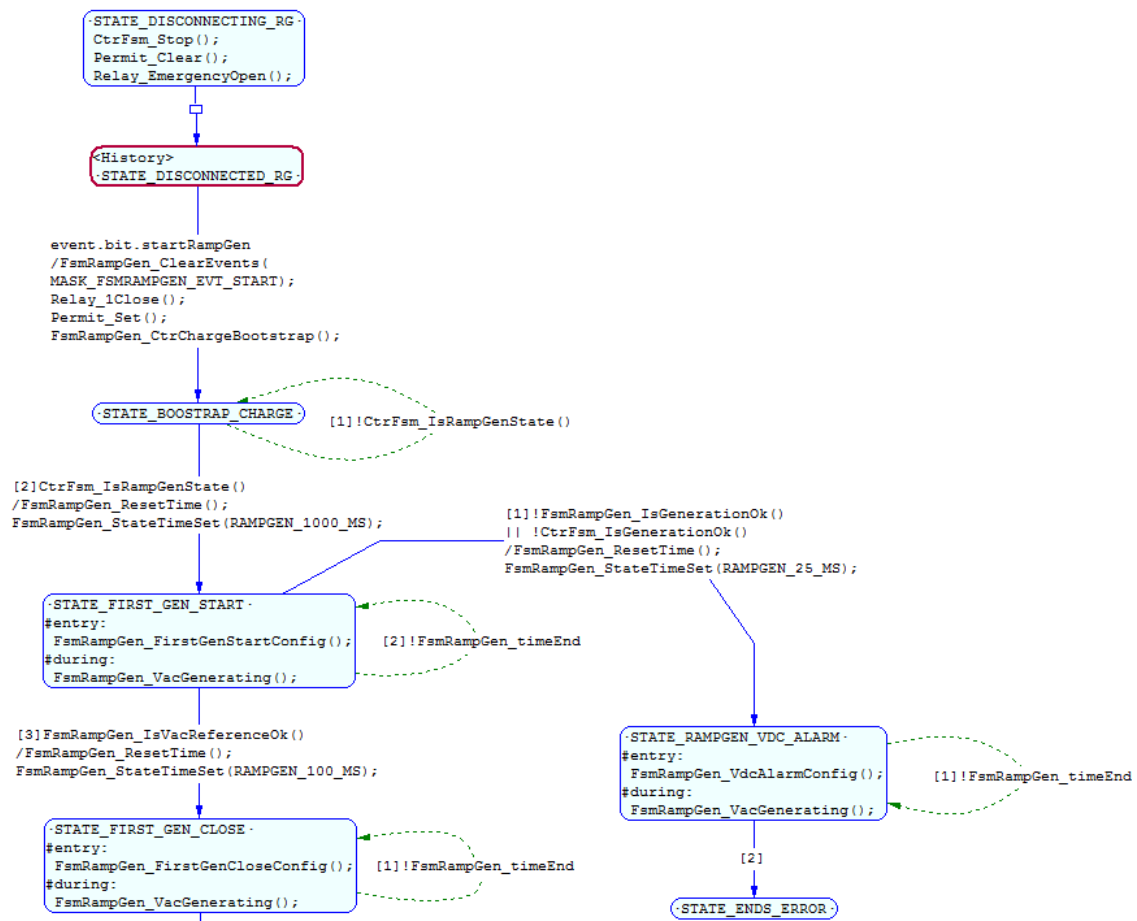


Figura 25: Máquina de estados I (HFSM Editor)

La máquina de estados que controla la aplicación parte desde el estado de desconexión STATE\_DISCONNECTED\_RG, cuando se detecta que hay orden de inicio se produce el cierre del relé interno y se habilitan los permisos de conmutación. También se ejecuta la función que habilita el paso al estado de carga de bootstrap en la máquina de control.

Durante el siguiente estado STATE\_BOOTSTRAP\_CHARGE, que corresponde a la espera de la carga de bootstrap y dura el periodo establecido en la máquina de control, se mantiene la orden de generación activa que permite lanzar la carga del bootstrap proporcionando - Vbus como se ha visto en la función de modulación ScalarModulationINL().

Tras realizar la carga y confirmar que se ha llegado en la máquina de control al estado de generación para esta aplicación, se alcanza el estado STATE\_FIRST\_GEN\_START. Al entrar en este, se configuran las tensiones tanto alterna como de bus a generar y las pendientes para llegar a dichos valores. Posteriormente comienza a generar en rampa hasta los valores de consigna. Una vez transcurrido un tiempo fijado para esta primera generación y tras confirmar que se han llegado a los niveles de consigna, se pasa al siguiente estado.

El estado STATE\_FIRST\_GEN\_CLOSE, al igual que el anterior, recibe al comienzo del mismo una configuración para la generación de tensión de alterna que parte del valor anterior y lo llevará a generar en rampa descendente hasta los 0V.

Tras comprobar nuevamente que el valor de generación ha llegado a la referencia, se configura el tiempo para el siguiente estado. En éste, STATE\_WAITING\_GEN se mantiene la generación a 0V para que el cierre de los relés externos pueda producirse sin provocar fluctuaciones en tensión o variaciones bruscas de corriente.

Tras el cierre de relés se establece la temporización del siguiente estado STATE\_START\_RAMP. En la configuración, al comienzo del mismo, se fijan los valores de tensión alterna a la que debe llegar así como la tensión de bus necesaria. Genera entonces una rampa ascendente hasta el valor asignado, que en este caso será el del estado de generación nominal.

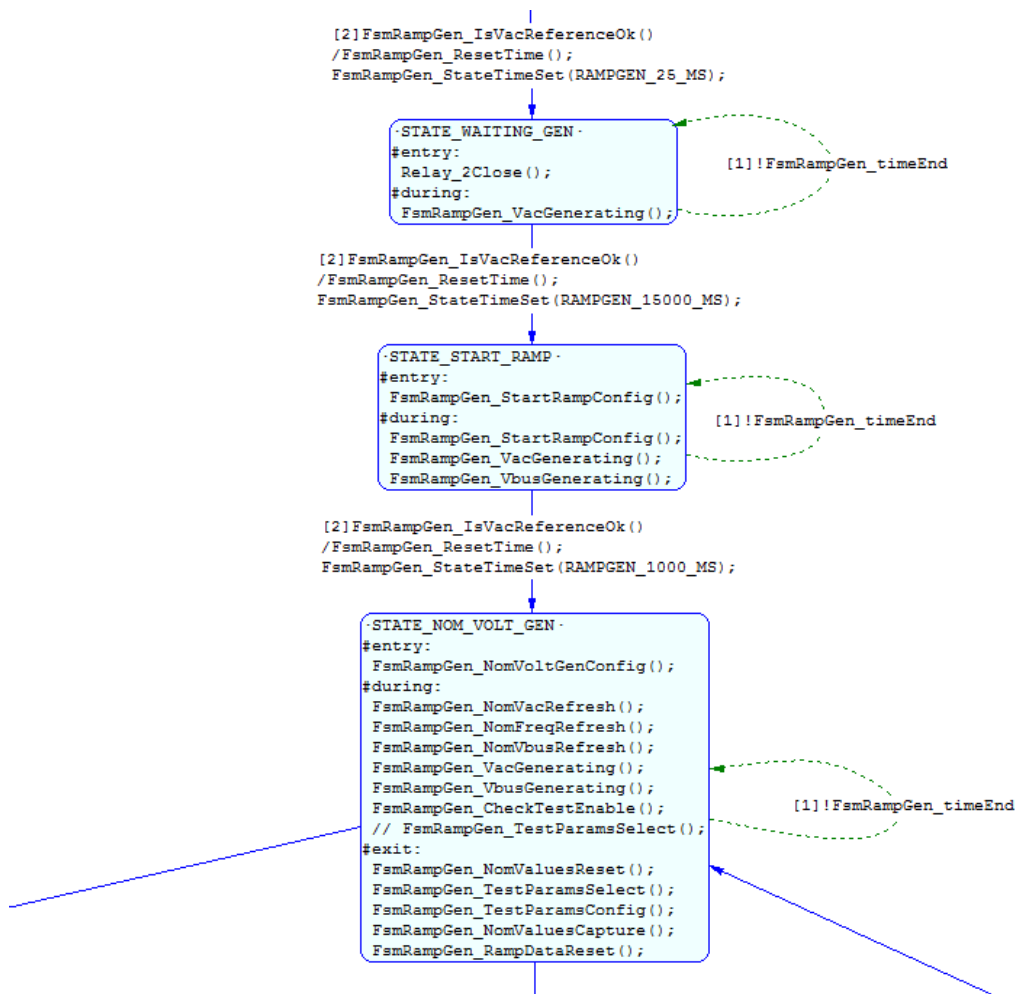


Figura 26: Máquina de estados II (HFSM Editor)

Tras comprobar nuevamente que se ha alcanzado la referencia se logra el estado de generación nominal o STATE\_NOM\_VOLT\_GEN. Este es un estado de espera en el que se mantiene el equipo generando a tensión nominal. Puede, mediante las variables de consigna manuales de tensión alterna, frecuencia o tensión de bus, modificar estos parámetros a fin de realizar los tests con dichos valores. También se ejecutan durante este estado funciones de revisión de dichos valores para mantener las consignas actualizadas. De este estado de espera puede, tras finalizar una temporización preliminar de 1 segundo, salirse mediante dos formas:

- Realización del ensayo configurado
- Finalización de la aplicación

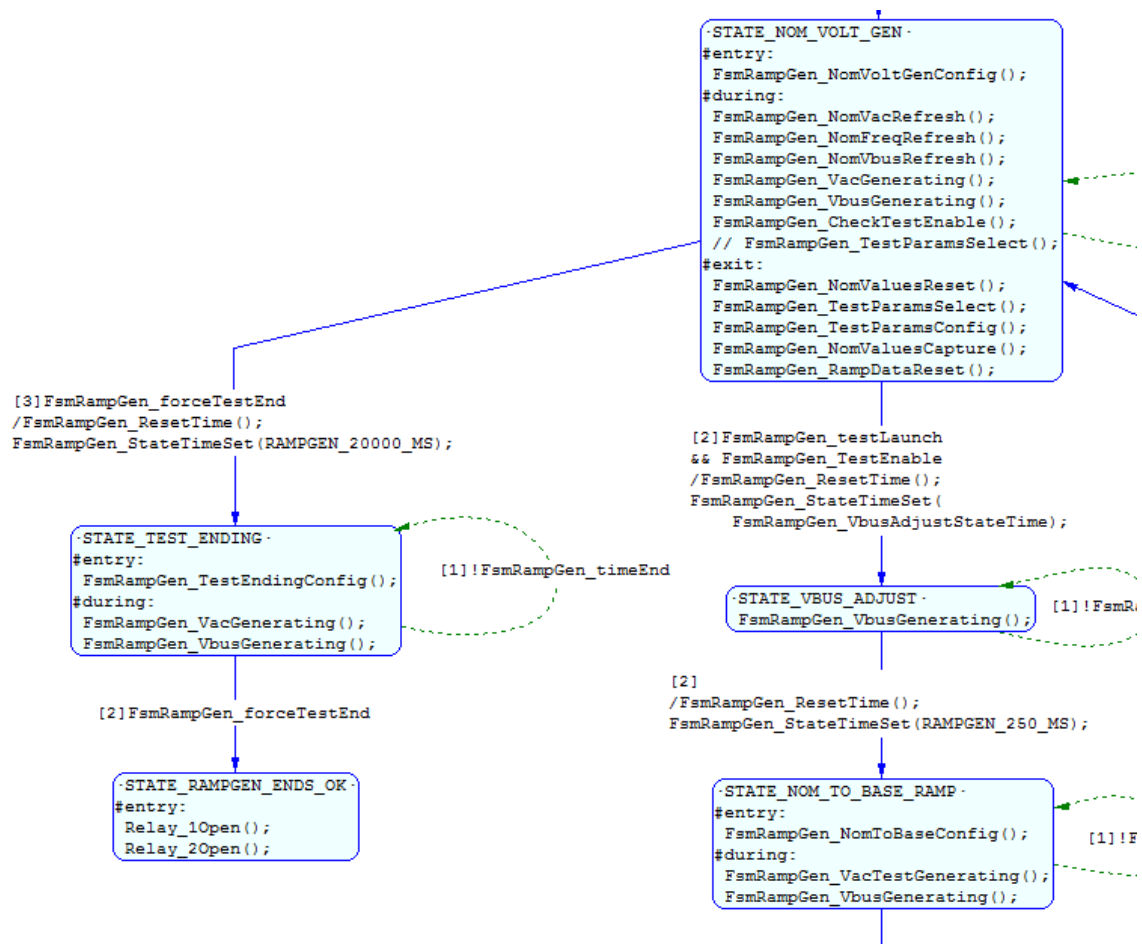


Figura 27: Máquina de estados III (HFSM Editor)

Si se opta por habilitar la variable encargada de finalizar la máquina de estados FsmRampGen\_forceTestEnd, se llega al estado STATE\_TEST\_ENDING. En este estado se carga una configuración para que tanto la tensión alterna como la de bus descendan de forma suave hasta un valor de 0Vrms y tensión de fuente respectivamente.

Tras terminar este estado se llegará al de finalización o STATE\_RAMPGEN\_ENDS\_OK en el que se producirá la apertura de ambos relés dando por finalizada la aplicación.

Para la realización de los ensayos en cambio, debe seleccionarse una configuración de test válida que incluya tanto el tipo de test, como los límites del mismo y la fase o fases de destino. Una vez con esta configuración permitida deberá habilitarse el lanzamiento del ensayo mediante la variable FsmRampGen\_testLaunch.



Previo a la salida del estado de generación nominal se procede al cálculo de los parámetros clave para la realización del ensayo. Se realiza además una captura de los valores de tensión y frecuencia a fin de incluirlos posteriormente en el informe de la prueba según lo especificado por la norma.

El primer paso para la realización de los ensayos es ajustar el nivel de tensión del bus, esto sucede en el estado STATE\_VBUS\_ADJUST. Señalar que solo los tests de sobretensión provocan un cambio en la consigna.

Tras quedar el bus configurado se procede con el siguiente estado, STATE\_NOM\_TO\_BASE\_RAMP, que llevará la tensión o frecuencia nominal al valor base según los parámetros para el tipo de test configurado.

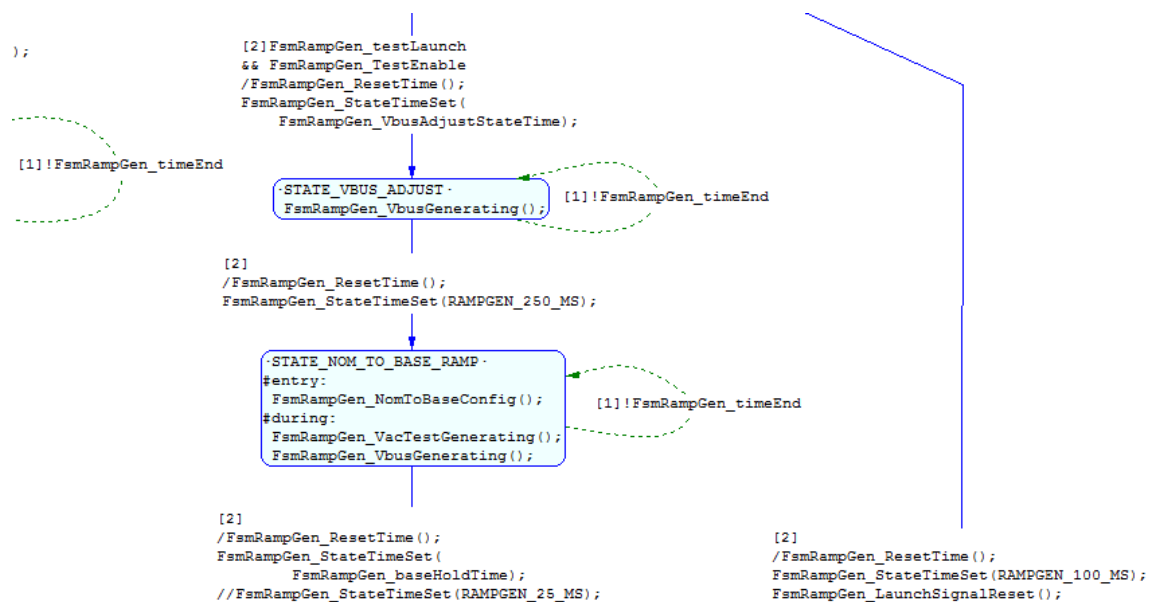


Figura 28 Máquina de estados IV (HFSM Editor)

Al finalizar la temporización se alcanza el estado de generación base en el que permanecerá el periodo especificado por la norma. En la salida de este estado STATE\_BASE\_VOLT\_GEN se procederá también a la captura de valores que permitirá más tarde procesar los resultados de la prueba.

Aunque la duración del estado previo está temporizada, para continuar hasta el siguiente será necesario además detectar mediante la correspondiente función, que en la fase o fases objetos de la prueba se ha producido el paso por cero ascendente de la tensión. Dicha condición está fijada por la norma, que establece este punto como el de comienzo además de la temporización de la prueba.

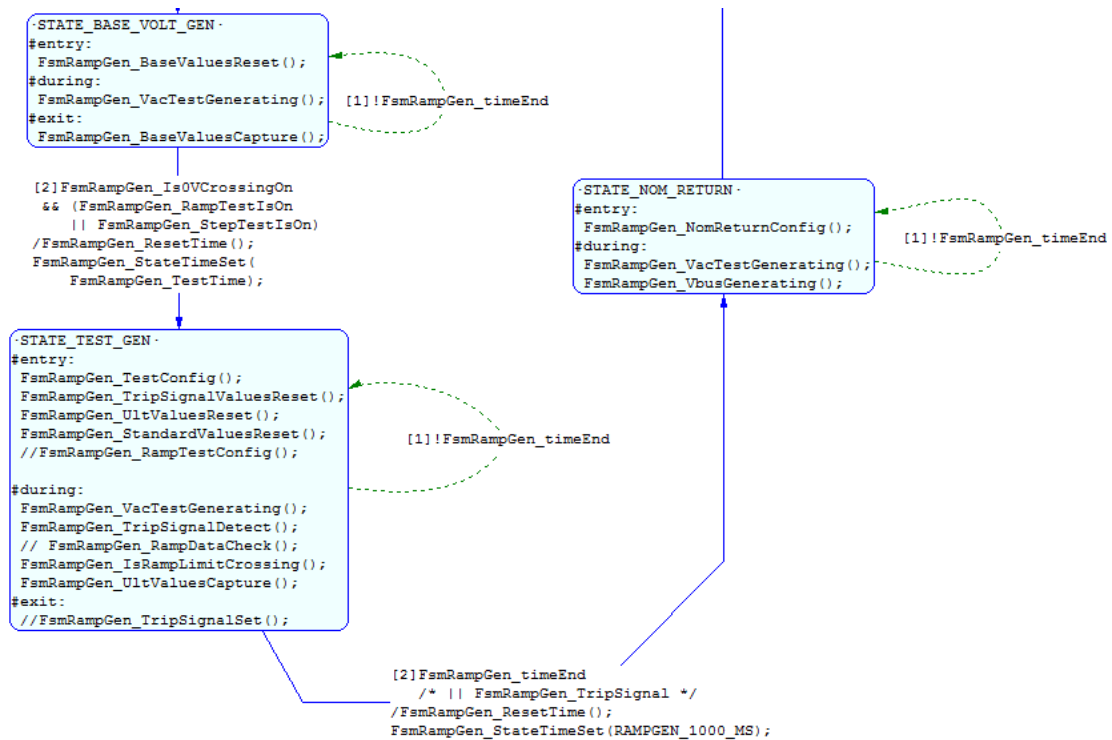


Figura 29: Máquina de estados V (HFSM Editor)

Una vez se alcanza el estado de la correspondiente prueba de rampa o escalón STATE\_TEST\_GEN, se procede a cargar todos los parámetros previamente calculados para que se realice de forma adecuada el ensayo. Además se reinician las variables encargadas de almacenar los datos del momento del disparo, finalización del ensayo y los valores calculados según el estándar. Durante el estado se generan las consignas de tensión alterna y de frecuencias y se comprueba también si se produce la señal de disparo. Cuando se detecta esta señal se procede a la toma de valores que servirán para compararlos con los obtenidos según el procedimiento especificado en el test. Cuando se llega al estado de tensión o frecuencia ultima que marca la finalización de la rampa o escalón para la toma de los correspondientes datos. Con los estos obtenidos de la generación última del ensayo más los obtenidos previamente en la salida del estado base, que marcan el final y el comienzo de la prueba respectivamente se procede al cálculo de los valores del ensayo según lo especificado por la normativa.

Tras salir del estado de test se pasa a un estado STATE\_NOM\_RETURN que devuelve los parámetros modificados durante el test a parámetros de operación nominales a fin de que otra prueba pueda ser lanzada de la forma más rápida posible. Quedaría de esta forma cerrado un ciclo de generación para uno de los ensayos.

Se incluye a continuación una imagen con el ciclo completo de generación desde el estado de espera, que puede verse a la derecha, además del procedimiento de finalización de la aplicación que se encuentra a la izquierda.

