



UNIVERSIDAD
NACIONAL
DE COLOMBIA

Diseño e implementación de un prototipo de simulador solar con lámpara pulsada para la prueba de características eléctricas de paneles fotovoltaicos

David Nova Rodríguez

Universidad Nacional de Colombia
Facultad de ingeniería, Departamento de eléctrica y electrónica
Bogotá, Colombia
2023

Diseño e implementación de un prototipo de simulador solar con lámpara pulsada para la prueba de características eléctricas de paneles fotovoltaico

David Nova Rodríguez

Tesis o trabajo de investigación presentada(o) como requisito parcial para optar al título de:

Maestría en Ingeniería Eléctrica

Director:

Ph.D. Jesús M. Quintero Quintero

Línea de profundización:

Electrónica de potencia y metrología

Grupo de Investigación:

Matisse

Universidad Nacional de Colombia

Facultad de ingeniería, Departamento de eléctrica y electrónica

Bogotá, Colombia

2023

A mi familia por acompañarme durante cada etapa de mi vida.

Agradecimientos

Agradezco a la universidad nacional de Colombia por brindarme las herramientas para el aprendizaje y apropiación de este reto profesional. A mi director de trabajo de grado de maestría el profesor Jesús Quintero por su respaldo y recomendaciones en cada una de las fases de trabajo del proyecto. Adicionalmente agradezco a los laboratorios LIATER y LABE por el préstamo de los equipos y espacios para el desarrollo de las simulaciones y pruebas.

Resumen

Diseño e implementación de un prototipo de simulador solar con lámpara pulsada para la prueba de características eléctricas de paneles fotovoltaico

Para determinar los parámetros eléctricos de operación de los módulos fotovoltaicos es necesario desarrollar las pruebas en condiciones estándar ($1000\text{W}/\text{m}^2$, AM 1,5 y 25°C), una de estas condiciones es la irradiancia, la cual se puede obtener de forma natural o artificial, la primera se obtiene de forma directa ante la exposición de los módulos a la radiación solar natural, sin embargo, se tienen algunas limitaciones, dado que depende de las condiciones climáticas de la zona donde se ejecuten las pruebas. Para el desarrollo de una fuente de emisión artificial similar al sol, se consultó la norma IEC 60904-9, donde se especifican los criterios de clasificación de los simuladores en tres criterios, coincidencia espectral, no uniformidad e inestabilidad temporal; estos criterios tienen una estrecha relación con la amplitud uniforme de pulso y su tiempo de duración. Con base en lo anterior, se decide construir un emulador solar con lámpara de Xenón tipo flash, la cual permite obtener un espectro similar al de la luz solar natural, este espectro se garantiza manteniendo los niveles de tensión y densidad de corriente de operación de lámpara. Para cumplir este objetivo, se diseñó, simuló y fabricó un conversor AC – DC, por medio de un transformador de 12 pulsos, una etapa de rectificación, inductancias de acople. Estos equipos en conjunto permiten una tensión de salida entre $300 - 700\text{V}_{\text{DC}}$, un rizado menor al 3% y un contenido armónico inferior al 5%. Adicionalmente se diseñó e implementó una etapa de control por medio de transistores bipolares de puerta aislada (IGBT), con la capacidad de soportar la corriente, tensión y energía requerida para la emisión de un pulso que cumpla la clasificación de emulador solar en una de las categorías de la norma IEC 60904-9. Los diseños, simulación y pruebas desarrolladas en este trabajo permitirán evaluar la viabilidad y cumplimiento tanto en seguridad como en operación de emulador solar con lámpara de xenón tipo flash e identificar las limitaciones asociadas a la fuente de alimentación de dicho sistema.

Palabras clave: Emulador solar; xenón flash; Conversor AC-DC; IGBT; 24 pulsos.

Abstract

Design and implementation of a prototype solar simulator with pulsed lamp for testing electrical characteristics of photovoltaic panels.