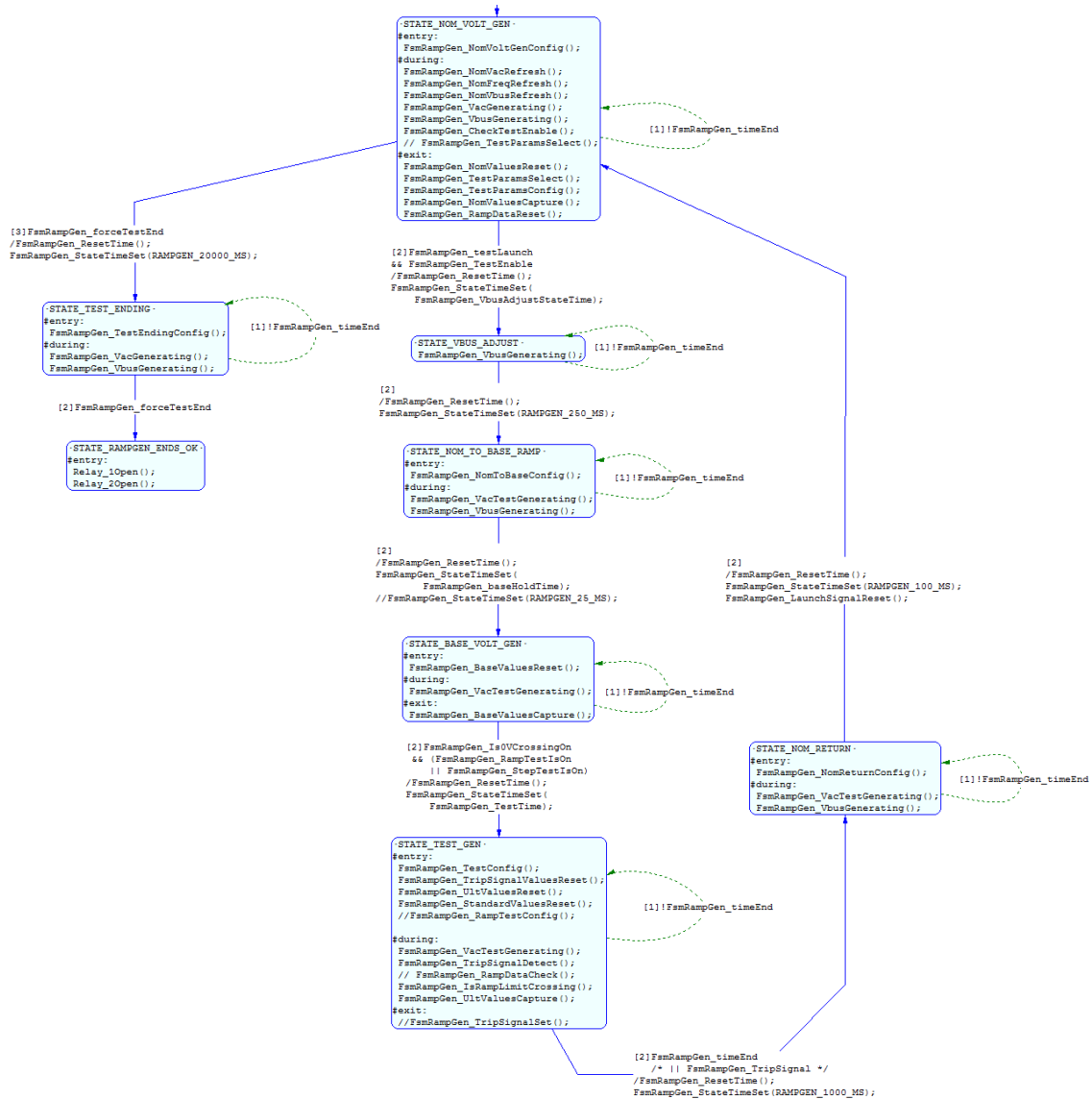


Figura 30: Máquina de estados VI (HFSM Editor)

La máquina de estados contiene además los siguientes apartados:

- Inicialización: contiene las librerías con funciones necesarias para el funcionamiento de la aplicación. Presenta también la definición de las constantes para la temporización de los diferentes estados.

```

01 #include "appDefs.h"
02 #include "typeDefs.h"
03 #include "fsmRampGen.h"
04 #include "permit.h"
05 #include "relay.h"
06 #include "ctrFsm.h"
07
08 #define RAMPGEN_5_MS (Uint16)5
09 #define RAMPGEN_25_MS (Uint16)25
10 #define RAMPGEN_100_MS (Uint16)100
11 #define RAMPGEN_250_MS (Uint16)250
12 #define RAMPGEN_500_MS (Uint16)500
13 #define RAMPGEN_1000_MS (Uint16)1000
14 #define RAMPGEN_2000_MS (Uint16)2000
15 #define RAMPGEN_5000_MS (Uint16)5000
16 #define RAMPGEN_10000_MS (Uint16)10000
17 #define RAMPGEN_15000_MS (Uint16)15000
18 #define RAMPGEN_20000_MS (Uint16)20000
    
```

Figura 31: Inicialización (HFSM Editor)

- Preproceso: Contiene las funciones a ejecutarse al comienzo de cada uno de los ciclos de la máquina de estados. Incluye el refresco de los eventos como alarmas o paros y el control de la temporización de los estados. También recoge las funciones encargadas de controlar de forma constante que la tensión de bus necesaria para la generación es la adecuada mediante el seguimiento de la referencia y de las captaciones. Por último ejecuta la función que detecta el paso por cero de las distintas tensiones y vuelca en una variable el valor del índice de la máquina de estados para posibilitar así su seguimiento.

```

01 // Event variable definition
02 FsmRampGenExternEvents event;
03 // Timing function executed
04 FsmRampGen_Timing();
05 // Event variable refresh
06 event.all = FsmRampGen_externEvent.all | FsmRampGen_externEventPrev.all;
07 // Stop event is checked in all the states
08 if(event.bit.stopRampGen)
09 {
10     FSM_RampGen__Goto_STATE_DISCONNECTING_RG();
11     FsmRampGen_ClearEvents(MASK_FSMRAMPGEN_EVT_ALL);
12     event.all = MASK_FSMRAMPGEN_EVT_NONE;
13 }
14 // FSM is stopped if a malfunction is detected
15 // during voltage generation
16 if(!FsmRampGen_IsGenerationOk())
17     || !CtrFsm_IsGenerationOk()
18 {
19     FsmRampGen_ResetTime();
20     FsmRampGen_StateTimeSet(RAMPGEN_25_MS);
21     FSM_RampGen__Goto_STATE_RAMPGEN_VDC_ALARM();
22 }
23 // OV crossing detection function is executed
24 FsmRampGen_IsOVCrossing();
25 FsmRampGen_FsmStateValue = ind_FSM_RampGen;
    
```

Figura 32: Preproceso (HFSM Editor)

```
// IEC61851-1 Test parameters table
FsmRampGenTestParams m_fsmRampGenTestParams[FSMRAMPGEN_TESTS_SIZE]=
{
  // test // factor // factor // factor
  // Base // Trip // TripTime
  // time (ms)
  FSMRAMPGEN_TEST_NONE, 0.0, 1.0, 1,
  // Vac
  FSMRAMPGEN_LOW_LOW_LOW, 0.05, 0.45, 160,
  FSMRAMPGEN_LOW_LOW, 0.05, 0.60, 1000,
  FSMRAMPGEN_LOW, 0.05, 0.88, 2000,
  FSMRAMPGEN_HIGH, 0.05, 1.10, 1000,
  FSMRAMPGEN_HIGH_HIGH, 0.05, 1.20, 160,
  // Freq
  FSMRAMPGEN_UF1, 0.008, 57.0, 160,
  FSMRAMPGEN_UF2, 0.008, 59.5, 2000,
  FSMRAMPGEN_OF1, 0.008, 60.5, 2000,
  FSMRAMPGEN_OF2, 0.008, 62.0, 160,
};
```

Figura 33: Implementación de los límites (Code Composer Studio y [2])

En la imagen superior se encuentra la tabla con los parámetros definidos por la normativa y de la que hace uso la aplicación para el cálculo de los parámetros requeridos en los ensayos. Las pruebas siguen el orden de baja tensión, alta tensión, baja frecuencia y alta frecuencia. También se han incluido los respectivos límites y coeficientes para el valor base del parámetro además de los tiempos de disparo.

Destacar que esta es la configuración establecida por defecto para los ensayos ya que coincide con los valores límite de la normativa pero pueden ser configurables como se verá más adelante.

**7.1.4.- Notas**

Para las pruebas que se realizarán a tensiones menores de bus, por precaución a la hora de ver si los semibuses permanecen equilibrados, se modifica las tensiones a las que arranca y apaga el equipo de tal forma que pasan de 250 y 200 Vdc a 25 y 20 Vdc respectivamente. De igual forma se cambia la tensión de referencia inicial para el elevador pasándola de 720.0 Vdc 50.0 Vdc, esto es debido a que al arrancar, antes de que entre la referencia generada por la máquina de estados del test de rampas, entra en ejecución el control del elevador con esta referencia inicial.

## 7.2.- Comprobación fw\_abm1010 en simulación PSIM

A fin de evaluar si la programación se ha realizado de forma adecuada, se procede a su simulación mediante PSIM. Para ello se utilizará el mismo método empleado en el capítulo 6.4.-Simulaciones.

### 7.2.1.- Modificaciones en el esquemático

Se ha empleado la misma maqueta que en el citado apartado pero empleando el modelo de inversor que incluye los elevadores y que se encargarán de mantener la tensión de bus en los valores necesarios para la generación. El resto de elementos como la fuente o la conexión del neutro generado al punto medio se han mantenido.

### 7.2.2.- Resultados obtenidos

#### 7.2.2.1.- Comprobación de arranque

En primer lugar se comprobará la generación desde el arranque, con carga de bootstrap incluida, hasta llegar al estado de generación nominal, que será el estado de espera antes de lanzar los tests. Las imágenes incluidas a continuación forman todas ellas parte de la misma simulación aunque para mayor detalle se presentan separadas.

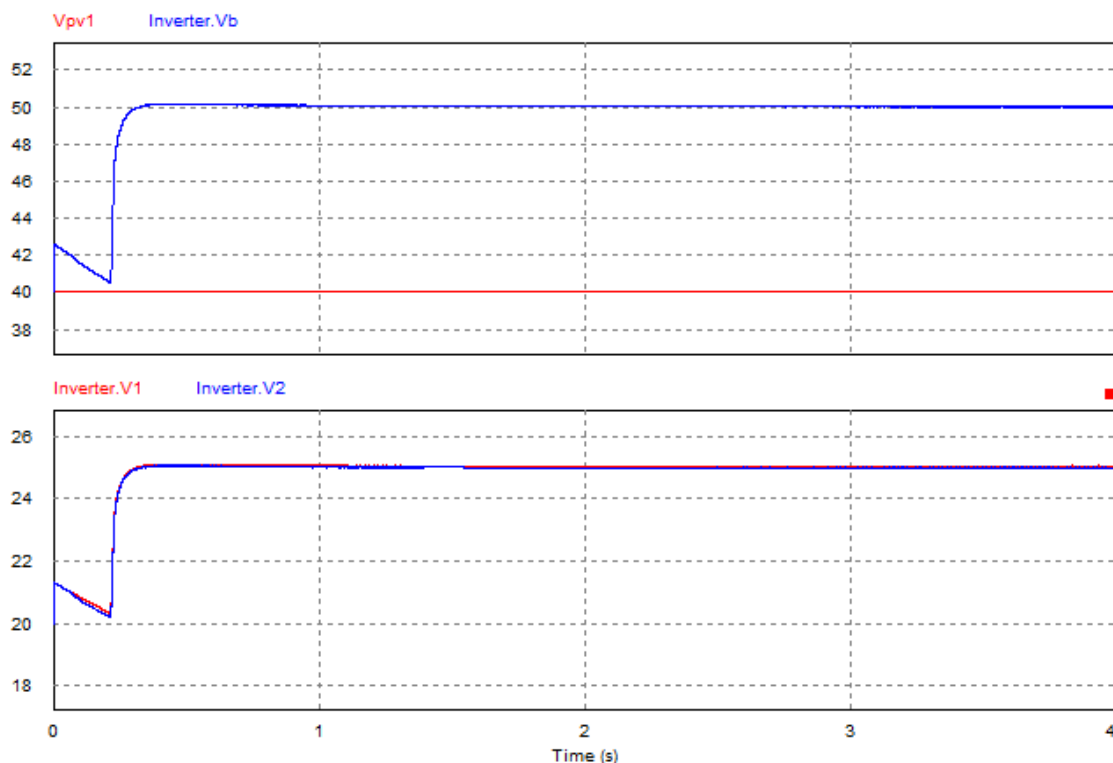


Figura 34: Tensión de fuente (Vpv1), bus (Inverter.Vb) y semibuses (Inverter.V1 e Inverter.V2) (Arranque) (PSIM)

Como puede verse en la anterior imagen el resultado es satisfactorio, el elevador parte de la tensión entregada por la fuente ( $V_{pv1}$ ) y lleva al bus (Inverter.Vb) hasta el valor de consigna (50V). Se observa además en la segunda gráfica como los semibuses, tanto positivo (Inverter.V1) como negativo (Inverter.V2) permanecen equilibrados.

A continuación se presenta la evolución seguida en la generación. Parte de una tensión inicial de 0V y desciende hasta  $-V_{bus}$  para realizar la carga de bootstrap durante el periodo establecido. Tras finalizar la carga comienza a generar en rampa ascendente y, ya en alterna, alcanza la consigna de tensión. Tras un breve periodo de generación, termina en rampa para que la conexión del relé externo no produzca interferencias. Finalmente comienza la generación en rampa hasta el valor de generación nominal. En la segunda gráfica pueden verse los momentos en los que se conectan el relé interno (Inverter.CTR.Rele1), al comienzo de la generación, y el relé externo (Inverter.CTR.Rele2), en el momento en que la tensión generada es 0.

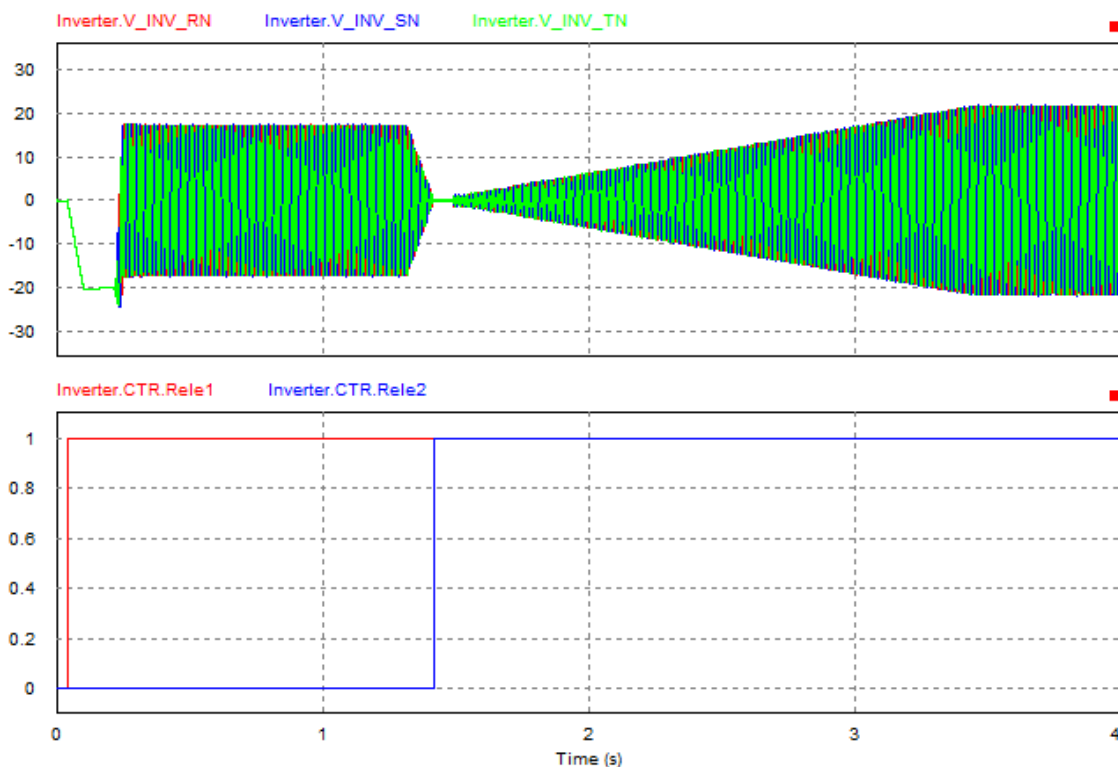


Figura 35: Tensión AC en cada una de las fases y proceso de cierre de relés (PSIM)

Las siguientes gráficas presentan las formas de onda de corrientes tanto en el punto medio de bus como en las bobinas del filtro de salida. Como puede apreciarse no se producen variaciones bruscas de valores significativos.

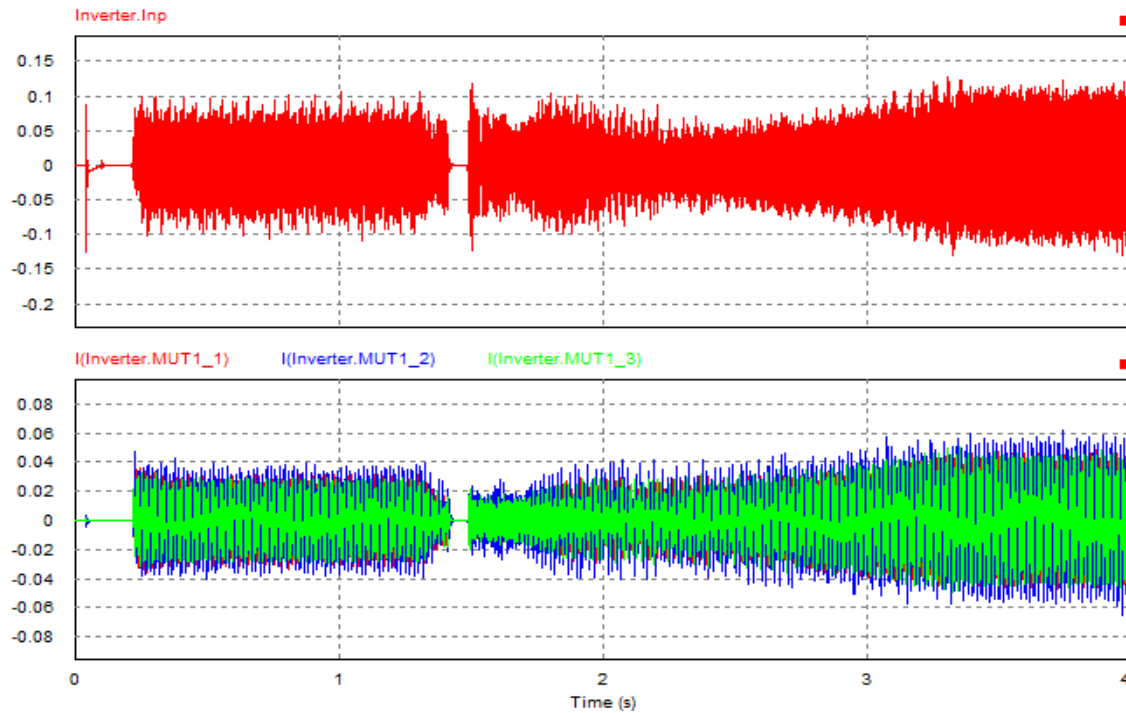


Figura 36: Corrientes en punto medio de bus (*Inverter.Inp*) y en las bobinas del filtro de salida (*PSIM*)

#### 7.2.2.2.- Lanzamiento de tests

Se muestra en este apartado la generación de las rampas y escalones. Las imágenes incluidas forman todas ellas parte de la misma simulación aunque para mayor detalle se presentan separadas.

Como se ve en la parte superior de la siguiente imagen, la tensión del bus no presenta desequilibrios o derivas permaneciendo estable en un valor de 50V. En la parte inferior de la misma figura se aprecia el rizado en los semibuses, éste no alcanza los 0.1V y la tendencia que se observa en su comportamiento tampoco refleja inestabilidades o derivas que pudieran desencadenar en un desequilibrio por lo que se considera que los resultados obtenidos son favorables.

En la imagen incluida a continuación, que recoge las tensiones generadas se observa como estas siguen la referencia, partiendo del estado de generación nominal y reduciéndose hasta alcanzar el estado de generación base. Posteriormente se inicia la rampa durante el tiempo del ensayo. Para comprobar la pendiente se muestrean ciertos puntos de la rampa (10 en total) y en todos ellos los valores de tensiones generados y las frecuencias están dentro de los valores de consigna con un error inferior al 1% y 0.1Hz respectivamente.