To determine the electrical operating parameters of the photovoltaic modules it is necessary to develop tests under standard conditions (1000W/m², AM 1.5 and 25° C), one of these conditions is the irradiance, which can be obtained naturally or artificially, the first is obtained directly when the modules are exposed to natural solar radiation, however, there are some limitations, since it depends on the climatic conditions of the area where the tests are carried out. For the development of an artificial emission source similar to the sun, the IEC 60904-9 standard was consulted, where the classification criteria of the simulators are specified in three criteria, spectral coincidence, non-uniformity and temporal instability; these criteria are closely related to the uniform pulse amplitude and its duration time. Based on the above, it was decided to build a solar emulator with a flash type Xenon lamp, which allows to obtain a spectrum like that of natural sunlight, this spectrum is guaranteed by maintaining the voltage levels and lamp operation current density. To meet this objective, an AC - DC converter was designed, simulated and manufactured, by means of a 12-pulse transformer, a rectification stage and coupling inductances. Together, this equipment allows an output voltage between 300 - 700 VDC, a ripple of less than 3% and a harmonic content of less than 5%. Additionally, an isolated gate bipolar transistor (IGBT) control stage was designed and implemented, with the capacity to support the current, voltage and energy required for the emission of the pulse for the classification of the solar emulator in one of the categories of the IEC 60904-9 standard. The designs, simulation and tests developed will allow presenting the feasibility and compliance both in safety and operation of the solar emulator with flash type xenon lamp and identify the limitations associated with the backup source.

Keywords: Solar emulator; xenon flash; AC-DC converter; IGBT; 24 pulses.

Contenido

	Pág.
1. Introducción	17
2. Diseño	25
2.1 Características lámpara Xenón escogida	25
2.2 Banco de condensadores	29
2.3 Fuente de alimentación	30
2.3.1 Transformador de 12 fases	30
2.4 Rectificador	35
2.5 Transformadores de interfaz (ZSBT)	37
2.6 Control de disparo	40
2.6.1 Interruptor semiconductor IGBT	40
2.6.2 DRIVER de protección y control del IGBT	41
2.6.3 Fuente aislada de alimentación	44
2.6.4 Sistema de control de disparo	45
2.6.5 Bobina de disparo (Trigger coil)	45
2.6.6 Calibre de los conductores	46
3. Simulación	47
3.1.1 Nivel de tensión y desfase	50
3.1.2 Distribución de corriente puente rectificador	50
3.1.3 ZSBT	51
3.1.4 Nivel de tensión de DC	51
3.1.5 Contenido Armónico en corriente	52
3.1.6 Corto circuito	54
4. Pruebas de laboratorio	55
4.1 Medición de parámetros eléctrico de fuente de alimentación	58
4.2 Pruebas sistema de control	60
4.3 Pruebas kanthal ®	63
4.4 Prueba de corto circuito	65
4.5 Prueba lámpara de xenón	66
5. Resultados	67
5.1 Resultados fuente de alimentación	67
5.2 Resultados modelo equivalente	69
5.3 Resultados energía de destello	72
5.4 Resultados mediciones de irradiancia	73
6. Conclusiones y recomendaciones	74
6.1 Conclusiones	74
6.2 Recomendaciones para trabajos futuros	75
Bibliografía	77
Anexo: Mediciones del prototipo	79

Lista de figuras

Figura 1, Comparación del espectro de un simulador solar con LED izquierda y lámpara de xenón con el espectro de AM 1.5 G; tomado de [9].....	22
Figura 2. Efecto de la longitud de los conductores con la emisión de luz de la lámpara de xenón; tomado de:[12]	23
Figura 3. Relación de la presión de llenado de la lámpara de xenón y el factor k; tomado de [15].....	26
Figura 4. Relación de I-V de la lámpara de xenón flash para un k_0 de 45,55 [$\Omega \cdot A^{0.5}$]	27
Figura 5. Relación de I-V de la lámpara de xenón flash para un K_0 de 34,31 [$\Omega \cdot A^{0.5}$]	28
Figura 6. Curva de descarga de un banco de condensadores de 8 mF en 12 ms.	29
Figura 7. Etapas de la fuente de alimentación de 12 fases.	30
Figura 8. Desfase de las salidas de tensión del transformador en horquilla.	31
Figura 9. Diagrama de la suma fasorial para cada una de las salidas de secundarios del transformador de 12 fases.	31
Figura 10. Esquemático de conexión de las 7 bobinas por rama para las 12 fase de secundario.	33
Figura 11. Configuración tensión de entrada para obtener diferentes niveles de tensión de operación de la lámpara de xenón tipo flash.	34
Figura 12. Esquemático en Eagles® de la conexión de los puentes rectificadores con la entrada desde el transformador de 12 fases y salidas a los transformadores de interfaz ZSBT(a) Vista superior; (b) Vista inferior de la PCB.	37
Figura 13. Modelo de conexión de rectificadores ZSBT.	38
Figura 14. Esquema de disparo fuente DC e IGBT.	40
Figura 15. Esquema típico de aplicación de driver; tomado de la ficha técnica de infineon 1EDI30I12MF.....	42
Figura 16. Ejemplo de aplicación de driver; tomado de la ficha técnica infineon 1EDI30I12MF.....	42
Figura 17. Diagrama de bloques definido por el fabricante; tomado de la ficha técnica de Infineon1EDI30I12MF.	42
Figura 18. Comportamiento de la protección de operación del IGBT UVLO; Tomado de la ficha técnica de Infineon 1EDI30I12MF.....	44
Figura 19. Esquema de distribución PCB sistema de control y fuente aislada; desarrollado en la interfaz de Eagle de autodesk.	45
Figura 20. Esquema de conexión bobina de disparo PFT-1052V; desarrollado en la interfaz de Eagle de autodesk.....	46

Figura 21. Modelo en MATLAB de la fuente de alimentación para la lámpara de xenón flash.	47
Figura 22. Parámetros de entrada para la fuente de alimentación de 12 fases.....	48
Figura 23. Parámetros de configuración en el secundario en horquilla; Desarrollado en la interfaz de Simulink de Matlab.....	48
Figura 24. Parámetros de ajuste de un puente rectificador trifásico; Desarrollado en la interfaz de Simulink de Matlab.....	48
Figura 25. Parámetros de ajuste ZSBT; Desarrollado en la interfaz de Simulink de Matlab.	49
Figura 26. 12 fases de salida del transformador tipo horquilla con tensión pico de 400 V. 50	
Figura 27. Corriente de salida de los cuatro puentes rectificadores con una carga de 32Ω.	50
Figura 28. Tensión sobre las bobinas del ZSBT con carga de 32Ω.	51
Figura 29. Salida de 24 pulso con nivel de tensión de 400 Vdc en el punto de alimentación TAP 2 - 208 Vac.	52
Figura 30. Distorsión armónica en corriente del primario.	53
Figura 31. Componentes armónicos en corriente con mayor presencia de 23 y 25.	53
Figura 32. Simulación de corto- circuito con resistencia de 0,01Ω.	54
Figura 33. (a) Transformador de 12 fases con potencia de 5 kVA, (b) Entradas y salidas de conexión de primario y secundario.	55
Figura 34. PCB con las bornas de conexión de los cuatro sistemas trifásico, con la configuración de los puentes rectificadores (diodos de avalancha) y salidas de conexión hacia los ZSBT.	55
Figura 35. Transformador de interfaz implementado con entradas de 110 V y salidas 220 V de 350 VA.	56
Figura 36. Recuadro naranja conexión del IGBT y recuadro verde resistencia shunt con relación 500 mV / 500 A.	57
Figura 37. Recuadro azul PCB Driver control, recuadro amarillo Control de disparo por bluetooth y en rojo fuente DC-DC aislada 5 - 15 V.	57
Figura 38. PCB con la bobina de disparo y elementos electrónicos especificados por el fabricante.	58
Figura 39. Parámetros eléctricos de prueba del transformador de 12 fases a plena carga.	58
Figura 40. Contenido armónico de corriente (Thdi) medido en la entrada al 100 % de la capacidad nominal del transformador delta -horquilla.	59
Figura 41. Desfase de salida de una de las cuatro (4) fuentes trifásicas.	59
Figura 42. Salida de tensión con carga de 5kVA.	60
Figura 43. Prueba de sistema de control driver INFINEON.	60
Figura 44. Señales de alimentación en azul y señal de tensión de operación del control del driver del IGBT.	61
Figura 45. Nivel de sobretensión medido sobre el IGBT con los conductores de alimentación de 20 cm hacia la lámpara de xenón.	62
Figura 46. Respuesta de sobretensión con los conductores de 5 cm a de IGBT.	62