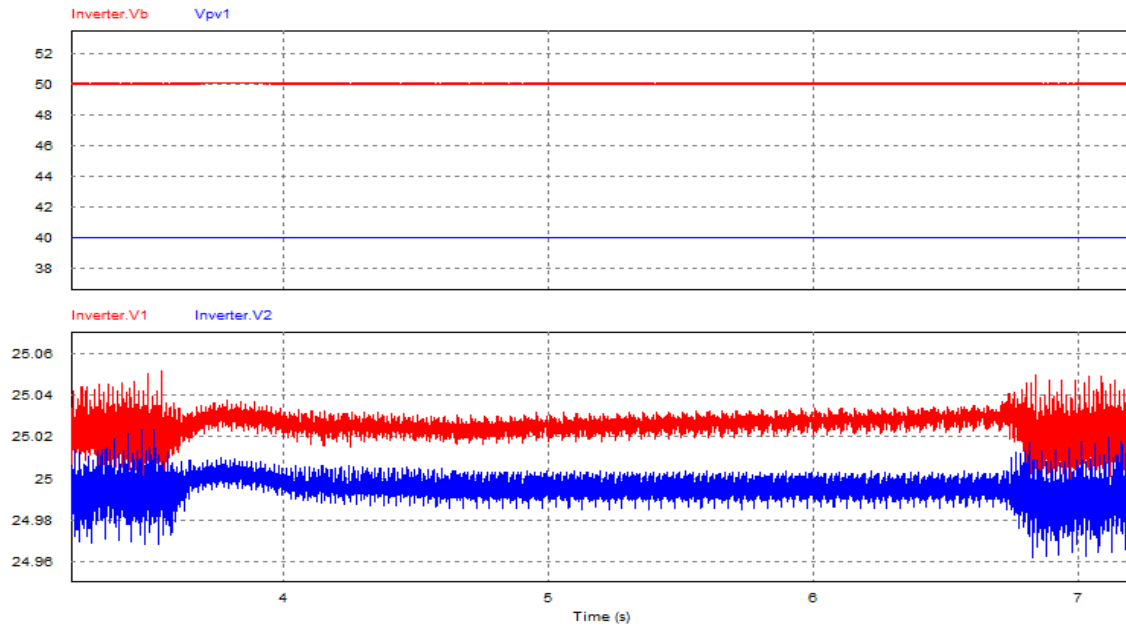


Figura 37: Tensión de fuente (Vpv1), bus (Inverter.Vb) y semibuses (Inverter.V1 e Inverter.V2) (test) (PSIM)

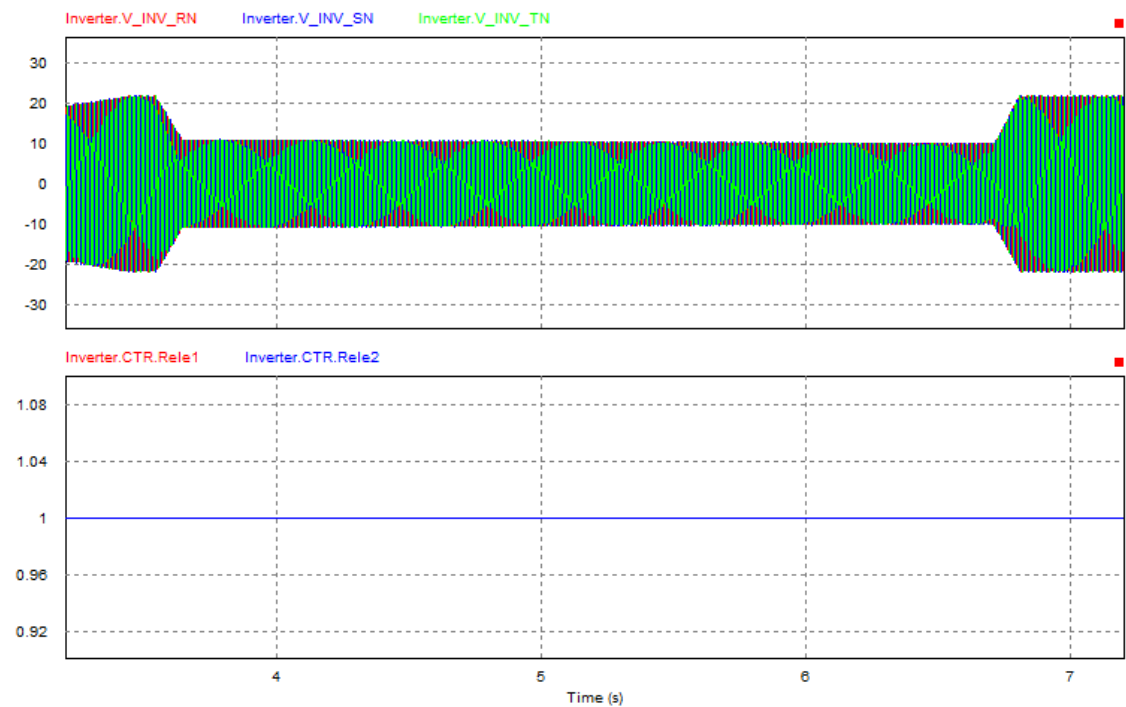


Figura 38: Tensiones generadas y estado de los relés (test) (PSIM)

Durante el desarrollo de la prueba, al realizar las transiciones entre diferentes niveles de tensión en rampa, no se producen variaciones bruscas de corriente y estas están en todo momento dentro de valores adecuados como se ve a continuación.

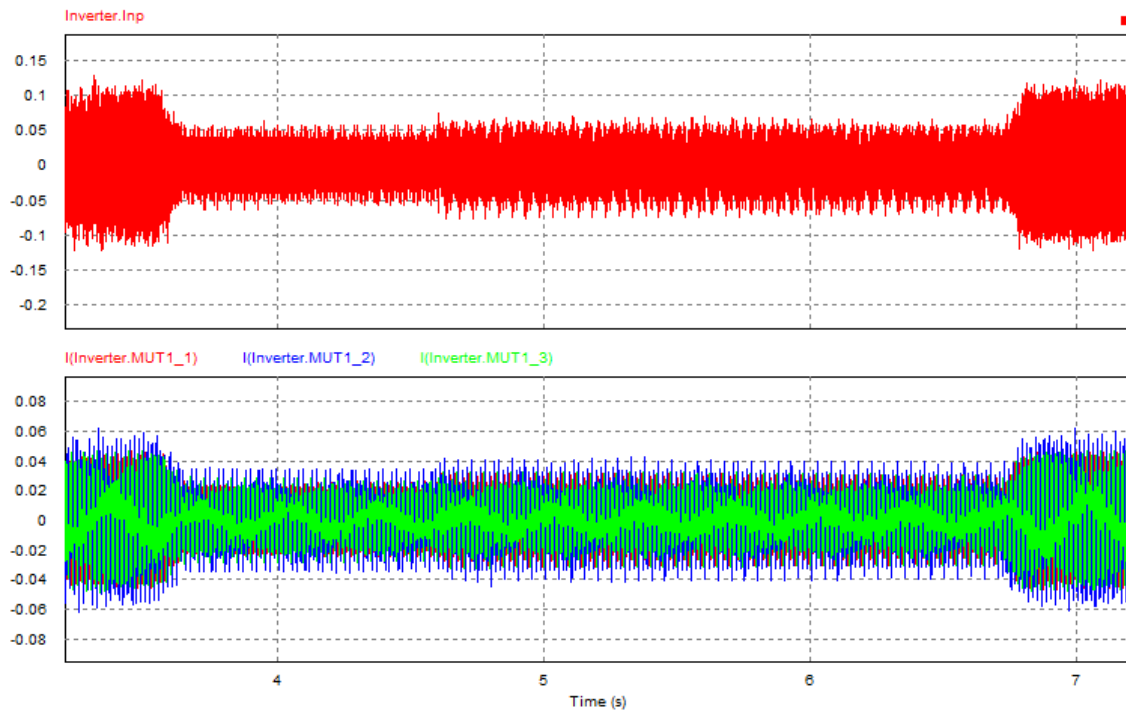


Figura 39: Corriente en punto medio de bus y en las bobinas del filtro de salida (PSIM)

Aunque gráficamente solo se ha presentado los resultados de uno de los tests, el que genera una rampa descendente hasta ensayar el rango de tensiones menor, el resto, tanto en materia de tensiones como de frecuencias, y ya sea en rampa o en escalón, han dado resultados similares sin que en ningún caso se hayan producido variaciones bruscas de corriente u oscilaciones en la tensión de bus entre otros problemas o errores.

También se simulan ensayos a diferentes consignas de tensiones, tanto alternas como de bus, obteniendo de nuevo resultados favorables.

- Tensión de fuente: 40, 50 y 100Vdc.
- Consignas de bus DC: 50, 100, 250 y 500 Vdc.
- Consignas de AC: 15, 30, 65 y 130Vrms.

### 7.3.- Comprobación preliminar fw\_abm1010 en maqueta

Finalizadas de forma favorable las simulaciones, se procede a comprobar la validez del firmware generado en un equipo real.

#### 7.3.1.- Calibración de equipo

Se calibran ambos equipos, ajustando los fondos de escala pertinentes.

En el caso del equipo que se empleará como fuente se ajustan las captaciones de cada uno de los semibuses, ya que estos intervienen a la hora de generar las consignas de alterna, como las de las tensiones de las fases, al ser estas necesarias para la monitorización de las tensiones generadas.

En el caso del equipo a ensayar se ajustan las captaciones de las fases ya que estas son las que intervienen a la hora de detectar las tensiones y frecuencias anómalas.

Tanto el procedimiento seguido como la información relativa a los equipos empleados para estos ajustes pueden encontrarse recogida en el Anexo 1.

#### 7.3.2.- Creación de controles en la aplicación Freemaster

Freemaster es un software utilizado para el control y gestión en tiempo real de microcontroladores. Con esta aplicación y el archivo .map asociado al firmware cargado en el equipo [11] es posible el manejo de dicho componente y del equipo al que sirve de núcleo.

Para el control de la maqueta se ha creado, dentro de la actual estructura para la gestión de los equipos, una aplicación que permitirá el desarrollo de los ensayos. Se ha dispuesto conforme la siguiente estructura:

- TestRampGen: Se encuentra en nivel principal de las aplicaciones. Contiene las variables de control más cercanas al operario y permite lanzar los ensayos pero sin entrar en más configuraciones.
- TestParams: Se encuentra en el primer sub-apartado. Contiene las variables para la configuración de los ensayos, permite modificaciones de forma individual sobre ellos.

- NominalValues: Sub-apartado en el que se muestran los valores de las variables más significativas en el momento de salida del estado nominal.
- BaseValues: Sub-apartado en el que se muestran los valores de las variables más significativas en el momento de salida del estado base.
- TripValues: Sub-apartado en el que se muestran los valores de las variables más significativas capturadas en el momento del disparo de la señal del equipo a ensayo.
- UltValues: Sub-apartado en el que se muestran los valores de las variables más significativas en el momento de llegada al estado último de generación.
- RampStandardValues: Sub-apartado en el que se presentan los valores de disparo para tensiones y frecuencias calculadas según los procedimientos incluidos en la normativa.

Se ha incluido a modo de guía en el Anexo 2 una descripción de los distintos elementos incluidos en la aplicación Freemaster que permitirán la configuración y lanzamiento de los distintos ensayos así como la obtención de los resultados.

### **7.3.3.- Validación de la configuración empleada**

Tras comprobar que se obtienen resultados favorables de las simulaciones y de configurar Freemaster como herramienta para el control en tiempo real del equipo, se realizan las primeras pruebas a fin de comprobar la validez de los resultados obtenidos en las simulaciones.

Se procede, al igual que en las simulaciones, efectuando en un principio arranques del equipo, comprobando el seguimiento de las distintas referencias y finalmente lanzando los ensayos.

#### **7.3.3.1.- Comprobación de arranque**

El equipo inicia su funcionamiento según lo esperado, realizando la carga de bootstrap, generando en rampa una tensión inicial y cesándola para que el relé pueda cerrarse sin provocar variaciones bruscas de corriente. Tras la conexión del relé externo se comienza a generar la tensión alterna demandada a la par que se eleva la tensión de bus para el estado nominal.

La primera prueba realizada consiste en modificar de forma manual las referencias a fin de comprobar que el equipo sigue las consignas marcadas, que la tensión generada era la adecuada y que el elevador mantenía la tensión del bus sin que se produjesen desequilibrios.

Se comienza con la fuente de continua proporcionando 30V, la consigna de bus a 30V y la de alterna a 10Vrms. Se comprueba la tensión de bus durante 5 periodos de 2 minutos sin que se produzcan variaciones considerables.

En vista de los resultados favorables se continúa con la misma alimentación de fuente pero elevando las consignas hasta valores de 50V y 15Vrms para bus y salida alterna respectivamente. Nuevamente se obtienen resultados favorables. Se comprueban también valores de generación constante para consignas de 75 y 100V de bus y 20 y 30 Vrms en la salida sin que se produzcan variaciones por lo que se decide pasar a comprobar el lanzamiento de los ensayos.

### **7.3.3.2.- Primeros ensayos**

En primer lugar se llevaron a cabo tests escalón, debido a que las variaciones de tensión en estos son más bruscas y podrían resultar más críticas. Las tensiones de fuente tuvieron valores comprendidos entre los 30 y los 95Vdc con saltos de 10V a fin de comprobar también si el control de la tensión de bus por parte de los elevadores era la adecuada. La referencia para la tensión de bus se mantuvo estable en los 100Vdc y la de generación en los 30Vrms.

Se realizó un total de 20 ensayos para cada uno de los diferentes niveles de tensión de fuente. Los resultados fueron favorables al mantenerse ambos semibuses equilibrados en torno a sus tensiones de origen de 47.8V y -50.2V para positivo y negativo respectivamente. El error en la tensión generada no superó el 4% aunque este valor tampoco es representativo al generarse tensiones muy bajas.

A continuación se procede de forma análoga al caso anterior fijando la consigna de bus en 250V, la de salida en 65Vrms y variando la tensión de entrada entre valores de 50 a 245Vdc en pasos de 25V.

Durante los 50 ensayos para cada uno de los niveles de entrada no se constataron variaciones de tensión en los semibuses, manteniéndose en todo momento en torno a 123.4V para el positivo y -125.0V para el negativo. La tensión generada fue de  $64.3 \pm 0.3V$  por lo que el error en la generación se redujo hasta el 1.5% aproximadamente.

Por último se realizaron ensayos para tensiones de bus de 500Vdc y de salida de 130Vrms. El valor de la fuente varía en valores de 50V desde los 100 hasta los 495.

Como en los casos anteriores se obtienen resultados favorables. La tensión en el semibus positivo se mantiene en los 249.1V y en el negativo en los -249.7V. La tensión generada estuvo en valores de  $129.7 \pm 0.2V$ , por lo que el error en este caso resultó ser del 0.4%.

Todas las medidas de tensión se llevaron de forma simultánea tanto con las captaciones del equipo como con un osciloscopio Yokogawa (datos en Anexo 1) como con un polímetro Fluke (datos en Anexo 1). Se ha incluido a modo representativo la siguiente imagen correspondiente a uno de los ensayos.

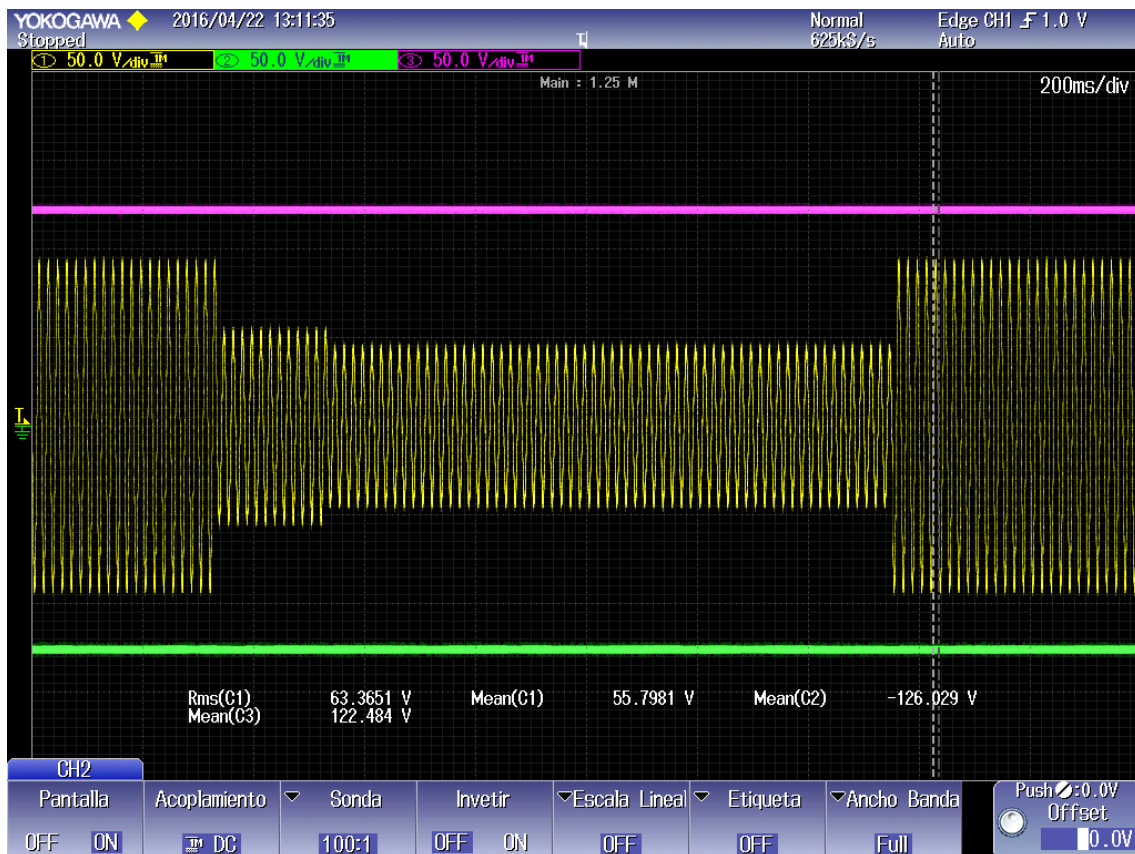


Figura 40: Resultado de un test escalón generando a 65Vrms (Yokogawa)

### 7.3.3.3.- Pruebas en condiciones nominales

Como los resultados obtenidos son favorables, se opta por realizar las primeras pruebas de generación para condiciones nominales de operación. Se fija como tensión de fuente un valor de 300Vdc, 800V de consigna para tensión de bus y una tensión nominal a generar de 277Vrms.

Como puede verse en la siguiente imagen, para condiciones y valores de generación nominal el error no supera el 1%.

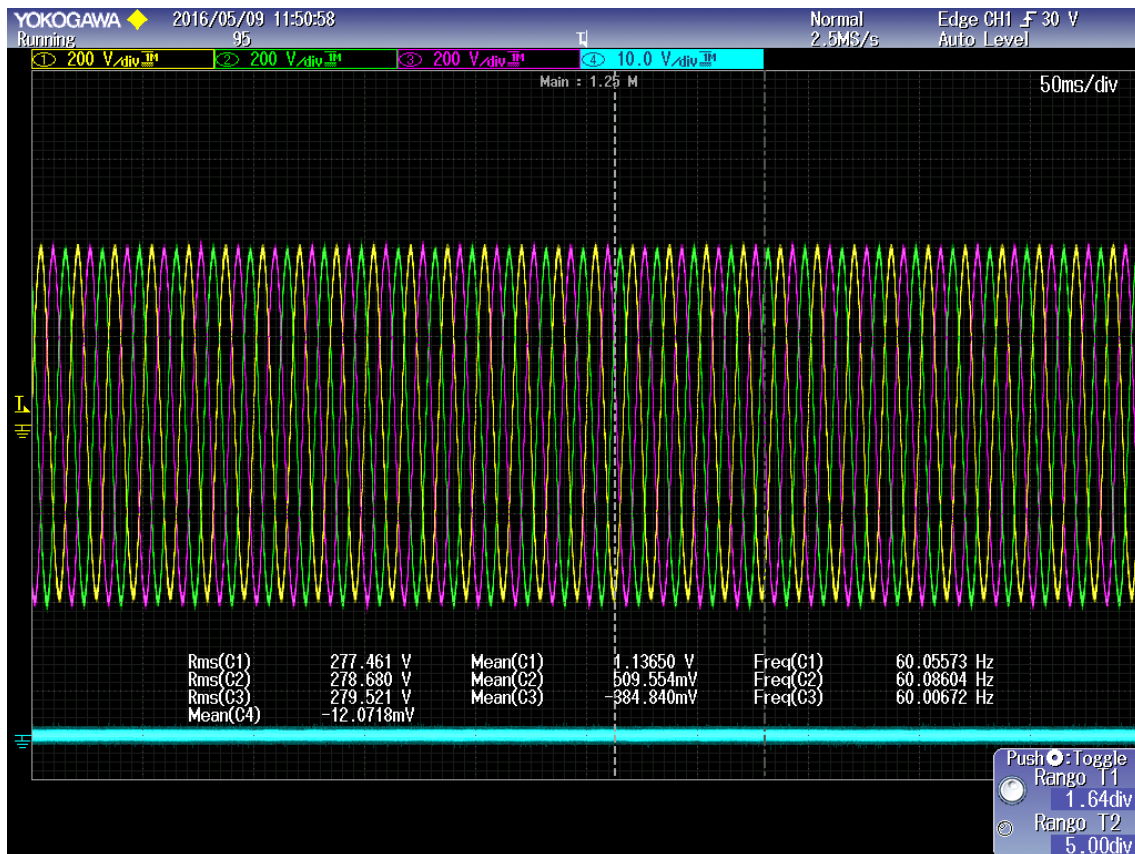


Figura 41: Generación nominal en estado de espera (Yokogawa)

### 7.3.4.- Conformidad a normativa en condiciones nominales

En vista a lo favorable de los resultados obtenidos se procede a realizar las pruebas que permitiesen comprobar la validez del equipo para el desarrollo de los ensayos.

### 7.3.4.1.- Variaciones de voltaje durante los permanentes de los tests menores al $\pm 1\%$ del voltaje nominal [3]

Se procede a comprobar la precisión de la generación en los distintos rangos de operación de los tests. Se genera una tensión alterna a distintos niveles de tensión y se comprueba con un polímetro los valores de generación en cada uno de los niveles.