Figura 47. Medición de tensión - <i>corriente con resistencia de 3 Ω sin fuente de alimentación</i> - Desarrollada en kanthal emulando los valores calculados en la etapa de diseño.	63
Figura 48. Medición de tensión - <i>corriente con resistencia de 3 Ω con fuente de alimentación</i> - Desarrollada en kanthal emulando los valores calculados en la etapa de diseño.	64
Figura 49. Corriente de corto circuito del transformador 5kVA en delta - Horquilla.	65
Figura 50. Medición de corriente de operación con disparo de 12 ms.	66
Figura 51. Medición de caída de tensión sobre la lámpara de xenón en el pulso de 12 ms.	66
Figura 52. Comparación de THDi con los porcentajes por medio de simulación y pruebas de laboratorio.	68
Figura 53. Comparación del rizado con la variación del porcentaje de carga en la salida de 24 pulsos con los valores obtenidos por simulación y pruebas de laboratorio.	68
Figura 54. Modelo equivalente obtenido por medio de las pruebas en laboratorio de fuente de alimentación implementada con tensión de salida de 400V.	69
Figura 55. Caída de tensión calculado en el modelo equivalente con las impedancias calculadas en las pruebas de laboratorio.	69
Figura 56. Diferencia de tensión sobre la lámpara de xenón con relación al encendido y apagado de IGBT en un pulso de 12 ms.	70
Figura 57. Resultados de la caída de corriente del modelo equivalente con las impedancias calculadas de las pruebas de laboratorio.	70
Figura 58. Diferencia de corriente de alimentación de la lámpara de xenón con relación al encendido y apagado de IGBT en un pulso de 12 ms.	70
Figura 59. Caída de tensión medido sobre los terminales de conexión de lámpara de xenón en el laboratorio.	71
Figura 60. Caída de corriente medida en la lámpara de xenón en la prueba de laboratorio.	71
Figura 61. Resultados de operación del pulso con la conexión de la lámpara de xenón tipo flash; la potencia (rojo), la corriente (verde) y la tensión (azul).	72
Figura 62. Medición de irradiancia medida con la celda de referencia policristalina para 1,5 y 3 m con un pulso de 12 ms.	73
Figura 63. Mediciones de contenido armónico de transformador en condiciones de carga de: (a) 23,8 %; (b) 38,7 %; (c) 63,5 %; (d) 83 %; (e) 99,9 %.	79
Figura 64. Mediciones de corrientes de resistencia shunt por separado	80
Figura 65. Medición de tensión en los bornes de la lámpara de xenón.	81
Figura 66. Medición de corriente e irradiancia para: (a) 1 m; (b) 2 m (c) 3 m (d) 4 m.	81