Tabla 12: Error en la generación a diferentes niveles de tensión

Tensión							
Bus (V)	Ref. AC (Vrms)	Polím. R (Vrms)	Polím. S (Vrms)	Polím. T (Vrms)	error R (%)	error S (%)	error T (%)
800	100	99,7	99,6	99,8	-0,30	-0,40	-0,20
800	120	119,9	120	120	-0,08	0,00	0,00
800	140	140	140	140,1	0,00	0,00	0,07
800	160	160,1	160,2	160,3	0,06	0,12	0,19
800	180	180,2	180,3	180,4	0,11	0,17	0,22
800	200	200,2	200,2	200,4	0,10	0,10	0,20
800	220	220,3	220,2	220,6	0,14	0,09	0,27
800	240	240,4	240,4	240,8	0,17	0,17	0,33
800	260	260,8	260,8	261,3	0,31	0,31	0,50
800	280	281,8	281,8	282,2	0,64	0,64	0,79
950	280	280,5	280,5	280,9	0,18	0,18	0,32
950	300	300,7	300,8	301,3	0,23	0,27	0,43
950	320	321,1	321,2	321,6	0,34	0,37	0,50

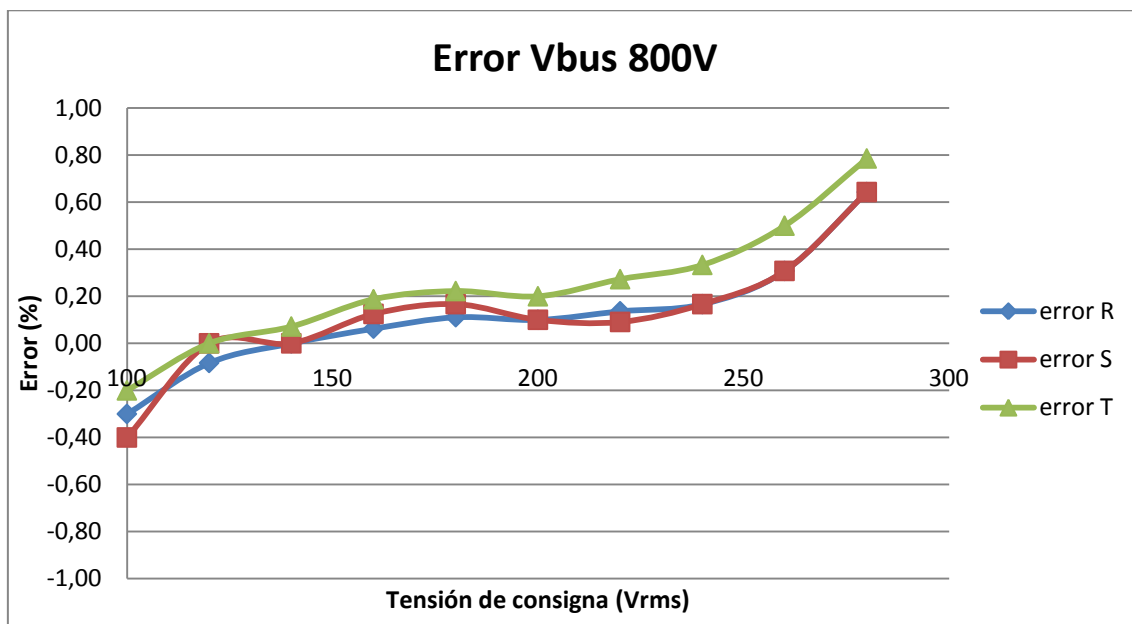


Figura 42: Error en la generación constante a distintos niveles de tensión I



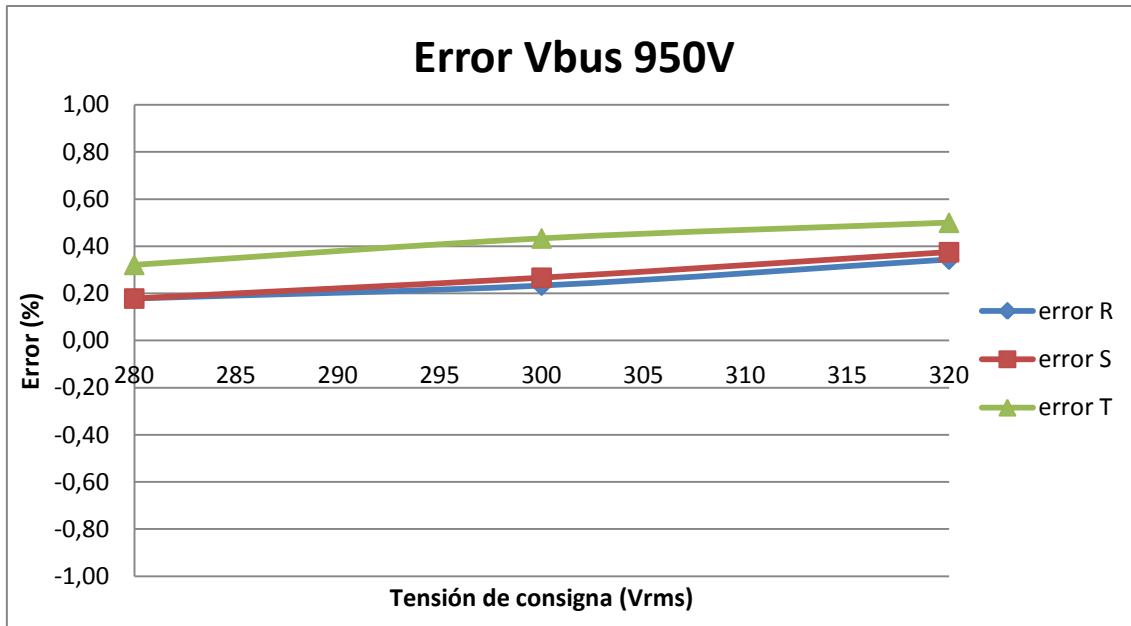


Figura 43: Error en la generación constante a distintos niveles de tensión II

Como puede verse en las gráficas el error es mayor cerca del punto de trabajo nominal de los ensayos cuando el bus está en los 800V. Este error se ve disminuido cuando se eleva la tensión de bus hasta los 950V.

En vista a los resultados obtenidos puede considerarse este primer requisito como resuelto satisfactoriamente.

### 7.3.4.2.- Resolución de cambio de la tensión de fuente en el voltage trip magnitude test dentro del 0.5\*a del voltaje nominal [3]

Para comprobar que la generación de tensión y frecuencia se ajusta a la capacidad de cambio demandada se optó por comprobar vía Freemaster el seguimiento de la referencia.

Como puede verse en la siguiente imagen, en la que se ha graficado los parámetros medidos por las captaciones del equipo, la tensión alterna generada sigue de forma adecuada la referencia generando los diferentes escalones de los que se compone la rampa.

Además de comprobar el seguimiento de la referencia, se lanzaron distintos ensayos de rampa con una pendiente un 10% superior a la máxima de los tests. Los valores se obtuvieron a través del osciloscopio Yokogawa y con las propias captaciones del equipo a fin de comprobar también la precisión de estas.

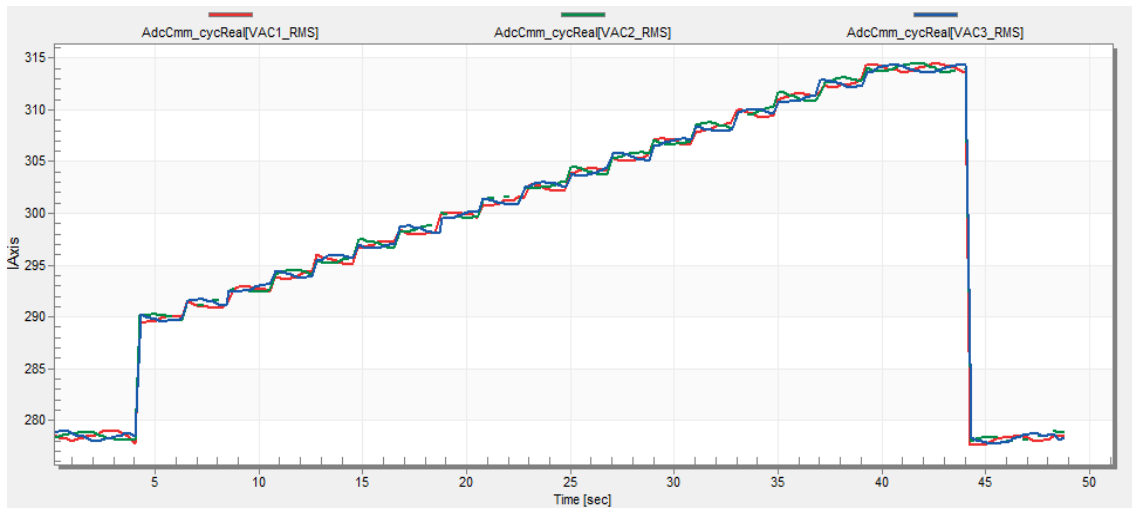


Figura 44: Seguimiento de la referencia de tensión (Freemaster)

El procedimiento consistió en lanzar el ensayo y generar 10 puntos de muestreo a lo largo de la rampa más otro en la generación última. Los puntos se señalaron en el osciloscopio mediante el disparo de una salida digital del equipo.

Se han incluido en el presente proyecto los resultados más desfavorables de todos los obtenidos durante los ensayos.

Tabla 13: Test Rampa seguimiento referencia L\_L\_L

TEST L_L_L						
Tiempo (ms)	Tensión			Error		
	Osc. R	Capt. R	Ref.	osc./ref.	capt./ref.	capt./osc.
2	128,81	128,49	128,39	0,33	0,08	-0,25
102	128,51	128,21	127,95	0,44	0,20	-0,23
204	128,25	127,66	127,51	0,58	0,12	-0,46
306	127,75	127,26	127,07	0,54	0,15	-0,38
408	127,19	126,89	126,63	0,44	0,21	-0,24
510	127,01	126,34	126,19	0,65	0,12	-0,53
612	126,38	125,97	125,75	0,50	0,17	-0,32
714	125,83	125,33	125,30	0,42	0,02	-0,40
816	125,43	124,99	124,86	0,46	0,10	-0,35
918	125,30	124,47	124,42	0,71	0,04	-0,66
1020	124,82	123,77	123,98	0,68	-0,17	-0,84
1122	124,74	123,92	123,96	0,63	-0,03	-0,66

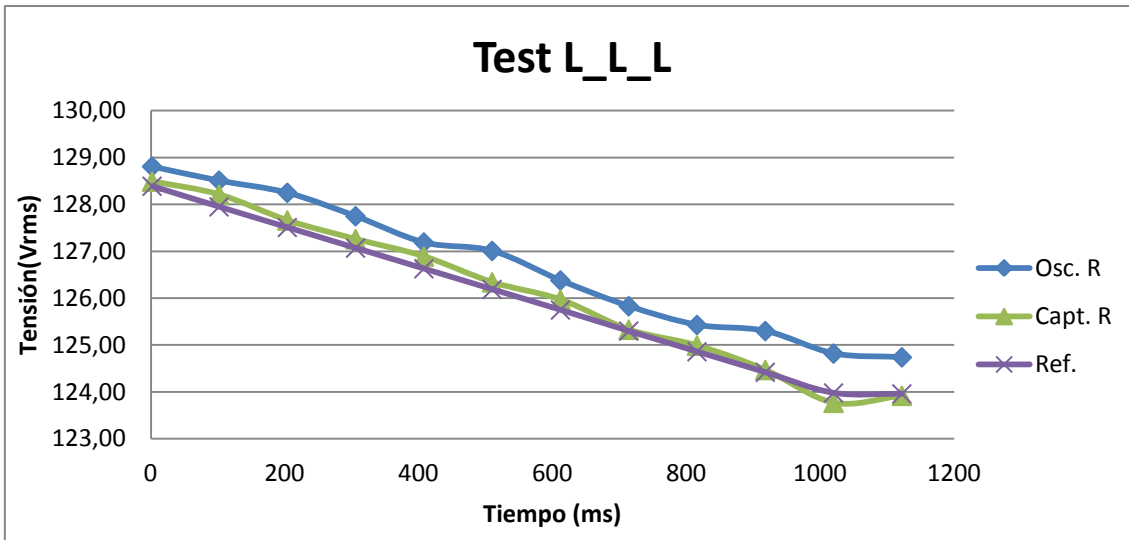


Figura 45: Seguimiento de referencia de tensión en test L\_L\_L

Como puede verse, el mayor error en relación al nivel de tensión generado ocurre en el nivel inferior, siendo debido a que en este punto el margen para el error es menor al estar generando las tensiones más bajas de todas las pruebas. Aun así el error no supera en ningún momento el 1% por lo que se confirma el seguimiento de la referencia y el cumplimiento del requisito.

**7.3.4.3.- Resolución de cambio de la frecuencia de fuente en el frequency trip magnitude test dentro del 0.5\*a de la frecuencia nominal [3]**

Para validar este requisito se procede de forma análoga al punto anterior. Se genera en primer lugar vía Freemaster una gráfica con los valores de frecuencias tomados por las captaciones del equipo.

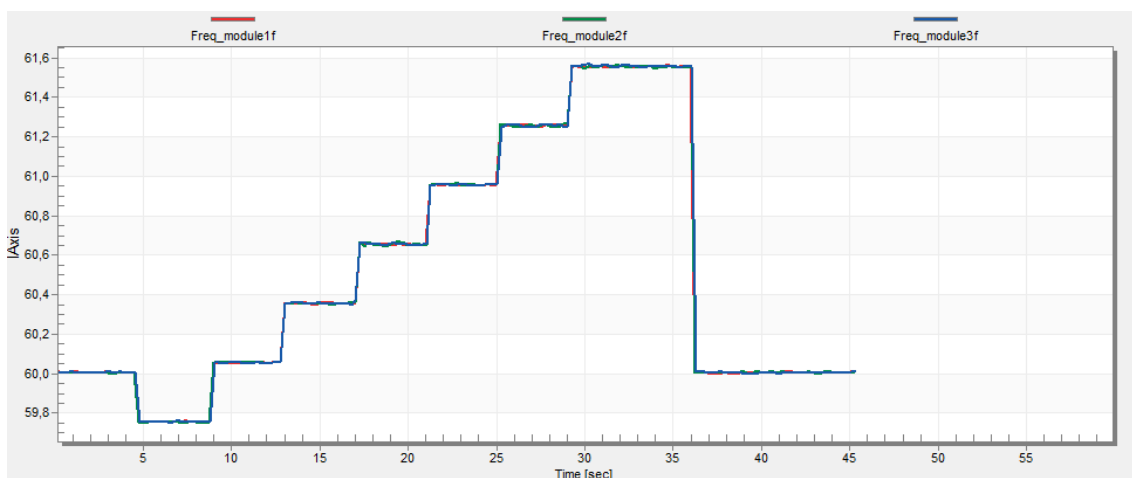


Figura 46: Seguimiento de la referencia de frecuencia (Freemaster)

A continuación se procede a generar una rampa de frecuencia con una pendiente un 10% mayor para verificar el seguimiento de la referencia mediante el muestreo de 10 puntos. Se han incluido solo los resultados más desfavorables mientras que el resto quedarán accesibles a través del documento TestsRampas+10%.xlsx.

Tabla 14: Resultados seguimiento referencia test UF1

TEST UF1							
Tiempo (ms)	Frecuencia			Error			
	Osc. R	Capt. R	Ref.	osc./ref.	capt./ref.	capt./osc.	
2	0,01720	58,14	58,15	58,14	0,00	0,02	0,02
137	0,01724	58,00	58,04	58,01	-0,01	0,05	0,06
274	0,01726	57,94	57,91	57,88	0,10	0,05	-0,05
411	0,01730	57,80	57,78	57,76	0,08	0,03	-0,04
548	0,01736	57,60	57,65	57,63	-0,05	0,03	0,08
685	0,01738	57,54	57,53	57,50	0,07	0,05	-0,01
822	0,01742	57,41	57,39	57,37	0,06	0,03	-0,03
959	0,01748	57,21	57,26	57,24	-0,06	0,03	0,09
1096	0,01750	57,14	57,15	57,11	0,06	0,07	0,01
1233	0,01754	57,01	57,02	56,98	0,06	0,07	0,01
1370	0,01756	56,95	56,89	56,86	0,15	0,05	-0,10
1507	0,01756	56,95	56,86	56,85	0,17	0,02	-0,15

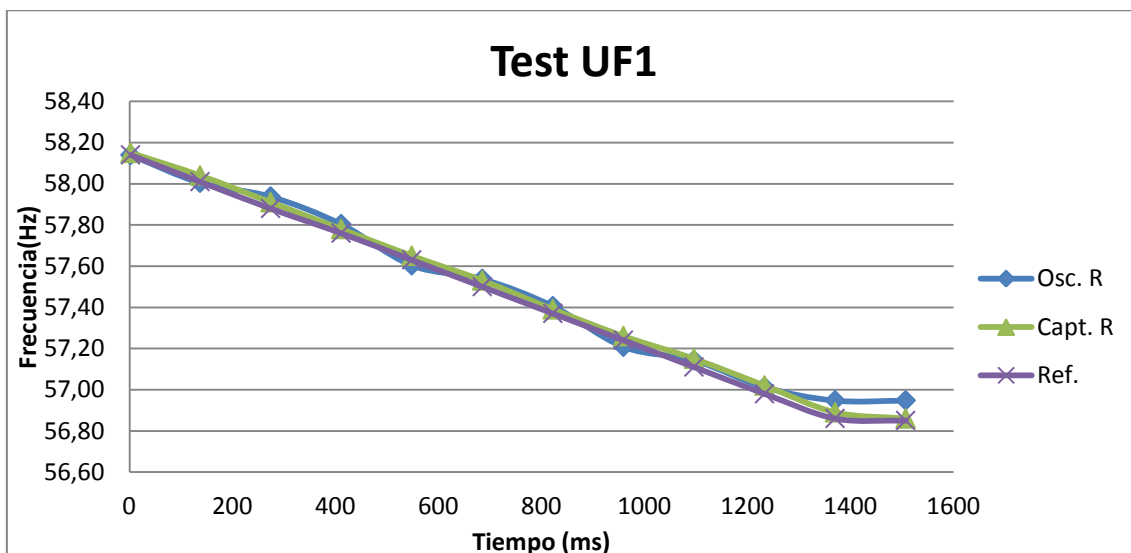


Figura 47: Seguimiento de referencia de tensión en test UF1

El resultado más desfavorable sucedió en el test para menores frecuencias y el error en este caso no llegó al 0.2%. Los resultados obtenidos permiten dar conformidad al presente requisito.

**7.3.4.4.- Número de conexiones de fase y neutro entre equipos compatibles [3]**

El equipo destinado a actuar como fuente cumple con este requisito al tener, al igual que el equipo a ensayar, conexiones para cada una de las 3 fases y neutro.

**7.3.4.5.- Voltajes fase neutro en un ±3% del nominal [3]**

Este requerimiento se encuentra validado tanto por los resultados obtenidos en la medida de las tensiones que se ha efectuado a valores constantes de tensión como los de las rampas generadas. En ambos casos los valores de generación de tensión fase-neutro no han superado el 1%de error.

**7.3.4.6.- Desplazamiento entre fases en ±3º de la fase [3]**

Se comprobará mediante el osciloscopio que las fases tienen valores de desplazamiento oportunos.

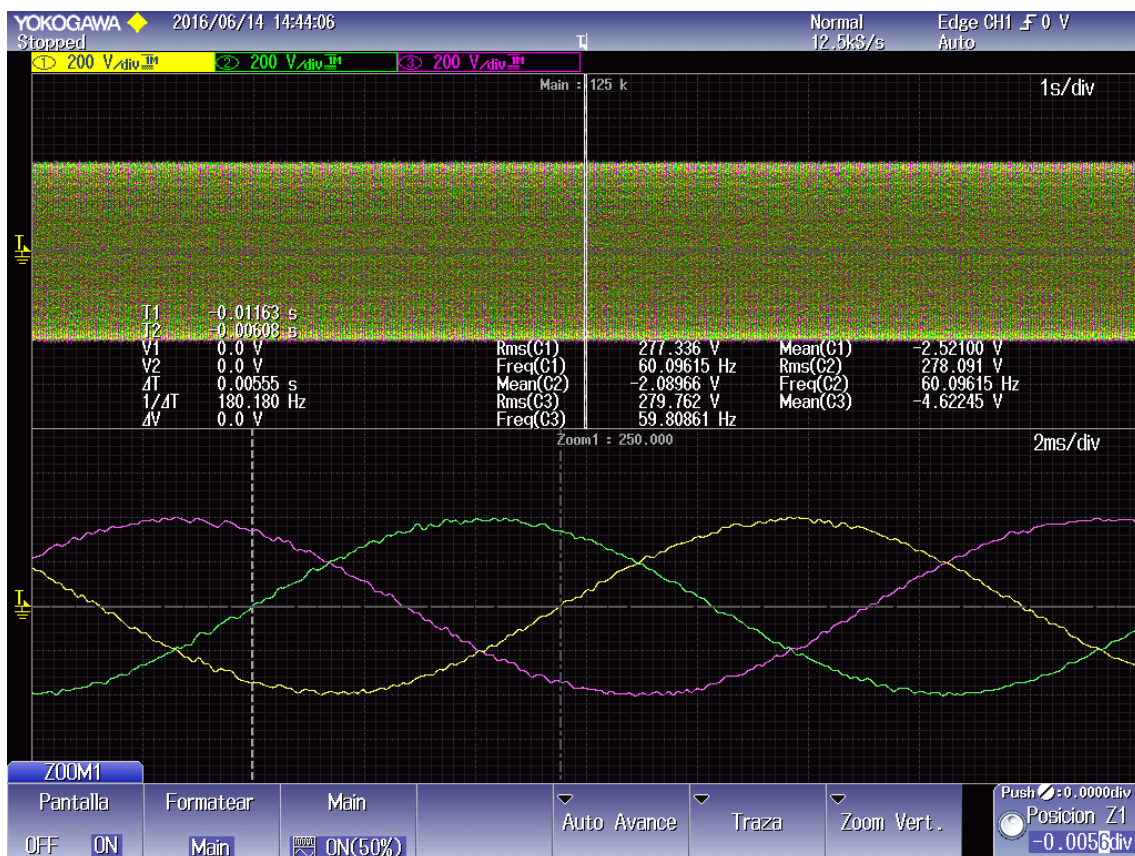


Figura 48: Desfase fases 1 y 2 (Yokogawa)

En la imagen previa se ha incluido el desfase a tensión nominal entre dos de las fases. Como puede comprobarse corresponde a 5.55ms o 120º exactamente ya que el periodo de la frecuencia son 16.66ms. Este desfase se ha comprobado entre las 3 fases con resultados idénticos de 5.55ms para cada una de ellas. Se ha seguido además el mismo proceso a diferentes niveles de tensión constatando en todos ellos que se cumple el requisito evaluado en este apartado.

### 7.3.4.7.- Cambio en escalón desde V1 a $V1+0.5*(V2-V1)$ en el tiempo que sea mayor entre 1 ciclo o un 1% del trip time [3]

Se comprobó mediante el lanzamiento del ensayo más crítico para este requerimiento, el que presentaba una mayor variación en la magnitud para pasar desde la tensión base a la última.

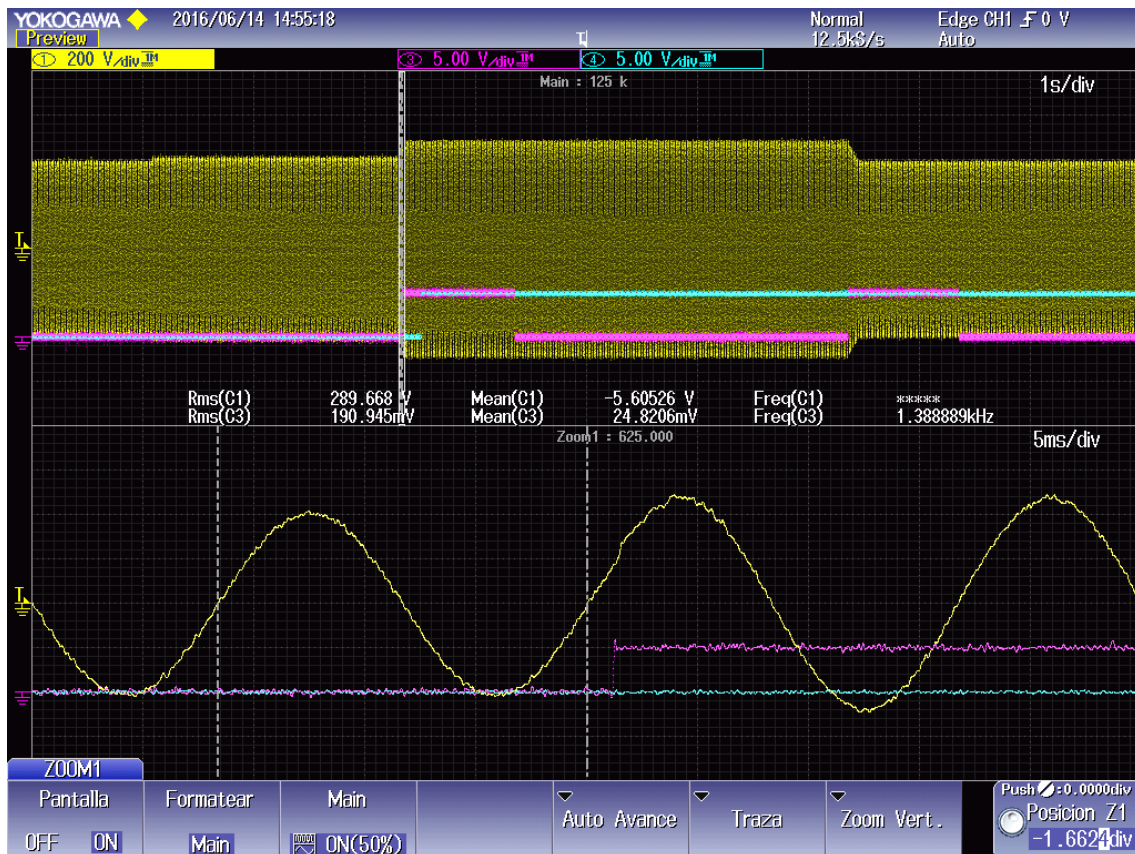


Figura 49: Lanzamiento test escalón H (I) (Yokogawa)

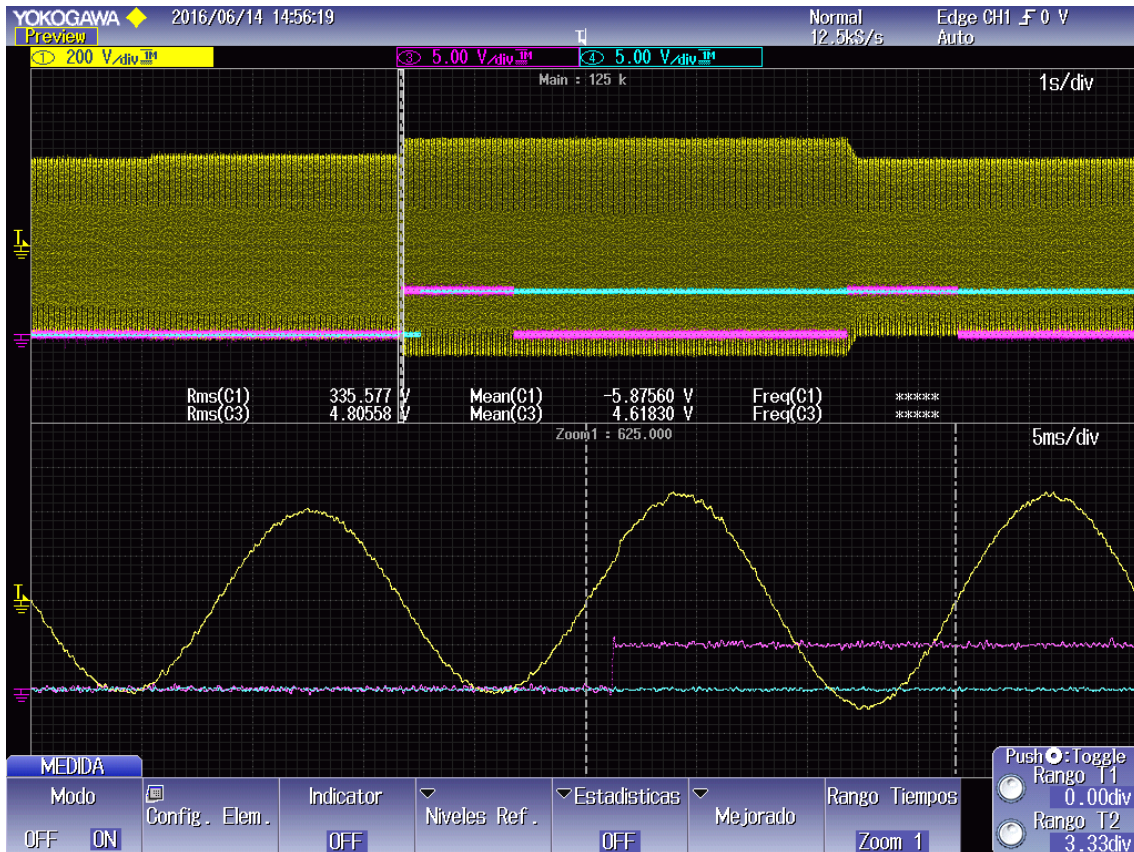


Figura 50: Lanzamiento test escalón H (II) (Yokogawa)

Como se evidencia a partir de las imágenes anteriores, el cambio de referencia se produce de forma adecuada. En la primera imagen se encuentra representada la tensión antes de que se produzca el cambio de referencia (señal morada) y que corresponde con un valor de 289.67Vrms (referencia de 289.47Vrms). En la segunda imagen se toma valor de la tensión obteniendo 335.58Vrms (referencia de 335.17Vrms). Queda confirmado que el equipo es capaz de realizar el cambio de tensión en escalón en un ciclo de red.

**7.3.4.8.- Cambio en escalón desde F1 a  $F1+0.5*(F2-F1)$  en el tiempo mayor entre 1 ciclo o un 1% del trip time**

De forma análoga al requisito anterior se va a comprobar mediante simulación que el equipo cumple con el requisito. Al igual que en el caso ya expuesto, al ser el parámetro último un 10% del valor base el mayor cambio de referencia se produce en el test OF2. Los resultados se muestran a continuación:



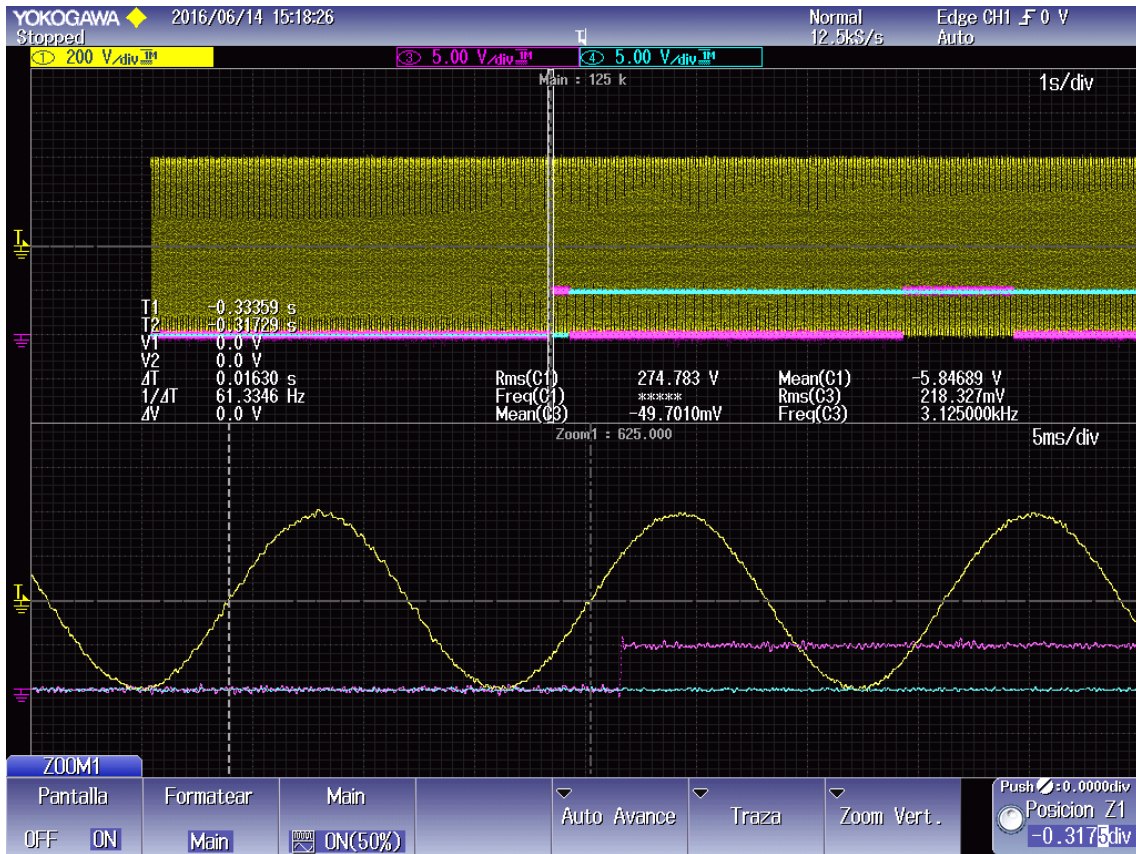


Figura 51: Lanzamiento test escalón OF2 (I) (Yokogawa)

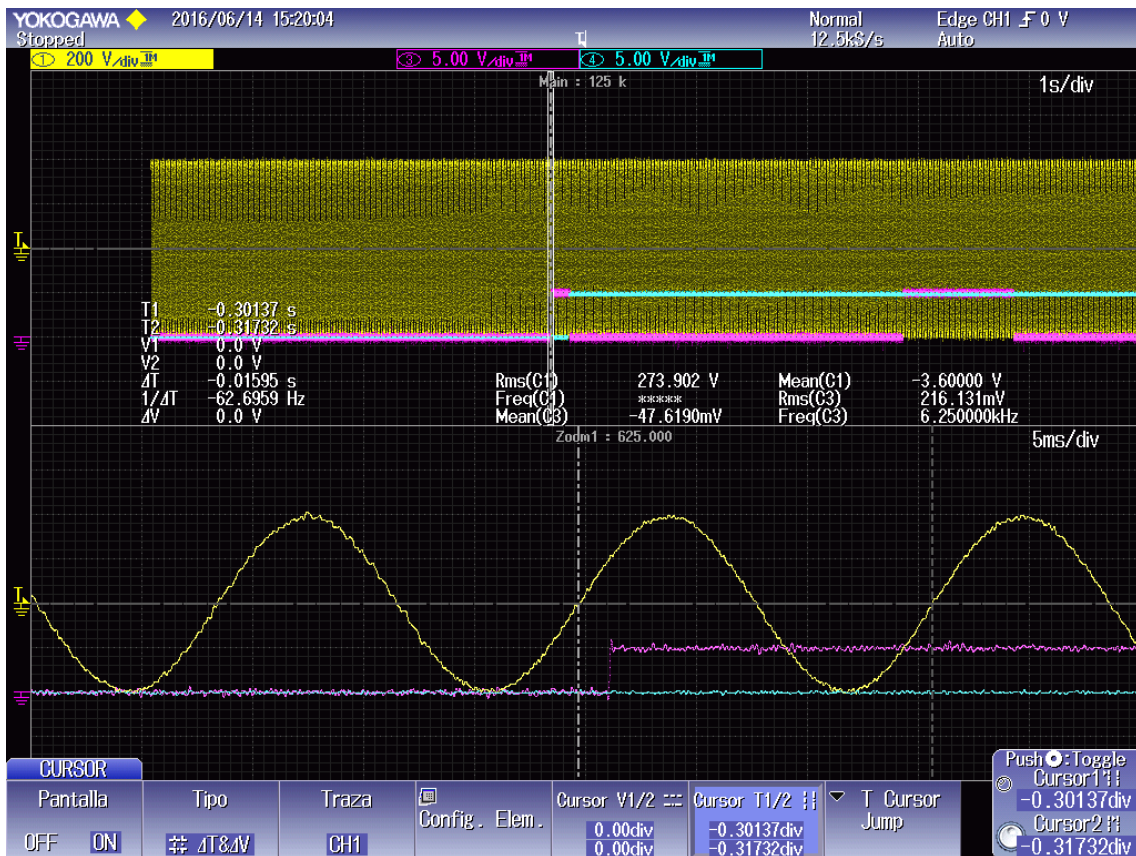


Figura 52: Lanzamiento test escalón OF2 (II) (Yokogawa)



De la primera imagen se obtiene que el escalón parte, en el ciclo previo al lanzamiento de la prueba, de una frecuencia de 61.35Hz (referencia de 61.5Hz). En la segunda imagen, tras el cambio de referencia, el valor de la frecuencia se ha situado en un valor de 62.7Hz (referencia de 62.62Hz). Queda así confirmado que el equipo es capaz de realizar la variación de frecuencia en el ensayo escalón más desfavorable en un ciclo de degeneración.

### 7.3.5.- Lanzamiento de ensayos

Ya se ha demostrado en el apartado previo la precisión a la hora de generar tensiones y frecuencias aún con variaciones bruscas en la referencia. En este se incluirá también los datos relacionados con la precisión a la hora de la toma de tiempos entre el lanzamiento del ensayo y la recepción de la señal de disparo.

Como puede verse en la imagen existe un lapso de tiempo inferior a 1 ms entre la comprobación de que la tensión de la fase objeto del ensayo atraviesa el paso por cero ascendente, tiempo de inicio para el ensayo según indica la norma, y el instante del lanzamiento de la prueba que coincide con la señal morada. Este desfase es debido al tiempo de refresco de la aplicación que es de 1 ms.

De igual forma la recepción de la señal, al estar incluida en el mismo tiempo de ejecución que la acción anterior, podría retrasarse en otro ms debido al tiempo de refresco de lectura de la misma.

En consecuencia, considerando ambos retardos, tendríamos que el máximo error teórico estaría en 2 ms, aunque en las más de 100 pruebas llevadas a cabo en ningún momento se superaron los 1.5ms de desviación.

Con esto tendríamos que el error cometido en el caso más desfavorable sería:

$$\text{Desviación teórica (\%)} = \frac{2 \text{ ms}}{160 \text{ ms}} * 100 = 1.25 \%$$

$$\text{Desviación máx. experimentada (\%)} = \frac{1.5 \text{ ms}}{160 \text{ ms}} * 100 = 0.94 \%$$

Se ha demostrado que el error máximo teórico estaría en 1.25% mientras que el experimentado no alcanzaría el 1%. Señalar de la importancia de las precisiones obtenidas al no poder recibir la señal por una entrada específica para estos fines.

A modo ilustrativo de la precisión conseguida en la temporización tendríamos, en el caso de ensayo escalón de tensión:

Variable Watch		Name	Value	Unit	
		m_fsmRampGenTestTripValues.testType	2	DEC	1000
		m_fsmRampGenTestTripValues.testToRun	1	DEC	1000
		m_fsmRampGenTestTripValues.phaseTest	2	DEC	1000
		m_fsmRampGenTestTripValues.valVac1	279.141	unit	1000
		m_fsmRampGenTestTripValues.valVac2	112.314	unit	1000
		m_fsmRampGenTestTripValues.valVac3	277.487	unit	1000
		m_fsmRampGenTestTripValues.refVac1	277	unit	1000
		m_fsmRampGenTestTripValues.refVac2	112.185	unit	1000
		m_fsmRampGenTestTripValues.refVac3	277	unit	1000
		m_fsmRampGenTestTripValues.valFreq1	60.0086	unit	1000
		m_fsmRampGenTestTripValues.valFreq2	60.0464	unit	1000
		m_fsmRampGenTestTripValues.valFreq3	60.0004	unit	1000
		m_fsmRampGenTestTripValues.refFreq	60	unit	1000
		m_fsmRampGenTestTripValues.TripLimit	177	DEC	1000
		m_fsmRampGenTestTripValues.TripTime	168	DEC	1000
		m_fsmRampGenTestTripCounter	1	DEC	1000
		m_fsmRampGenTestResult	FSMRAMPGEN_TEST_OK	ENUM	1000
		m_fsmRampGenRampTripTime	3178	DEC	1000
		m_fsmRampGenTripValueAux	168	unit	1000

Figura 53: Datos de disparo ensayo escalón LOW\_LOW\_LOW (Freemaster)

Tabla 15: Desviación en los datos del ensayo escalón LOW\_LOW\_LOW

L_L_L	Voltage			Trip Time (ms)	ERROR (%)		
	Base (Vrms)	Trip (Vrms)	Ult. (Vrms)		Trip Time Capt./Osc.	Vbase Osc./Ref.	Vult Osc./Ref.
Test Params.	130,88	124,65	112,185		0,539	0,344	0,740
Ref.	130,88		112,19			Capt./Ref.	Capt./Ref.
Capt.	130,97		112,31	168		0,069	0,107
Oscilo.	131,33		113,02	167,1		Capt./Osc.	Capt./Osc.
						-0,274	-0,628

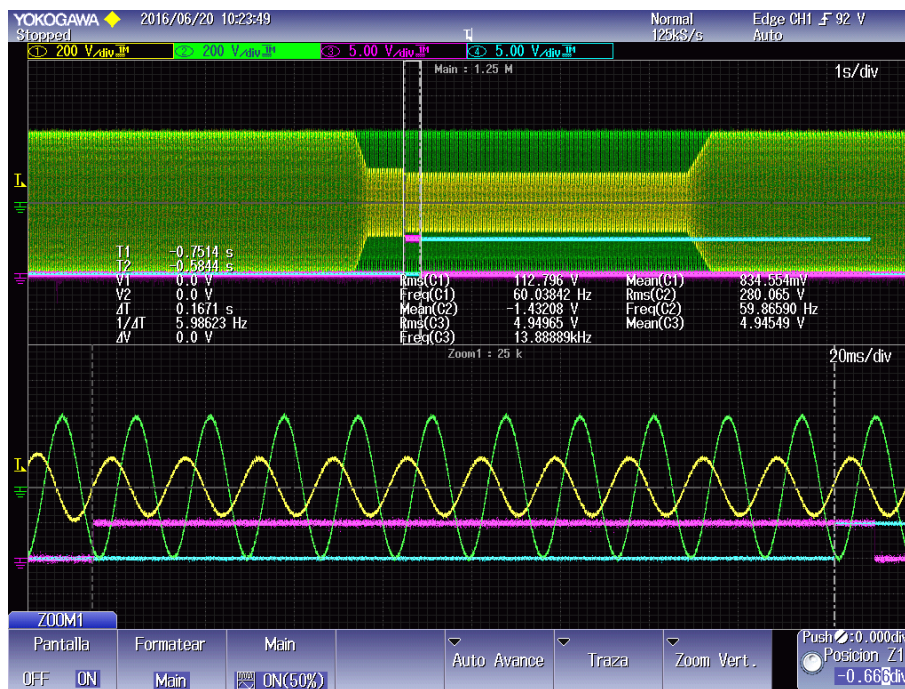


Figura 54: Datos de disparo ensayo escalón LOW\_LOW\_LOW (Osc. Yokogawa)

La desviación en la medida del tiempo de disparo es de 0.54%.