Lista de tablas

	Pág.
Tabla 1. Tabla de coincidencia espectral; tomado de [7]	19
Tabla 2. Rango para la clasificación de la coincidencia espectral de los simuladores solares; tomado de [7].	19
Tabla 3. Porcentaje de no uniformidad de irradiancia en la superficie de caracterización; tomado de tomado de [7].	20
Tabla 4. Comparación de fuentes de luz para simuladores solares; tomado de [8]	21
Tabla 5. Datos técnicos lámpara de xenón flash; datos del fabricante https://www.xenonflashtubes.com/	25
Tabla 6. Valores de resistencia de la lámpara de xenón calculado por medio dos métodos.	28
Tabla 7. Valores de k para un nivel de 680 Vdc.	32
Tabla 8. Niveles de tensión por bobinas del sistema de conexión en horquilla del transformador de 12 fases.	33
Tabla 9. Relación de tensión con base en el nivel de tensión de entrada de la red de alimentación y su tensión de salida esperada de la fuente en DC.	34
Tabla 10. Parámetros eléctricos del transformador de la fuente de alimentación.	35
Tabla 12. Corriente máxima para cada TAP en relación con la resistencia de la lámpara de xenón.	35
Tabla 13. Corriente máxima calculada por cada uno de los diodos.	36
Tabla 14. Especificaciones de operación de diodo de avalancha; Tomado de la página del fabricante https://html.alldatasheet.com/html-pdf/17481/PHILIPS/BYM36E/745/3/BYM36E.html	36
Tabla 15. Características de diseño del transformador ZSBT.	39
Tabla 16. Especificaciones eléctricas IGBT; Tomado de ficha técnica infineon FF300R12KT4P	40
Tabla 17. Pines y funciones de cada uno del driver 1EDI30I12MF; tomado de la ficha técnica del fabricante de Infineon.	43
Tabla 18. Especificaciones técnicas de la fuente aislada COSEL; tomado de la ficha técnica de la referencia MGFS400515.	44
Tabla 19. Especificaciones técnicas de la bobina de disparo PFT-1052V; Tomado de la ficha técnica de xenon tube.	46
Tabla 20. Definición de calibre de los conductores por cada una de las etapas de conexión del emulador solar.	46

Tabla 21. Parámetros eléctricos de operación obtenido por simulación con diferentes porcentajes de cargas del transformador de 12 fases. 67

Tabla 22. Parámetros eléctricos de operación obtenido por medición en laboratorio con diferentes porcentajes de cargas del transformador de 12 fases..... 67

Lista de abreviatura

Abreviaturas

Abreviatura	Término
--------------------	----------------

AM	Masa de aire
----	--------------

LED	Diodo de emisión de luz (siglas en inglés).
-----	---------------------------------------------

IEC	Comisión electrotécnica internacional (siglas en inglés).
-----	-----------------------------------------------------------

FV	Fotovoltaico
----	--------------

ZSBT	Transformadores de Bloqueo de Secuencia Cero (siglas en inglés).
------	------------------------------------------------------------------

IGBT	Transistor bipolar de puerta aislada (Siglas en inglés).
------	----------------------------------------------------------

1.Introducción

El mundo está afrontando cambios trascendentales en la última década principalmente por la acumulación de gases efecto invernadero y deforestación, así como el uso desproporcionado de los combustibles fósiles en los procesos de transporte y producción de materiales de consumo [1] para las diferentes demandas por países, siendo los países de mayor desarrollo industrial quienes se caracterizan por ser los principales consumidores de dichos combustibles. En estas circunstancias es necesario identificar una forma de disminuir o eliminar el uso de esas fuentes de generación de energía. Una de las alternativas que permite sustituir de forma parcial de este tipo de fuente de energía son las fuentes no convencionales de energía renovable (FNCR) en las que se destacan los sistemas fotovoltaicos y turbinas eólicas que por separado y en conjunto forman plantas de generación capaces de alimentar cargas de gran consumo, tales como las que se encuentran de forma típica en el sector industrial o centros residenciales donde el número de horas de sol o viento permiten su implementación; cabe resaltar que al no contar el 100% del día con estos recurso es preciso contar con unidades de almacenamiento, las cuales juegan un rol importante [2] en la disponibilidad del recurso energético, sin olvidar que también hacen parte del pronóstico de demanda las pérdidas asociadas para cada una de sus etapas en el sistema eléctrico en las que se contemplan los factores que reducen la eficiencia del sistema en conjunto [3].