En el caso de un ensayo de frecuencia:

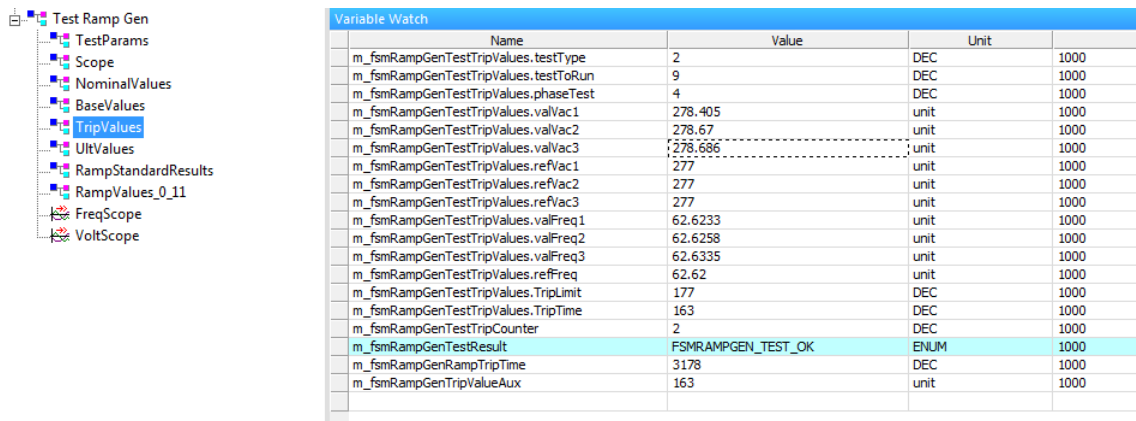


Figura 55: Datos de disparo ensayo escalón UF1 (Osc. Yokogawa)

Tabla 16: Desviación en los datos del ensayo escalón UF1

UF1	Frequency			Trip Time (ms)	ERROR(%)		
	Base (Hz)	Trip (Hz)	Ult. (Hz)		Trip Time Capt/Osc	Vbase Osc./Ref.	Vult Osc./Ref.
Test Params.	61,5	62	62,62		0,123	-0,060	-0,441
Ref.	61,5		62,62			Capt./Ref.	Capt./Ref.
Capt.	61,52		62,63	163		0,033	0,016
Oscilo.	61,46		62,34	162,8		Capt./Osc.	Capt./Osc.
						0,093	0,459

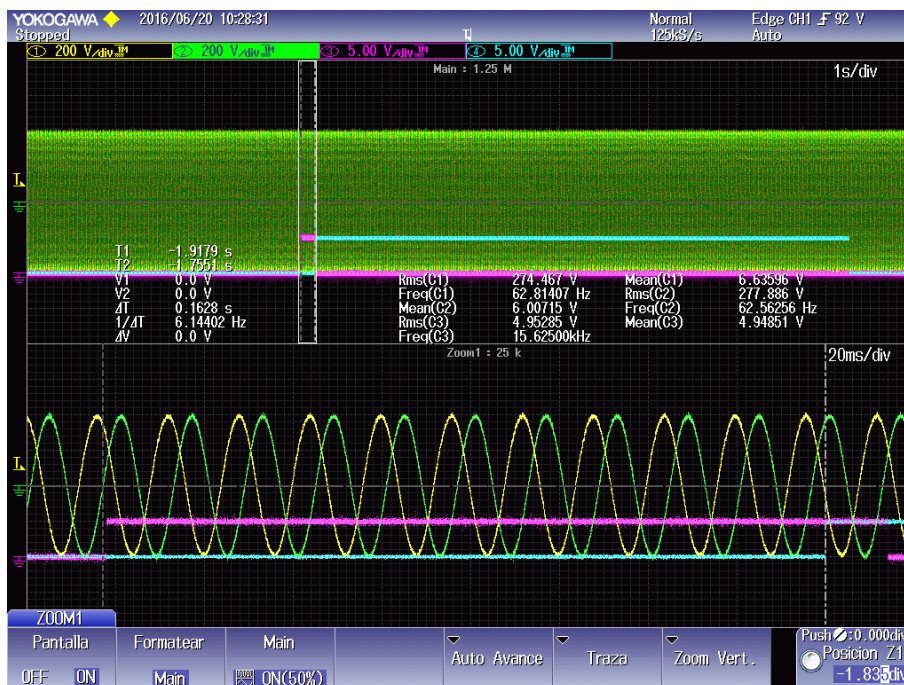


Figura 56: Datos de disparo ensayo escalón UF1 (Osc. Yokogawa)

La desviación es en este ensayo de 0.12%.

## 7.4.- Resultados obtenidos en los ensayos

Comprobado que la plataforma genera las pruebas de forma eficaz, se analizan de forma detallada los datos correspondientes a los ensayos más críticos.

### 7.4.1.- Ensayos en escalón

Incluye en primer lugar la tabla con las tensiones y frecuencias base, última y de disparo así como el tiempo de actuación. Se proporcionan los valores en la referencia y las medidas tomadas mediante las captaciones propias del equipo y el osciloscopio.

Se adjunta una segunda tabla con la desviación existente entre la tensión generada con respecto a la referencia. También se comparan los datos de las captaciones del equipo con respecto al osciloscopio.

#### 7.4.1.1.- Tensión LOW\_LOW\_LOW

Tabla 17: Ensayo en escalón LOW\_LOW\_LOW

L_L_L	Voltage			Trip Time (ms)
	Base (Vrms)	Trip (Vrms)	Ult. (Vrms)	
Ref.	130,88	124,65	112,19	
Capt.	130,91		112,1	159
Oscilo.	131,09		112,67	157,99

La desviación en la medida del tiempo de disparo entre el valor obtenido de la aplicación y el osciloscopio es de 0.64%.

Tabla 18: Desviación en los datos del ensayo escalón LOW\_LOW\_LOW

ERROR(%)	
Vbase	Vult
Osc./Ref.	Osc./Ref.
0,160	0,428
Capt./Osc.	Capt./Osc.
-0,137	-0,506

Tanto el error en la generación de la tensión base (0.16%) como en la generación última (0.43%) se encuentran por debajo al 1% marcado por la normativa. Además, la desviación de la medida obtenida de las captaciones con respecto a la del osciloscopio es en ambos casos inferior al 1%.

### 7.4.1.2.- Tensión HIGH\_HIGH

Tabla 19: Ensayo escalón HIGH\_HIGH

H_H	Voltage			Trip Time (ms)
	Base (Vrms)	Trip (Vrms)	Ult (Vrms)	
Ref.	289,47	332,4	335,17	
Capt.	290,87		338,26	166
Oscilo.	288,06		336,28	165,17

La desviación del tiempo de disparo entre el valor medido por la aplicación y el osciloscopio es de 0.50%.

Tabla 20: Desviación en los datos del ensayo escalón HIGH\_HIGH

ERROR(%)	
Vbase	Vbase
Osc./Ref.	Osc./Ref.
-0,487	0,331
Capt./Osc.	Capt./Osc.
0,975	0,589

La desviación en la generación de la tensión base (0.49%) y en la generación última (0.33%) es inferior al 1%. Además, las captaciones con respecto al osciloscopio también varían menos del 1%.

### 7.4.1.3.- Frecuencia UF1

Tabla 21: Ensayo escalón UF1

UF1	Frequency			Trip Time (ms)
	Base (Hz)	Trip (Hz)	Ult (Hz)	
Ref.	57,46	57	56,43	
Capt.	57,47		56,44	158
Oscilo.	57,49		56,31	157,03

La desviación en el tiempo de disparo entre aplicación y osciloscopio es en este caso de 0.62%.

Tabla 22: Desviación en los datos del ensayo escalón UF1

ERROR(%)	
Vbase	Vult
Osc./Ref.	Osc./Ref.
0,048	-0,219
Capt./Osc.	Capt./Osc.
-0,031	0,237

El error en la generación de las tensiones, (0.048%) y (0.22%) respectivamente, se encuentran por debajo del 1%. Además, la desviación de la medida entre captaciones y osciloscopio es también inferior al 1%.

#### 7.4.1.4.- Frecuencia OF2

Tabla 23: Ensayo escalón OF2

OF2_1	Frequency			Trip Time (ms)
	Base (Hz)	Trip (Hz)	Ult (Hz)	
Ref.	61,5	62	62,62	
Capt.	61,51		62,63	170
Oscilo.	61,41		62,64	168,8

La desviación del tiempo de disparo entre el valor medido por la aplicación y el osciloscopio es de 0.71%.

Tabla 24: Desviación de los datos en el ensayo escalón OF2

ERROR(%)	
Vbase	Vult
Osc./Ref.	Osc./Ref.
-0,153	0,027
Capt./Osc.	Capt./Osc.
0,169	-0,011

El error en la generación de las tensiones es de 0.15% y 0.03% respectivamente. Además, la desviación de la medida obtenida de las captaciones con respecto al osciloscopio es también en ambos casos inferior al 1%.

### 7.4.2.- Ensayos en rampa

En este análisis se procede de forma análoga al anterior. En una primera tabla se incluyen los voltajes y frecuencias base, última y de disparo así como el tiempo de disparo. Se adjunta también la pendiente de la rampa generada y la magnitud del salto según el procedimiento del estándar. Los valores que se estudian son los proporcionados por la configuración del ensayo (Test Params.), la referencia de la generación (Ref.), la obtenida por las captaciones (Capt.), la del osciloscopio (Oscilo./Osc.) y la obtenida según el estándar (Standard/St.)

En una segunda tabla se encuentran la desviación entre la magnitud medida por el osciloscopio y la referencia, la captación con respecto al osciloscopio y la calculada mediante el estándar con respecto a la medida en ese instante.

#### 7.4.2.1.- Tensión LOW\_LOW\_LOW

Tabla 25: Ensayo en rampa LOW\_LOW\_LOW

L_L_L	Voltage			Time		Slope (Vrms/ms)	Volt. Trip (Vrms)
	Base (Vrms)	Trip (Vrms)	Ult. (Vrms)	Trip (ms)	Ult. (ms)		
Test Params.	130,88	124,65	117,032		3540	0,00391186	
Ref.	130,88	123,96	117,03		3540	0,00391243	
Capt.	131	124,14	117,19	1583	3540	0,00390113	
Oscilo.	130,76	124,24	117,21	1581,93	3539,76	0,00382794	124,70
Standard		124,82				0,00391243	

Tabla 26: Desviación de los datos en el ensayo rampa LOW\_LOW\_LOW

ERROR(%)		
Vbase	Vtrip	Vult
Osc./Ref.	Osc./Ref.	Osc./Ref.
-0,09	0,23	0,15
Capt./Osc.	Capt./Osc.	Capt./Osc.
0,18	-0,08	-0,02
	St./Capt.	
	0,55	

Se comprueba que el error en la generación está dentro del 1%. De igual forma, el valor calculado por el equipo para la tensión de disparo (124.82Vrms) se aleja únicamente en un 0,55% del valor obtenido del osciloscopio (124.7Vrms).

Por último la pendiente de la rampa se desvía en un 2.16% con respecto a la calculada como referencia.

### 7.4.2.2.- Tensión HIGH\_HIGH

Tabla 27: Ensayo en rampa HIGH\_HIGH

H_H	Voltage			Time		Slope (Vrms/ms)	Volt. Trip (Vrms)
	Base (Vrms)	Trip (Vrms)	Ult. (Vrms)	Trip (ms)	Ult. (ms)		
Test Params.	315,09	332,4	335,86		5310	-0,00391149	
Ref.	315,09	330,32	335,86		5310	-0,00391149	
Capt.	317	332,34	338,46	3716	5310	-0,00404143	
Oscilo.	316,56	332,19	337,72	3715,5	5309,8	-0,00398508	331,37
Standard		332,02				0,00404162	

Tabla 28: Desviación de los datos en el ensayo rampa HIGH\_HIGH

ERROR(%)		
Vbase	Vtrip	Vult
Osc./Ref.	Osc./Ref.	Osc./Ref.
0,47	0,57	0,55
Capt./Osc.	Capt./Osc.	Capt./Osc.
0,14	0,05	0,22
	St./Capt.	
	-0,10	

Como en el caso anterior el error en la generación, comparando tensiones de la aplicación con respecto al valor de referencia, se encuentran dentro del 1% límite. El valor calculado con por el equipo (332.02Vrms) se aleja únicamente en un 0,20% del valor calculado mediante los datos del osciloscopio (331.37Vrms).

Finalmente la pendiente de la rampa se desvía en un 1.88% con respecto a la calculada como referencia.

### 7.4.2.3.- Frecuencia UF1

Tabla 29: Ensayo en rampa UF1

UF1	Frequency			Time		Slope (Vrms/ms)	Volt. Trip (Vrms)
	Base (Vrms)	Trip (Vrms)	Ult (Vrms)	Trip (ms)	Ult (ms)		
Test Params.	57,75	57,00	55,95		2124	0,00084746	
Ref.	57,75	56,85	55,95		2124	0,00084746	
Capt.	57,76	56,86	55,96	885	2124	0,00084746	
Oscilo.	57,59	56,95	55,80	884,76	2123,5	0,00083990	56,84
Standard		57,01				0,00084751	



Tabla 30: Desviación de los datos en el ensayo rampa UF1

ERROR(%)		
Vbase	Vtrip	Vult
Osc./Ref.	Osc./Ref.	Osc./Ref.
-0,28	0,17	-0,26
Capt./Osc.	Capt./Osc.	Capt./Osc.
0,30	-0,15	0,28
	St./Capt.	
	0,26	

Se comprueba que la precisión generando frecuencias esta dentro de los límites definidos por el estándar. El valor calculado (57.01Hz) se aleja únicamente en un 0,29% del valor calculado mediante los datos del osciloscopio (56.84Hz).

Señalar que la pendiente de la rampa se desvía únicamente en un 0.89% con respecto a la calculada como referencia.

#### 7.4.2.4.- Frecuencia OF2

Tabla 31: Ensayo en rampa OF2

OF2	Frequency			Time		Slope (Vrms/ms)	Volt. Trip (Vrms)
	Base (Vrms)	Trip (Vrms)	Ult (Vrms)	Trip (ms)	Ult (ms)		
Test Params.	61,25	62,00	63,05		2124	-0,00084746	
Ref.	61,25	62,15	63,05		2124	-0,00084746	
Capt.	61,26	62,17	63,08	881	2124	-0,00085687	
Oscilo.	61,29	62,52	63,13	880,7	2123,9	-0,00086540	62,06
Standard		62,01				0,00086346	

Tabla 32: Desviación de los datos en el ensayo rampa OF2

ERROR(%)		
Vbase	Vtrip	Vult
Osc./Ref.	Osc./Ref.	Osc./Ref.
0,07	0,59	0,13
Capt./Osc.	Capt./Osc.	Capt./Osc.
-0,05	-0,56	-0,08
	St./Capt.	
	-0,26	

Al igual que el caso anterior, la precisión generando frecuencias está dentro de los límites definidos por la normativa. El valor calculado (62.01Hz) se aleja únicamente en un 0,07% del valor del osciloscopio (62.06Hz).

La pendiente de la rampa se desvía un 2.12% con respecto a la de referencia.



## 8.- Conclusiones

Tras finalizar el desarrollo del equipo comprobador se concluye:

Desde el punto de vista hardware:

- Se ha completado el desarrollo de un equipo para el cual no existe un homólogo en el mercado y para ello se ha partido como base de un inversor de la familia 3Play, hardware propio de la empresa INGETEAM. Con anterioridad eran necesarios varios equipos, fuente generadora de AC variable en tensión y frecuencia, osciloscopio y sistema de toma de datos. Con este nuevo comprobador todo este sistema se encuentra integrado en un mismo equipo siendo únicamente necesarios un conector y dos cables que permitan la llegada de la señal de disparo del equipo a ensayar.
- Las modificaciones hardware realizadas en el equipo han sido sencillas y de poca entidad. Únicamente se ha realizado la conexión del neutro al punto medio del bus mediante un cable. Debido a este factor cualquier equipo actual de la familia 3Play TL M mediante esta alteración sería capaz de realizar estos ensayos.
- El equipo desarrollado, en caso de avería o fallo, será fácilmente reemplazable ya que como se ha mencionado en el punto anterior, cualquier equipo TL M es compatible con el firmware desarrollado. Esto no ocurre actualmente cuando se emplean fuentes comerciales ya que estas necesitan estar validadas previamente y cambiar la fuente estropeada supondría la necesidad de esta validación más el coste económico y de tiempo asociados.
- Se ha conseguido un equipo, que aún estando limitado para llevar a cabo los ensayos de tensiones, será capaz de realizarlos próximamente debido a que el mercado demanda cada vez más inversores con mayores tensiones de bus y se tenderá a su desarrollo en un periodo breve de tiempo. Además como se ha mencionado, las modificaciones necesarias para la compatibilidad del equipo con la realización de los ensayos son mínimas, esta posibilidad sería inmediata una vez desarrollado dicho equipo.

- Destacar también que el equipo implementado es mucho menos costoso que el tándem fuente AC y osciloscopio empleados actualmente. También supondría un importante ahorro en costes en comparación a la otra medida usada actualmente que necesita de un hardware diseñado específicamente para esta tarea más un equipo adquisidor de señales complementario cuyo coste ya prácticamente supera la solución que aquí se ha desarrollado.
- Finalizando este apartado, señalar también que las dimensiones y peso del equipo son menores a cualquiera de las soluciones empleadas actualmente, esto resulta muy positivo al considerar que es un equipo que puede ser fácilmente trasladado en un centro de producción o laboratorio que serán los lugares destino del equipo.

Desde el punto de vista firmware:

- Se ha conseguido implementar una nueva aplicación dentro del firmware de los equipos 3Play TL M de forma poco invasiva. Esto es así ya que el equipo sigue siendo perfectamente funcional aún con este firmware cargado.
- Se ha logrado generar tensiones de forma estable dentro de los límites físicos del equipo pero más allá de los límites empleados en estos inversores de forma usual.
- Se ha desarrollado una aplicación de uso sencillo ya que permite lanzar ensayos únicamente con el control de 3 variables para la configuración de los ensayos y una adicional para el lanzamiento. La aplicación permite también una configuración avanzada ya que los registros que configuran los distintos ensayos se encuentran accesibles. De forma adicional se han elaborado una serie de puntos de testeo interno que permite la comprobación de los valores críticos de los ensayos durante su procedimiento, incluyendo las tensiones frecuencias y tiempos mencionados en la memoria.
- La aplicación desarrollada es robusta y segura al incluir distintos controles internos además de los propios del equipo que se encuentran también habilitados.

Desde el punto de vista de los ensayos:

- Se ha implementado una generación de tensiones y frecuencias variables precisa que permite cumplir con los requerimientos especificados en la normativa estudiada. Tanto en los cambios bruscos de referencia necesaria para los ensayos en escalón, como en la pendiente generada en las rampas, han demostrado ser conformes a las capacidades del equipo así como ajustadas a las precisiones que se requerían según normativa.
- La monitorización de las variables de mayor interés e importancia, tanto para el desarrollo del equipo, como para dar conformidad a los ensayos y elaborar los informes, han sido resueltas de forma satisfactoria y dentro de los requisitos especificados por la normativa.
- Destacar que tanto las medidas de tensiones y frecuencias en los ensayos de magnitud o rampa presentan una desviación inferior al 1% respecto de un instrumento de precisión calibrado.
- Asimismo, los tiempos obtenidos en las medidas para los ensayos escalón se han conseguido obtener con una precisión inferior al 2% en los ensayos más restrictivos, estando la tolerancia en torno al milisegundo.

Como conclusión final y englobando las anteriores cabría señalar que, en vista a los resultados obtenidos en las distintas simulaciones y pruebas, se ha conseguido obtener de forma satisfactoria el equipo comprobador que motivó este desarrollo.



## 9.- Líneas futuras

Quedarían como posibles mejoras del equipo las siguientes:

- Adaptación de la aplicación que se ha implementado en Freemaster al proceso de producción llevado a cabo en la planta de la compañía en Sesma. Para ello sería necesario adaptar los registros con las variables claves del generador al protocolo de comunicaciones Modbus del que dispone el equipo.
- Incorporación de un hardware que permita la generación de mayores tensiones a la salida. Las principales restricciones se encuentran en los actuales condensadores y transistores que limitan la tensión de bus a 1000V. Sustituyendo estos por otros que soportasen mayores tensiones, además de alguna otra modificación complementaria, podrían generarse todos los niveles contenidos en los estándares.
- Modificación de las captaciones del equipo que permita obtener precisiones en las medidas de tensión inferiores al 1% actual. Para realizar esto sería necesario el cambio de las resistencias actuales, que presentan unas tolerancias del 1%, por otras en las que fueran menores.
- Implementación de un control sobre la actual generación de tensión que se desarrolla en lazo abierto. Aunque el error en la generación es inferior al 1% siendo esto consecuencia de las tolerancias en las captaciones, a raíz también del punto anterior, un menor error en las captaciones podría requerir de algún tipo de control para la generación.
- Modificación de la entrada de la señal de disparo. Actualmente se lee la señal de una entrada de propósito general libre en la tarjeta de control, esto conlleva que la lectura de dicha señal se lleve a cabo mediante software, con un retardo de hasta 1 ms. Implementando esta adquisición mediante una entrada de interrupciones hardware podrían reducirse los tiempos de detección hasta valores de microsegundos, ganando precisión en ensayos de tiempo o escalón.





## 10.- Bibliografía

- [1]. UL, «Standard for Inverters, Converters, Controllers and Interconnection System Equipment for Use With Distributed Energy Resources,» 2010.
- [2]. IEEE, «IEEE1547 Standard for Interconnecting Distributed Resources with Electric Power Systems,» IEEE, 2003.
- [3]. IEEE, «IEEE1547.1 Standard Conformance Test Procedures for Equipment Interconnecting Distributed Resources with Electric Power System,» 2003.
- [4]. Ingeteam Power Technology, «Documentación interna. ABI0002,» Sarriguren, 2015.
- [5]. Ingeteam Power Technology, «Documentación interna. ABI0003/ABO0003,» Sarriguren, 2016.
- [6]. AMETEK, «AMETEK Programmable Power Catalog,» Berwyn, 2016.
- [7]. CHROMA, «Programmable AC power Source Model 61700 Series,» Taoyuan City, 2016.
- [8]. Ingeteam Power Technology, «Documentación interna. AQD0200/Fuente nocturna,» Sarriguren, 2015.
- [9]. Ingeteam Power Technology, «Documentación interna. AAY0203,» Sarriguren, 2016.
- [10]. TI Texas Instruments, «TMS320F28X Datasheet,» Dallas, 2007.
- [11]. Ingeteam Power Technology, «Documentación interna. Firmware ABI1000,» Sarriguren, 2016.
- [12]. Ingeteam Power Technology, «Documentación interna. Simulación escalar,» Sarriguren, 2015.
- [13]. Ingeteam Power Technology, «Documentación interna. TI RTOS/SYSBIOS,» Sarriguren, 2015.
- [14]. Ingeteam Power Technology, «Documentación interna. C/C++ Coding Style Guide,» Sarriguren, 2013.
- [15]. Ingeteam Power Technology, «Documentación interna. Mandatory Rules To Design Firmware Applications,» Sarriguren, 2013.
- [16]. Ingeteam Power Technology, «Documentación interna. Catálogo Ingecon Sun 3Play TL M,» Sarriguren, 2013.



## 11.- Índice de figuras

Figura 1: A.2 Graphical representation of magnitude test using ramp function for PUT [3].....	17
Figura 2: Graphical representation of time test using step function for PUT [3]	18
Figura 3: Circuito simulado para análisis de potencia (PSIM) .....	25
Figura 4: Resultados de la simulación de análisis de potencia (PSIM) .....	26
Figura 5: Inversor monofásico y topología 1 (PSIM).....	29
Figura 6: Inversor trifásico y topología 2 (PSIM) .....	30
Figura 7: Inversor 3Play TL M [16] .....	31
Figura 8: Esquema inversor 3Play TL M [16] .....	32
Figura 9: Disposición de elementos para los tests (PSIM).....	32
Figura 10: Localización salida OUT_19 y entrada IN_19 [9] .....	34
Figura 11: Resultado de la simulación sin generación de neutro II (PSIM) .....	36
Figura 12: Tensión referida a tierra a la salida del inversor (PSIM).....	37
Figura 13: Tensión obtenida a la salida referida al neutro generado (PSIM).....	38
Figura 14: Tensión en los semibuses, diferencia de tensión entre ambos y corriente en punto medio del bus (PSIM) .....	39
Figura 15: Tensión e intensidad de la carga (PSIM).....	40
Figura 16: Tensión en los semibuses, diferencia de tensión entre ambos e intensidad en punto medio de bus (PSIM).....	41
Figura 17: Formas de onda en las fases de la carga Vac_1, Vac_2 y Vac_3 y en la captación de Vac_1 (Yokogawa).....	43
Figura 18: Esquema del generador de rampas (PSIM) .....	45
Figura 19: Esquema del generador de escalón (PSIM) .....	46
Figura 20: Test Rampa en fase R.....	46

Figura 21: Test escalón en la fase R (PSIM) .....	47
Figura 22: Simulación rampa en fase R con tensión de punto medio de bus (PSIM) .....	47
Figura 23: Simulación escalón en fase R con tensión de punto medio de bus (PSIM) .....	48
Figura 24: Jerarquía firmware.....	49
Figura 25: Máquina de estados I (HFSM Editor) .....	53
Figura 26: Máquina de estados II (HFSM Editor) .....	55
Figura 27: Máquina de estados III (HFSM Editor) .....	56
Figura 28 Máquina de estados IV (HFSM Editor).....	57
Figura 29: Máquina de estados V (HFSM Editor).....	58
Figura 30: Máquina de estados VI (HFSM Editor).....	59
Figura 31: Inicialización (HFSM Editor) .....	60
Figura 32: Preproceso (HFSM Editor) .....	60
Figura 33: Implementación de los límites (Code Composer Studio y [2]) .....	61
Figura 34: Tensión de fuente (Vpv1), bus (Inverter.Vb) y semibuses (Inverter.V1 e Inverter.V2) (Arranque) (PSIM) .....	62
Figura 35: Tensión AC en cada una de las fases y proceso de cierre de relés (PSIM) .....	63
Figura 36: Corrientes en punto medio de bus (Inverter.Inp) y en las bobinas del filtro de salida (PSIM) .....	64
Figura 37: Tensión de fuente (Vpv1), bus (Inverter.Vb) y semibuses (Inverter.V1 e Inverter.V2) (test) (PSIM) .....	65
Figura 38: Tensiones generadas y estado de los relés (test) (PSIM) .....	65
Figura 39: Corriente en punto medio de bus y en las bobinas del filtro de salida (PSIM) .....	66
Figura 40: Resultado de un test escalón generando a 65Vrms (Yokogawa) .....	70

Figura 41: Generación nominal en estado de espera (Yokogawa) ..... 71

Figura 42: Error en la generación constante a distintos niveles de tensión I..... 72

Figura 43: Error en la generación constante a distintos niveles de tensión II.... 73

Figura 44: Seguimiento de la referencia de tensión (Freemaster) ..... 74

Figura 45: Seguimiento de referencia de tensión en test L\_L\_L ..... 75

Figura 46: Seguimiento de la referencia de frecuencia (Freemaster) ..... 75

Figura 47: Seguimiento de referencia de tensión en test UF1 ..... 76

Figura 48: Desfase fases 1 y 2 (Yokogawa) ..... 77

Figura 49: Lanzamiento test escalón H (I) (Yokogawa)..... 78

Figura 50: Lanzamiento test escalón H (II) (Yokogawa)..... 79

Figura 51: Lanzamiento test escalón OF2 (I) (Yokogawa)..... 80

Figura 52: Lanzamiento test escalón OF2 (II) (Yokogawa)..... 80

Figura 53: Datos de disparo ensayo escalón LOW\_LOW\_LOW (Freemaster) ..... 82

Figura 54: Datos de disparo ensayo escalón LOW\_LOW\_LOW (Osc. Yokogawa) 82

Figura 55: Datos de disparo ensayo escalón UF1 (Osc. Yokogawa) ..... 83

Figura 56: Datos de disparo ensayo escalón UF1 (Osc. Yokogawa) ..... 83

Figura 57: Aplicación Freemaster. Test Ramp Gen..... 106

Figura 58: Aplicación Freemaster. TestParams ..... 109

Figura 59: Modificación de parámetro base [3] ..... 111

Figura 60: Aplicación Freemaster. Nominal Values..... 112

Figura 61: Aplicación Freemaster. Base Values ..... 113

Figura 62: Aplicación Freemaster. Trip Values ..... 114

Figura 63: Aplicación Freemaster. Ult Values..... 115

Figura 64: Aplicación Freemaster. Ramp Standard Values..... 116



## 12.- Índice de tablas

Tabla 1: Test de rampa según límites UL1741 .....	19
Tabla 2: Test de escalón según límites UL1741 .....	21
Tabla 3: Test de rampa según límites IEEE1547 .....	22
Tabla 4: Test de escalón según límites IEEE1547 .....	23
Tabla 5: Coste topología 1 .....	29
Tabla 6: Coste topología 2 .....	30
Tabla 7 Tensión obtenida en las fases .....	36
Tabla 8: Tensión obtenida en las fases .....	37
Tabla 9: Tensión obtenida en las fases .....	38
Tabla 10: Comparación de las tensiones obtenidas con los valores previos .....	40
Tabla 11: Comparación de las corrientes con el estudio de necesidades .....	40
Tabla 12: Error en la generación a diferentes niveles de tensión .....	72
Tabla 13: Test Rampa seguimiento referencia L_L_L .....	74
Tabla 14: Resultados seguimiento referencia test UF1 .....	76
Tabla 15: Desviación en los datos del ensayo escalón LOW_LOW_LOW .....	82
Tabla 16: Desviación en los datos del ensayo escalón UF1 .....	83
Tabla 17: Ensayo en escalón LOW_LOW_LOW .....	84
Tabla 18: Desviación en los datos del ensayo escalón LOW_LOW_LOW .....	84
Tabla 19: Ensayo escalón HIGH_HIGH .....	85
Tabla 20: Desviación en los datos del ensayo escalón HIGH_HIGH .....	85
Tabla 21: Ensayo escalón UF1 .....	85
Tabla 22: Desviación en los datos del ensayo escalón UF1 .....	86
Tabla 23: Ensayo escalón OF2 .....	86
Tabla 24: Desviación de los datos en el ensayo escalón OF2 .....	86

---

Tabla 25: Ensayo en rampa LOW_LOW_LOW .....	87
Tabla 26: Desviación de los datos en el ensayo rampa LOW_LOW_LOW.....	87
Tabla 27: Ensayo en rampa HIGH_HIGH .....	88
Tabla 28: Desviación de los datos en el ensayo rampa HIGH_HIGH .....	88
Tabla 29: Ensayo en rampa UF1 .....	88
Tabla 30: Desviación de los datos en el ensayo rampa UF1.....	89
Tabla 31: Ensayo en rampa OF2 .....	89
Tabla 32: Desviación de los datos en el ensayo rampa OF2.....	89



## 13.- Anexos

### 13.1.- Anexo 1. Calibración del equipo fuente y el equipo a ensayar

El procedimiento seguido para la calibración del equipo fue:

1. Conexión de equipo fuente a fuente de continua Regatron a tensión de entrada de 300Vdc.
2. Conexión de equipo a ensayar a fuente nocturna AQD0200.
3. Conexión de equipo fuente con equipo a ensayar.
4. Generación de alterna elevando tensión de bus hasta 700Vdc, medida con polímetro y cálculo de los nuevos fondos de escala. Actualización de los mismos y comprobación de nuevas referencias.
5. Generación de alterna a 277Vrms en tensión fuente y medida con polímetro de tensión en fases. Cálculo de nuevos fondos de escala y actualización de referencias del equipo.
6. Medida de alterna en equipo a ensayar y cálculo de nuevos fondos de escala. Actualización y comprobación de las referencias.

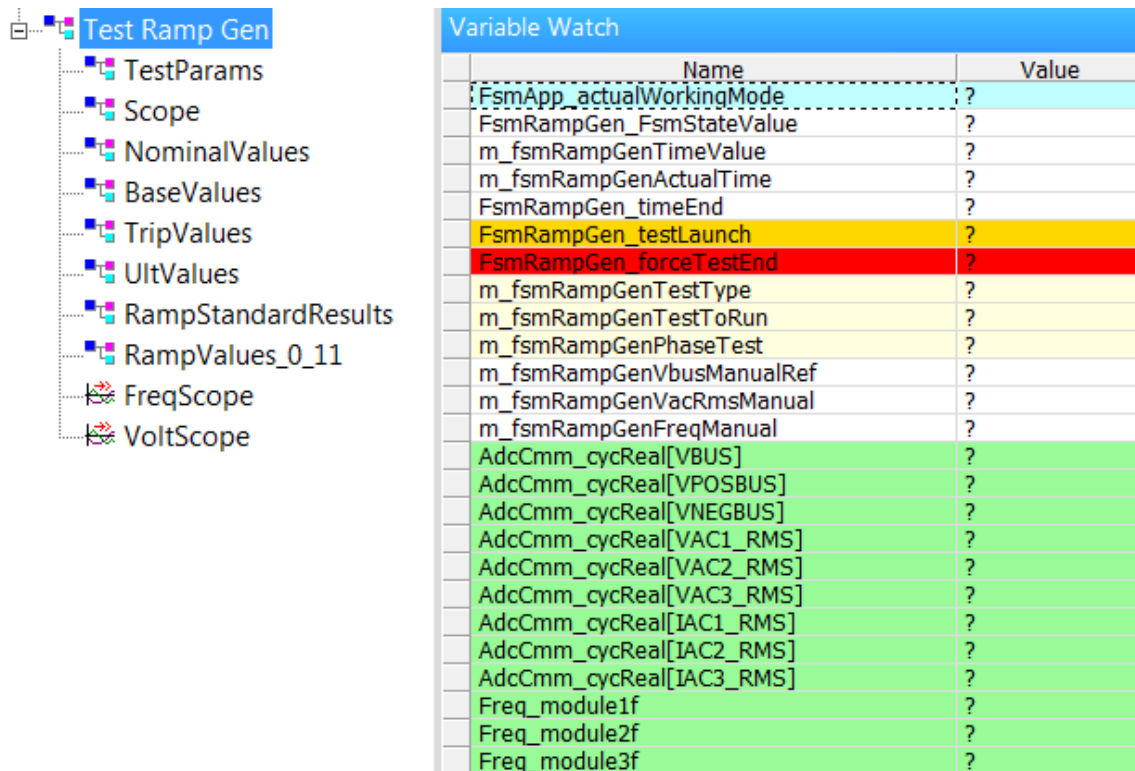
El material empleado fue:

- Fuente de tensión: Regatron TopCon Quadro. Proporciona hasta 500V de tensión continua y permite la limitación de corriente.
- Multímetro: FLUKE 177. Nº serie: 98510224. IDMU10 (codificación interna Ingeteam). Calibrado el 08/10/2015.
- Osciloscopio: YOKOGAWA 0110/C10/P. Nº de serie 91M925520. IDOS18 (codificación interna Ingeteam) Calibrado el 15/04/2015.
- Sonda diferencial de tensión: Picoscope TA042 y TA044. IDSDT44, IDSDT46, IDSDT47 e IDSDT48. 23/12/2015.
- Fuente nocturna: AQD0200. Documentación interna Ingeteam.

## 13.2.- Anexo 2. Guía FreeMaster para el Generador de Rampas

### 13.2.1.- Test RampGen

En la primera pestaña Test Ramp Gen se encuentran las variables de control más próximas al operador y que son suficientes para ejecutar la aplicación mediante los ensayos cargados por defecto:



The screenshot shows the 'Test Ramp Gen' application interface. On the left, there is a tree view with the following items: Test Ramp Gen, TestParams, Scope, NominalValues, BaseValues, TripValues, UltValues, RampStandardResults, RampValues\_0\_11, FreqScope, and VoltScope. On the right, there is a 'Variable Watch' table with two columns: 'Name' and 'Value'. The table contains the following entries:

Name	Value
FsmApp_actualWorkingMode	?
FsmRampGen_FsmStateValue	?
m_fsmRampGenTimeValue	?
m_fsmRampGenActualTime	?
FsmRampGen_timeEnd	?
FsmRampGen_testLaunch	?
FsmRampGen_forceTestEnd	?
m_fsmRampGenTestType	?
m_fsmRampGenTestToRun	?
m_fsmRampGenPhaseTest	?
m_fsmRampGenVbusManualRef	?
m_fsmRampGenVacRmsManual	?
m_fsmRampGenFreqManual	?
AdcCmm_cycReal[VBUS]	?
AdcCmm_cycReal[VPOSBUS]	?
AdcCmm_cycReal[VNEGBUS]	?
AdcCmm_cycReal[VAC1_RMS]	?
AdcCmm_cycReal[VAC2_RMS]	?
AdcCmm_cycReal[VAC3_RMS]	?
AdcCmm_cycReal[IAC1_RMS]	?
AdcCmm_cycReal[IAC2_RMS]	?
AdcCmm_cycReal[IAC3_RMS]	?
Freq_module1f	?
Freq_module2f	?
Freq_module3f	?

Figura 57: Aplicación Freemaster. Test Ramp Gen

#### FsmApp\_actualWorkingMode: modo de trabajo actual

- FSMAPP\_WM\_NONE = 0
- FSMAPP\_WM\_SHORT = 1
- FSMAPP\_WM\_REFERENCE = 2
- FSMAPP\_WM\_MPPT = 3
- FSMAPP\_WM\_TESTGBL = 4
- FSMAPP\_WM\_TESTVACFAC = 5
- FSMAPP\_WM\_NOPANNEL = 6
- FSMAPP\_WM\_RAMPGEN = 7

**FsmRampGen\_FsmStateValue:** (sólo lectura) índice de la máquina de estados. Se emplea para comprobar el avance a través de la máquina.

**m\_fsmRampGenActualTime:** (lectura) tiempo del estado actual de la máquina de estados (ms).

**FsmRampGen\_timeEnd:** booleano que en 1 señala que se ha alcanzado el fin de la temporización para el estado actual.

**FsmRampGen\_testLaunch:** booleano que controla el lanzamiento del test desde el estado de generación nominal. En 1 lanza la prueba. Nota: debe estar seleccionada una configuración de test válida para que se haga efectivo.

**FsmRampGen\_forceTestEnd:** booleano que controla la finalización de la máquina de estados. Si desde el estado de generación nominal es puesto a 1 el equipo procederá a lanzar la secuencia de cese de generación.

**m\_fsmRampGenTestType:** tipo de test, rampa o escalón, a seleccionar.

- FSMRAMPGEN\_NONE\_TEST = 0,
- FSMRAMPGEN\_RAMP\_TEST = 1,
- FSMRAMPGEN\_STEP\_TEST = 2

**m\_fsmRampGenTestToRun:** tipo de test, tensión o frecuencia, a seleccionar.

- FSMRAMPGEN\_TEST\_NONE = 0,
- FSMRAMPGEN\_LOW\_LOW\_LOW = 1,
- FSMRAMPGEN\_LOW\_LOW = 2,
- FSMRAMPGEN\_LOW = 3,
- FSMRAMPGEN\_HIGH = 4,
- FSMRAMPGEN\_HIGH\_HIGH = 5,
- FSMRAMPGEN\_UF1 = 6,
- FSMRAMPGEN\_UF2 = 7,
- FSMRAMPGEN\_OF1 = 8,
- FSMRAMPGEN\_OF2 = 9,

**m\_fsmRampGenPhaseTest:** fase en la que se realizará el test.

- FSMRAMPGEN\_PHASE\_NONE = 0,
- FSMRAMPGEN\_PHASE\_R = 1,
- FSMRAMPGEN\_PHASE\_S = 2,
- FSMRAMPGEN\_PHASE\_T = 3,
- FSMRAMPGEN\_PHASE\_RST = 4,

**m\_fsmRampGenVbusManualRef:** referencia de tensión de bus Vdc manual (V).

Nota: caso de introducirse una referencia no válida (por debajo del valor necesario para la generación de la tensión Vac), esta no será tomada en cuenta ya que provocaría un error y posterior desconexión por tensión de bus insuficiente.

**m\_fsmRampGenVacRmsManual:** referencia manual para la tensión alterna (Vrms). Nota: esta tensión actualiza en escalón hacia la tensión de consigna introducida, debe de tenerse en cuenta que la tensión de bus sea la suficiente como para no provocar un error en la generación y posterior desconexión de la máquina.

**m\_fsmRampGenFreqManual:** referencia manual para la frecuencia (Hz).

**AdcCmm\_cycReal[VBUS]:** captación de la tensión de bus Vdc (V).

**AdcCmm\_cycReal[VPOSBUS]:** captación de tensión del semibus positivo (V).

**AdcCmm\_cycReal[VNEGBUS]:** captación de tensión del semibus negativo (V).

**AdcCmm\_cycReal[VAC1RMS]:** captación de tensión alterna en la fase 1 (Vrms).

**AdcCmm\_cycReal[VAC2RMS]:** captación de tensión alterna en la fase 2 (Vrms).

**AdcCmm\_cycReal[VAC3RMS]:** captación de tensión alterna en la fase 3 (Vrms).

**AdcCmm\_cycReal[IAC1RMS]:** captación de corriente en la fase 1 (Arms).

**AdcCmm\_cycReal[IAC2RMS]:** captación de corriente en la fase 2 (Arms).

**AdcCmm\_cycReal[IAC3RMS]:** captación de corriente en la fase 3 (Arms).

**Freq\_module1f:** frecuencia en la fase 1 (en Hz).

**Freq\_module2f:** frecuencia en la fase 2 (en Hz).

**Freq\_module3f:** frecuencia en la fase 3 (en Hz).

### 13.2.2.- TestParams

En la primera sub-pestaña TestParams se encuentran los distintos parámetros de configuración de los tests. En un comienzo están inicializados en los valores por defecto pero pueden ser modificados para la realización de ensayos diferentes.

Name	Value	Unit
m_fsmRampGenTestParams.test0	?	DEC
m_fsmRampGenTestParams.factorBase0	?	unit
m_fsmRampGenTestParams.factorTrip0	?	unit
m_fsmRampGenTestParams.factorTripTime0	?	DEC
m_fsmRampGenTestParams.test1	?	DEC
m_fsmRampGenTestParams.factorBase1	?	unit
m_fsmRampGenTestParams.factorTrip1	?	unit
m_fsmRampGenTestParams.factorTripTime1	?	DEC
m_fsmRampGenTestParams.test2	?	DEC
m_fsmRampGenTestParams.factorBase2	?	unit
m_fsmRampGenTestParams.factorTrip2	?	unit
m_fsmRampGenTestParams.factorTripTime2	?	DEC
m_fsmRampGenTestParams.test3	?	DEC
m_fsmRampGenTestParams.factorBase3	?	unit
m_fsmRampGenTestParams.factorTrip3	?	unit
m_fsmRampGenTestParams.factorTripTime3	?	DEC
m_fsmRampGenTestParams.test4	?	DEC
m_fsmRampGenTestParams.factorBase4	?	unit
m_fsmRampGenTestParams.factorTrip4	?	unit
m_fsmRampGenTestParams.factorTripTime4	?	DEC
m_fsmRampGenTestParams.test5	?	DEC
m_fsmRampGenTestParams.factorBase5	?	unit
m_fsmRampGenTestParams.factorTrip5	?	unit
m_fsmRampGenTestParams.factorTripTime5	?	DEC
m_fsmRampGenTestParams.test6	?	DEC
m_fsmRampGenTestParams.factorBase6	?	unit
m_fsmRampGenTestParams.factorTrip6	?	unit
m_fsmRampGenTestParams.factorTripTime6	?	DEC
m_fsmRampGenTestParams.test7	?	DEC
m_fsmRampGenTestParams.factorBase7	?	unit
m_fsmRampGenTestParams.factorTrip7	?	unit
m_fsmRampGenTestParams.factorTripTime7	?	DEC
m_fsmRampGenTestParams.test8	?	DEC
m_fsmRampGenTestParams.factorBase8	?	unit
m_fsmRampGenTestParams.factorTrip8	?	unit
m_fsmRampGenTestParams.factorTripTime8	?	DEC
m_fsmRampGenTestParams.test9	?	DEC
m_fsmRampGenTestParams.factorBase9	?	unit
m_fsmRampGenTestParams.factorTrip9	?	unit
m_fsmRampGenTestParams.factorTripTime9	?	DEC
m_fsmRampGenVacBase	?	unit
m_fsmRampGenVacTrip	?	unit
m_fsmRampGenVacUlt	?	unit
m_fsmRampGenFacBase	?	unit
m_fsmRampGenFacTrip	?	unit
m_fsmRampGenFacUlt	?	unit
m_fsmRampGenUltTime	?	unit
m_fsmRampGenRampHeight	?	unit
m_fsmRampGenRampStep	?	DEC
m_fsmRampGenTestAccuracy	?	unit
m_fsmRampGenRampVbGap	?	unit
m_fsmRampGenVacTestSlope	?	unit
m_fsmRampGenFreqTestSlope	?	unit

Figura 58: Aplicación Freemaster. TestParams

Las distintas variables se encuentran ordenadas según están definidos los ensayos en el estándar. En primer lugar tensiones, m\_fsmRampGenTestParams.test0 con la configuración para el ensayo FSMRAMPGEN\_LOW\_LOW\_LOW y hasta m\_fsmRampGenTestParams.test5 con la de FSMRAMPGEN\_HIGH\_HIGH. Para los tests de frecuencia estaría m\_fsmRampGenTestParams.test6 que corresponde al ensayo FSMRAMPGEN\_UF1, hasta m\_fsmRampGenTestParams.test9 y FSMRAMPGEN\_OF2.