Para Colombia es una realidad la inclusión de estos sistemas de generación promovidos por el estado por medio de leyes como la ley 1715 del 2014 donde se busca el desarrollo e implementación de fuentes no convencionales de energía, en mayor importancia FNCR para permitir su implementación en zonas no interconectadas del país. Esto promueve la inversión, investigación y desarrollo de estas fuentes de generación. Parte del compromiso es generar ambientes económicos aptos para la construcción y puesta en marcha de proyectos con sistemas fotovoltaicos dada su amplia implementación, investigación,

desarrollo y fácil instalación en las zonas donde las estructuras eléctricas convencionales no son de fácil acceso por las condiciones geográficas en dichas zonas.

La implementación de estas fuentes de generación garantiza el suministro de energía para el desarrollo de las comunidades en las zonas más aisladas del país. Con estas leyes, las empresas tendrán un respaldo que les permita invertir en la construcción de plantas FNCER. Un factor relevante es el ingreso de los componentes de los sistemas fotovoltaicos dentro de los que se destacan inversores, baterías y un alto volumen de módulos.

Para garantizar la calidad de los productos que ingresen a Colombia, se debe crear o capacitar a los laboratorios para que se encarguen de realizar las pruebas con base en los lineamientos establecidos por las normas internacionales, por ejemplo, las normas IEC 60904. Una de estas pruebas es la verificación de parámetros eléctricos descritos en la placa de características de cada uno de los paneles donde se especifica la eficiencia de los módulos [4] entre otras pruebas como son inspección visual, prueba de aislamiento, prueba de impacto, curva de corriente versus tensión I-V [5].

La prueba de curva I-V puede ser realizada por medio de luz natural o por medio de un simulador solar, el cual representa varios beneficios gracias a la independencia de la radiación solar y la posibilidad de controlar sus variables como son el espectro e irradiancia [6]. Estos equipos pueden ser clasificados por medio de la norma IEC 60904-9. Los tres parámetros de calidad que evalúa este estándar corresponden a:

- Coincidencia de distribución espectral (primera letra en la clasificación)
- No uniformidad de irradiancia (segunda letra en la clasificación)
- Inestabilidad temporal (tercera letra en la clasificación)

Cada parámetro se califica con las letras A, B o C dependiendo de la calidad o ajuste al estándar. Siendo la clasificación tipo "AAA" la categoría de simulador con las mejores prestaciones de acuerdo con dicho estándar IEC.

Coincidencia de distribución espectral

Consiste en la medición por medio un espectro radiómetro o equipo que permita identificar las longitudes de onda de emisión de la fuente de luz utilizada para la caracterización de los módulos **FV**, este equipo debe cumplir con sensores sensibles a las longitudes de onda

en un rango entre los 400 y 1100 nm, esto con la finalidad de determinar la coincidencia espectral en 6 intervalos (en porcentaje) como se presenta en la Tabla 1.

Intervalo	Rango de longitud de onda [nm]	Porcentaje de irradiancia total en el rango de longitud de onda 400 - 1100 nm
1	400 – 500	18,4 %
2	500 – 600	19,9 %
3	600 – 700	18,4 %
4	700 – 800	14,9 %
5	800 – 900	12,5 %
6	900 – 1 100	15,9 %

Tabla 1. Tabla de coincidencia espectral; tomado de [7]

El espectro de referencia corresponde al emitido por el sol medido a 1,5 AM, la clasificación de los simuladores se muestra en la Tabla 2, estos valores se ajustan para la clasificación teniendo como referencia los 6 intervalos presentados en la Tabla 1.

Clasificación	Coincidencia espectral del intervalo total de espectro especificado en la Tabla 1
A	0,75 – 1,25
B	0,6 – 1,4 5
C	0,4 – 2,0

Tabla 2. Rango para la clasificación de la coincidencia espectral de los simuladores solares; tomado de [7].