Los valores contenidos en los apartados siguientes corresponderían con:

- **m\_fsmRampGenTestParams.test0** indica el test al que corresponde el parámetro.

- **m\_fsmRampGenTestParams.factorBase0**: coeficiente, entre 0.0 y 0.1 en caso de tensión y 0.00 y 0.01 en caso de frecuencias, usado para calcular el punto base desde el que parte la rampa o escalón. (para tensiones debe estar dentro del 10% de la tensión de disparo y para frecuencias dentro del 1%).

- **m\_fsmRampGenTestParams.factorTrip0**: coeficiente empleado en el cálculo de los valores límites de tensión o frecuencia de disparo. Coincide con los límites o rangos fijados en la normativa.

- **m\_fsmRampGenTestParams.factorTripTime0**: variable que contiene el tiempo límite para el disparo fijado en la normativa.

Para verificar que los cálculos realizados y conocer los límites de generación de la prueba también se han incluido las siguientes variables:

- **m\_fsmRampGenVacBase**: valor para la generación de la tensión base

- **m\_fsmRampGenVacTrip**: valor para la tensión de disparo calculada.

- **m\_fsmRampGenVacUlt**: valor para la tensión última que se alcanzará.

- **m\_fsmRampGenFacBase**: valor para la generación de la frecuencia base.

- **m\_fsmRampGenFacTrip**: valor para la frecuencia de disparo calculada

- **m\_fsmRampGenFacUlt**: valor para la frecuencia última durante el ensayo.

- **m\_fsmRampGenUltTime**: tiempo límite que durará el ensayo, comprende la suma de los distintos escalones del test de rampas o del escalón de dicho test.

- **m\_fsmRampGenRampHeight**: valor que debe incrementarse en cada uno de los pasos durante la generación de la función rampa. Se calcula con el valor nominal de tensión o frecuencia por un coeficiente de 0.5 y otro coeficiente de la precisión declarada por el fabricante.

- **m\_fsmRampGenRampStep**: valor del paso para la generación de la rampa. Se calcula como el doble del tiempo de disparo fijado por la normativa para el ensayo más el tiempo de detección declarado por el fabricante.

- **m\_fsmRampGenTestAccuracy**: variable que contiene el valor de la precisión declarada por el fabricante.

- **m\_fsmRampGenRampVbGap**: variable que permite establecer un margen o gap entre la tensión de disparo y el escalón de la rampa a efectuar. Puesto que el cálculo del parámetro base se realiza a partir del parámetro de disparo, se ha creado este valor para que modifique el valor del parámetro base teórico llevándolo a un punto desde el que parta la rampa y quede el valor de disparo entre 2 de los escalones según lo definido en la imagen.

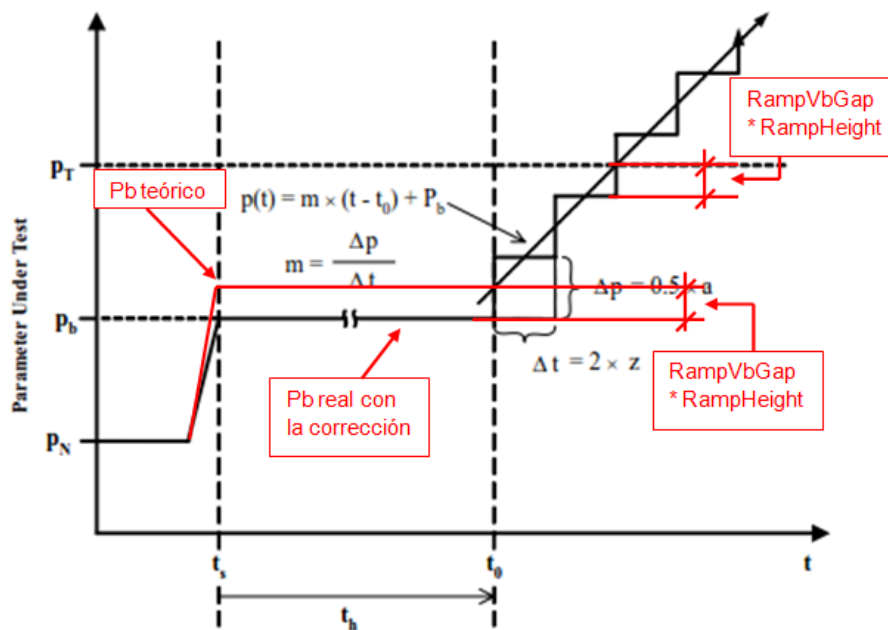


Figura 59: Modificación de parámetro base [3]

La anterior imagen para la generación de la rampa se presenta resaltado en rojo el valor del *gap*, en la imagen correspondería con el valor por defecto de 0.5 veces la altura del escalón (height), que lo situaría en el punto intermedio.

- **m\_fsmRampGeVacTestSlope**: variable que almacena el valor de la pendiente que se aplicará para la rampa correspondiente de tensión.

- **m\_fsmRampGenFreqTestSlope**: variable que almacena el valor de la pendiente que se aplicará para la rampa correspondiente de frecuencia.

### 13.2.3.- NominalValues

En la segunda sub-pestaña NominalValues se encuentran las variables que almacenan los datos de las captaciones a la salida del estado nominal de generación.

Name	Value	Unit	
m_fsmRampGenTestNomValues.testType	?	DEC	1000
m_fsmRampGenTestNomValues.testToRun	?	DEC	1000
m_fsmRampGenTestNomValues.phaseTest	?	DEC	1000
m_fsmRampGenTestNomValues.valVac1	?	unit	1000
m_fsmRampGenTestNomValues.valVac2	?	unit	1000
m_fsmRampGenTestNomValues.valVac3	?	unit	1000
m_fsmRampGenTestNomValues.refVac1	?	unit	1000
m_fsmRampGenTestNomValues.refVac2	?	unit	1000
m_fsmRampGenTestNomValues.refVac3	?	unit	1000
m_fsmRampGenTestNomValues.valFreq1	?	unit	1000
m_fsmRampGenTestNomValues.valFreq2	?	unit	1000
m_fsmRampGenTestNomValues.valFreq3	?	unit	1000
m_fsmRampGenTestNomValues.refFreq	?	unit	1000
m_fsmRampGenTestNomValues.tripLimit	?	DEC	1000
m_fsmRampGenTestNomValues.tripTime	?	DEC	1000
m_fsmRampGenTestNomCounter	?	DEC	1000

Figura 60: Aplicación Freemaster. Nominal Values

**m\_fsmRampGenTestNomValues.testType:** contiene tipo de test efectuado.

**m\_fsmRampGenTestNomValues.testToRun:** contiene el test efectuado.

**m\_fsmRampGenTestNomValues.phaseTest:** contiene la fase destino del test.

**m\_fsmRampGenTestNomValues.valVac1:** tensión alterna en la fase 1 (Vrms).

**m\_fsmRampGenTestNomValues.valVac2:** tensión alterna en la fase 2 (Vrms).

**m\_fsmRampGenTestNomValues.valVac3:** tensión alterna en la fase 3 (Vrms).

**m\_fsmRampGenTestNomValues.refVac1:** referencia de tensión fase 1 (Vrms).

**m\_fsmRampGenTestNomValues.refVac2:** referencia de tensión fase 2 (Vrms).

**m\_fsmRampGenTestNomValues.refVac3:** referencia de tensión fase 3 (Vrms).

**m\_fsmRampGenTestNomValues.valFreq1:** frecuencia en la fase 1 (Hz).

**m\_fsmRampGenTestNomValues.valFreq2:** frecuencia en la fase 2 (Hz).

**m\_fsmRampGenTestNomValues.valFreq3:** frecuencia en la fase 3 (Hz).

**m\_fsmRampGenTestNomValues.refFreq:** referencia para la frecuencia (Hz).

**m\_fsmRampGenTestNomValues.TripTime:** medida del tiempo de disparo.

**m\_fsmRampGenTestNomCounter:** contador de paso por estado nominal, sirve de referencia para comprobar la actualización de los datos.



### 13.2.4.- BaseValues

En la tercera sub-pestaña BaseValues se encuentran las variables que almacenan los datos de las captaciones a la salida del estado base.

Name	Value	Unit
m_fsmRampGenTestBaseValues.testType	?	DEC
m_fsmRampGenTestBaseValues.testToRun	?	DEC
m_fsmRampGenTestBaseValues.phaseTest	?	DEC
m_fsmRampGenTestBaseValues.valVac1	?	unit
m_fsmRampGenTestBaseValues.valVac2	?	unit
m_fsmRampGenTestBaseValues.valVac3	?	unit
m_fsmRampGenTestBaseValues.refVac1	?	unit
m_fsmRampGenTestBaseValues.refVac2	?	unit
m_fsmRampGenTestBaseValues.refVac3	?	unit
m_fsmRampGenTestBaseValues.valFreq1	?	unit
m_fsmRampGenTestBaseValues.valFreq2	?	unit
m_fsmRampGenTestBaseValues.valFreq3	?	unit
m_fsmRampGenTestBaseValues.refFreq	?	unit
m_fsmRampGenTestBaseValues.TripLimit	?	unit
m_fsmRampGenTestBaseValues.TripTime	?	DEC
m_fsmRampGenTestBaseCounter	?	DEC

Figura 61: Aplicación Freemaster. Base Values

**m\_fsmRampGenTestBaseValues.testType:** contiene tipo de test efectuado.

**m\_fsmRampGenTestBaseValues.testToRun:** contiene el test efectuado.

**m\_fsmRampGenTestBaseValues.phaseTest:** fase destino del test.

**m\_fsmRampGenTestBaseValues.valVac1:** tensión alterna en la fase 1 (Vrms).

**m\_fsmRampGenTestBaseValues.valVac2:** tensión alterna en la fase 2 (Vrms).

**m\_fsmRampGenTestBaseValues.valVac3:** tensión alterna en la fase 3 (Vrms).

**m\_fsmRampGenTestBaseValues.refVac1:** referencia de tensión fase 1 (Vrms).

**m\_fsmRampGenTestBaseValues.refVac2:** referencia de tensión fase 2 (Vrms).

**m\_fsmRampGenTestBaseValues.refVac3:** referencia de tensión fase 3 (Vrms).

**m\_fsmRampGenTestBaseValues.valFreq1:** frecuencia en la fase 1 (Hz).

**m\_fsmRampGenTestBaseValues.valFreq2:** frecuencia en la fase 2 (Hz).

**m\_fsmRampGenTestBaseValues.valFreq3:** frecuencia en la fase 3 (Hz).

**m\_fsmRampGenTestBaseValues.refFreq:** referencia de la frecuencia (Hz).

**m\_fsmRampGenTestBaseValues.TripTime:** medida del tiempo de disparo (ms).

**m\_fsmRampGenTestBaseCounter:** contador de paso por estado base, sirve de referencia para comprobar la actualización de los datos.

### 13.2.5.- TripValues

En la cuarta sub-pestaña TripValues se encuentran las variables que almacenan los datos captados en el momento del disparo del test.

Variable Watch	
Name	Value
m_fsmRampGenTestTripValues.testType	?
m_fsmRampGenTestTripValues.testToRun	?
m_fsmRampGenTestTripValues.phaseTest	?
m_fsmRampGenTestTripValues.valVac1	?
m_fsmRampGenTestTripValues.valVac2	?
m_fsmRampGenTestTripValues.valVac3	?
m_fsmRampGenTestTripValues.refVac1	?
m_fsmRampGenTestTripValues.refVac2	?
m_fsmRampGenTestTripValues.refVac3	?
m_fsmRampGenTestTripValues.valFreq1	?
m_fsmRampGenTestTripValues.valFreq2	?
m_fsmRampGenTestTripValues.valFreq3	?
m_fsmRampGenTestTripValues.refFreq	?
m_fsmRampGenTestTripValues.TripLimit	?
m_fsmRampGenTestTripValues.TripTime	?
m_fsmRampGenTestTripCounter	?
m_fsmRampGenTestResult	?
m_fsmRampGenRampTripTime	?
m_fsmRampGenTripValueAux	?

Figura 62: Aplicación Freemaster. Trip Values

**m\_fsmRampGenTestTripValues.test:** contiene el test efectuado

**m\_fsmRampGenTestTripValues.valVac1:** tensión alterna en la fase 1 (Vrms)

**m\_fsmRampGenTestTripValues.valVac2:** tensión alterna en la fase 2 (Vrms)

**m\_fsmRampGenTestTripValues.valVac3:** tensión alterna en la fase 3 (Vrms)

**m\_fsmRampGenTestTripValues.refVac1:** referencia de tensión fase 1 (Vrms)

**m\_fsmRampGenTestTripValues.refVac2:** referencia de tensión fase 2 (Vrms)

**m\_fsmRampGenTestTripValues.refVac3:** referencia de tensión fase 3 (Vrms)

**m\_fsmRampGenTestTripValues.valFreq1:** frecuencia en la fase 1 (Hz)

**m\_fsmRampGenTestTripValues.valFreq2:** frecuencia en la fase 2 (Hz)

**m\_fsmRampGenTestTripValues.valFreq3:** frecuencia en la fase 3 (Hz)

**m\_fsmRampGenTestTripValues.refFreq:** referencia de la frecuencia (Hz)

**m\_fsmRampGenTestTripValues.TripTime:** medida del tiempo de disparo

**m\_fsmRampGenTestTripCounter:** contador de tomas de datos en el punto de disparo, sirve de referencia para comprobar la actualización de los datos.

**m\_fsmRampGenTestResult:** indica en función de los valores de disparo medidos si el test es válido al estar los parámetros medidos dentro de los límites especificados por la norma.

**m\_fsmRampGenRampTripTime:** variable que almacena el valor del tiempo desde se inicia la rampa hasta que la tensión cruza el límite de disparo.

**m\_fsmRampGenTripValueAux:** muestra con mayor resolución el valor de la tensión o frecuencia límite para el cual debe de disparar el test en ensayos de rampa o tiempos en ensayos escalón.

### 13.2.6.- UltValues

En la siguiente sub-pestaña UltValues están las variables que almacenan los datos captados a la salida del estado último de generación. Esta información es necesaria para el cálculo de los parámetros de disparo requeridos por la norma.

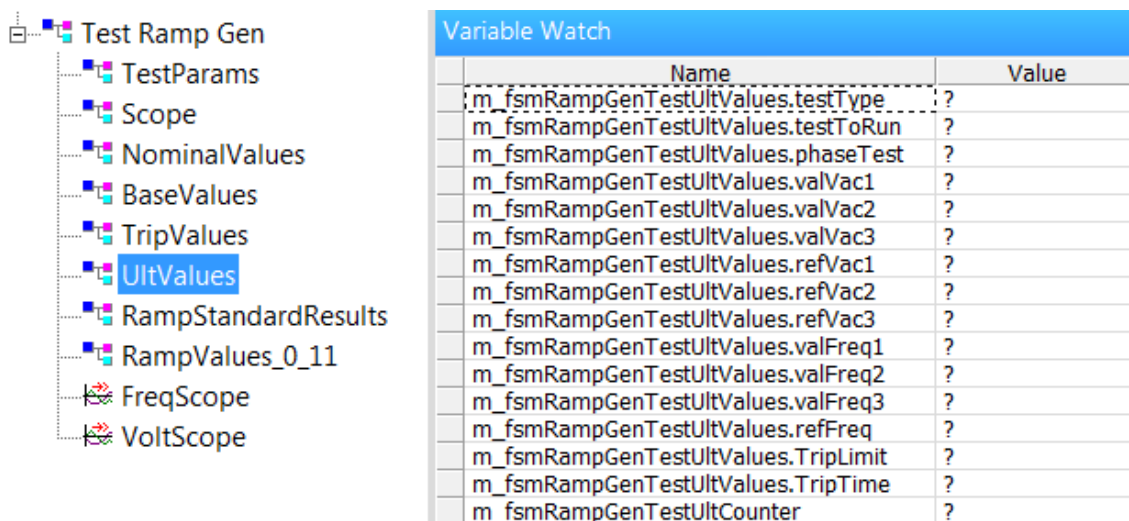


Figura 63: Aplicación Freemaster. Ult Values

**m\_fsmRampGenTestUltValues.testType:** contiene tipo de test efectuado.

**m\_fsmRampGenTestUltValues.testToRun:** contiene el test efectuado.

**m\_fsmRampGenTestUltValues.phaseTest:** fase sobre la que se efectúa el test.

**m\_fsmRampGenTestUltValues.valVac1:** tensión alterna en la fase 1 (Vrms).

**m\_fsmRampGenTestUltValues.valVac2:** tensión alterna en la fase 2 (Vrms).

**m\_fsmRampGenTestUltValues.valVac3:** tensión alterna en la fase 3 (Vrms).

**m\_fsmRampGenTestUltValues.refVac1:** referencia de tensión fase 1 (Vrms).

**m\_fsmRampGenTestUltValues.refVac2:** referencia de tensión fase 2 (Vrms).

**m\_fsmRampGenTestUltValues.refVac3:** referencia de tensión fase 3 (Vrms).

**m\_fsmRampGenTestUltValues.valFreq1:** frecuencia en la fase 1 (Hz).

**m\_fsmRampGenTestUltValues.valFreq2:** frecuencia en la fase 2 (Hz).

**m\_fsmRampGenTestUltValues.valFreq3:** frecuencia en la fase 3 (Hz).

**m\_fsmRampGenTestUltValues.refFreq:** referencia de la frecuencia (Hz).

**m\_fsmRampGenTestUltValues.TripTime:** medida del tiempo de disparo (ms).

**m\_fsmRampGenTestUltCounter:** contador de paso por estado ultimo, sirve de referencia para comprobar la actualización de los datos.

### 13.2.7.- RampStandardValues

En la última sub-pestaña RampStandardValues se encuentran las variables que contienen los resultados calculados según lo especificado en el estándar.

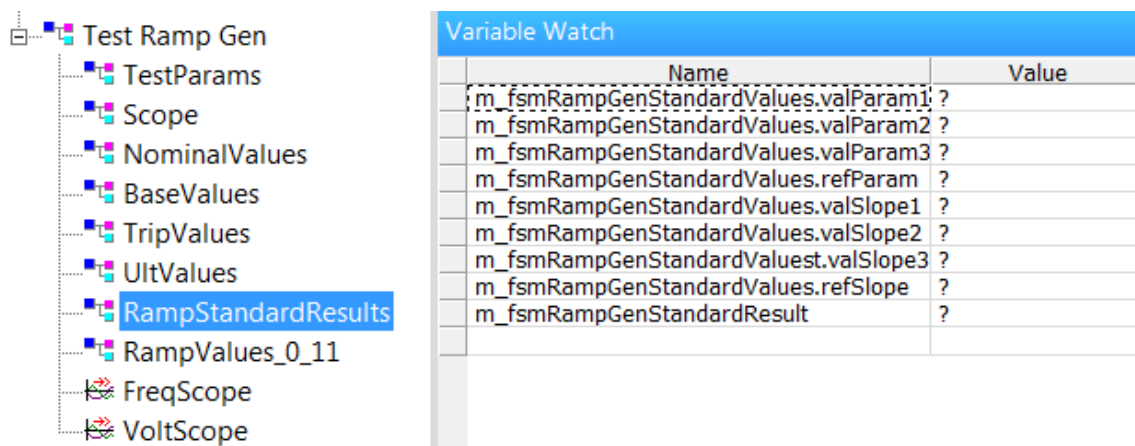


Figura 64: Aplicación Freemaster. Ramp Standard Values

**m\_fsmRampGenStandardValues.valParam1:** contiene el valor del parámetro calculado según lo especificado en el estándar. Corresponderá con la tensión o frecuencia de la fase 1 según el test efectuado.

**m\_fsmRampGenStandardValues.valParam2:** contiene el valor del parámetro calculado según lo especificado en el estándar. Corresponderá con la tensión o frecuencia de la fase 2 según el test efectuado.

**m\_fsmRampGenStandardValues.valParam3:** contiene el valor del parámetro calculado según lo especificado en el estándar. Corresponderá con la tensión o frecuencia de la fase 3 según el test efectuado.

**m\_fsmRampGenStandardValues.refParam:** contiene, como referencia para los valores calculados previamente, el valor del límite de disparo en tensión o frecuencia correspondiente al test efectuado.

**m\_fsmRampGenStandardValues.valSlope1:** contiene el valor de la pendiente calculada según lo especificado en el estándar. ( (valor del parámetro base – valor del parámetro ultimo) / tiempo entre ambos). Corresponderá con pendiente de la tensión o frecuencia de la fase 1 según el test efectuado.

**m\_fsmRampGenStandardValues.valSlope2:** contiene el valor de la pendiente calculada según lo especificado en el estándar. ( (valor del parámetro base – valor del parámetro ultimo) / tiempo entre ambos). Corresponderá con pendiente de la tensión o frecuencia de la fase 2 según el test efectuado.

**m\_fsmRampGenStandardValues.valSlope3:** contiene el valor de la pendiente calculada según lo especificado en el estándar. ((valor del parámetro base – valor del parámetro ultimo) / tiempo entre ambos). Corresponderá con pendiente de la tensión o frecuencia de la fase 3 según el test efectuado.

**m\_fsmRampGenStandardValues.refSlope:** contiene, como referencia para los valores calculados previamente, el valor de la pendiente de tensión o frecuencia correspondiente al test efectuado.