No uniformidad de irradiancia

Este parámetro está relacionado con la distribución de la irradiancia en la superficie de ubicación de los módulos objeto de prueba, esta clasificación se realiza al conjunto de operación del simulador debido a las reflexiones de los elementos constructivos del mismo, la celda de referencia o elementos destinado para medición debe ser ubicado en la cuadrícula calculada con base en lo establecido en la norma IEC, con un área de cobertura del sensor de 400 cm² o el número de espacios obtenidos de la división entre 64 [7].

Dependiente del tipo de simulador como pueden ser de estado estacionario o tipo pulso; el simulador estacionario se establece una medición por cada emplazamiento, por el contrario, para los simuladores tipo impulso se debe ubicar otro dispositivo de control de forma comparativa entre los valores de irradiancia medidos y se deben tomar por lo menos 10 lecturas durante el segmento del pulso donde realizó la medición de I-V. La no uniformidad se calcula por medio de (1) donde la irradiancia mínima y máxima se toman

de las medidas con el sensor en cualquier parte de la superficie definida para la caracterización de los módulos.

$$No\ uniformidad\ (\%) = \left[\frac{Irradiancia_{Max} - Irradiancia_{Min}}{Irradiancia_{Max} + Irradiancia_{Min}} \right] X 100\% \quad (1)$$

Estos porcentajes permiten clasificar la segunda letra del simulador teniendo como referencia el porcentaje establecido en la Tabla 3.

Clasificación	No uniformidad de irradiancia
A	2%
B	5%
C	10%

Tabla 3. Porcentaje de no uniformidad de irradiancia en la superficie de caracterización; tomado de [7]

La inestabilidad temporal

Para este desarrollo se tiene como referencia los simuladores solares tipo pulso para lo cual se establece la necesidad de evaluar la inestabilidad a corto y largo plazo [7]:

Determinación de la inestabilidad a corto plazo de simulador de pulso

1. Cuando los elementos de medición de las variables de irradiancia, tensión y corriente realizan la medición simultánea y almacena estos valores su clasificación de inestabilidad es A
2. Cuando las mediciones se realizan de forma secuencial, se debe determinar el tiempo para la toma de dos paquetes sucesivos de información teniendo presente tiempo de retraso entre las mediciones y se debe calcular la inestabilidad con la peor medición de irradiancia entre paquetes de datos sucesivos (2) .

$$Inestabilidad\ temporal\ (\%) = \left[\frac{Irradiancia_{Max} - Irradiancia_{Min}}{Irradiancia_{Max} + Irradiancia_{Min}} \right] X 100\% \quad (2)$$

Determinación de la inestabilidad a largo plazo de simulador de pulso

La inestabilidad temporal de largo plazo para los simuladores solares de pulso largo se determina con el cambio de irradiancia del paquete de datos medidos durante el tiempo de exposición. Para el caso de los sistemas con multiplex pulso se calcula con las variaciones de irradiancia de paquete de mediciones realizadas durante la obtención de la curva I-V con la ecuación (2).

Fuente de Luz

Con base en los parámetros de clasificación de la IEC de los simuladores solares, se han analizado diferentes fuentes de luz. Entre las fuentes de luz con mayor rendimiento en componente espectral, distribución uniforme de la intensidad y sistema de operación del pulso; teniendo como referencia el desempeño y deficiencia espectral de diferentes fuentes de luz como son lámparas halógenas de cuarzo-tungsteno, lámparas de xenón mercurio, lámparas de arco de xenón, lámparas de flash de xenón, lámparas de halogenuros metálicos, LED y fuentes de luz laser super continuos [8], en este estudio se encontraron las siguientes ventajas y desventajas:

Fuente de luz	Ventaja	Desventaja
Lámpara de mercurio de xenón	<ol style="list-style-type: none"> 1. Amplia gama espectral 2. Espectro UV nítido y denso. 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Alto consumo de energía. 2. Necesidad de cuidados. 3. Vida corta.
Lámpara de arco de xenón	<ol style="list-style-type: none"> 1. Alta potencia. 2. Estabilidad. 3. Gama espectral próxima a la luz solar natural. 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Alto consumo de energía. 2. Necesidad de cuidados. 3. Vida corta.
Lámpara de flash de xenón	<ol style="list-style-type: none"> 1. Concentración en poco tiempo. 2. Sin calefacción. 3. Estabilidad. 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Necesidad de filtro óptico. 2. Costo elevado.
Lámpara de halogenuros metálicos	<ol style="list-style-type: none"> 1. Bajo costo 2. Alta intensidad luminosa 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Alto consumo de energía. 2. Vida corta. 3. Costo de elementos electrónicos auxiliares.
LED	<ol style="list-style-type: none"> 1. Bajo costo. 2. Bajo consumo de energía 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Gama espectral (350-1100 nm)
Laser	<ol style="list-style-type: none"> 1. Alta potencia. 2. Banda ancha. 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Espectro estrecho

Tabla 4. Comparación de fuentes de luz para simuladores solares; tomado de [8]

En la Tabla 4 se observa que la mayoría de las fuentes cumplen con los criterios de clasificación establecidos por la normatividad, adicionalmente se identifica que la vida útil de la mayoría es una desventaja.

Es por esto que se continúa comparando las fuentes de lámpara de xenón y LED, las cuales tienen una coincidencia espectral similar a la del sol en AM 0, AM 1.5D y AM1.5 G (Figura 1), donde se especifica como una medición de la irradiancia en atmosfera cero o fuera de la atmosfera terrestre, una medición de la irradiancia incidente directa sobre la superficie terrestre y la suma de la medición de la irradiancia directa con la difusa (Global) sobre la superficie terrestre respectivamente, además se ha demostrado que la fuente que mejor se ajusta a la temperatura de color del sol (5400 K) es la fuente de xenón [9].

Las lámparas de xenón dependiendo de su forma y configuración se puede asociar a una fuente puntual; además estas lámparas requieren del desarrollo de filtros para el ajuste de su espectro comparado con el emitido por el sol, esto debido a su fuertes líneas de emisión en el infrarrojo[10] [11]. Los criterios que promueven la implementación de los simuladores con fuentes LED son la reproducción del espectro en las bandas, la baja variabilidad en la salida de emisión, el menor consumo de energía, menor espacio para su implementación y bajos costos asociados.

Los simuladores LED aún están en proceso de desarrollo debido a las bajas intensidad de los mismo, lo cual conlleva a la implementación de simuladores con fuentes tradicionales[9].

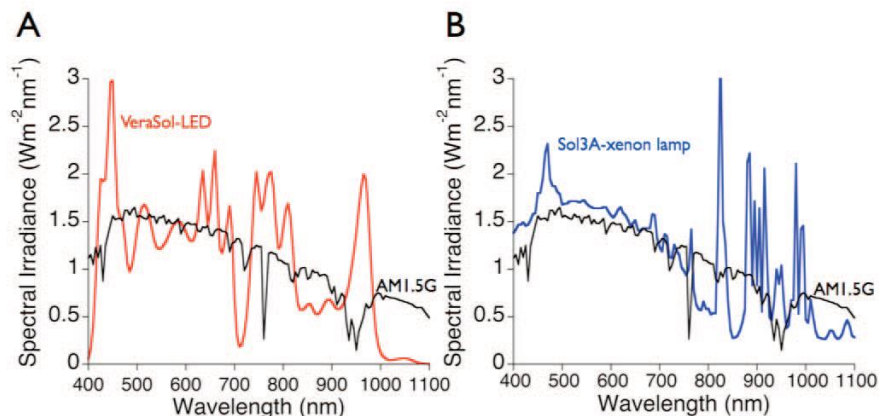


Figura 1, Comparación del espectro de un simulador solar con LED izquierda y lámpara de xenón con el espectro de AM 1.5 G; tomado de [9]

Fuente de alimentación

Las fuentes de alimentación de los simuladores con lámpara de xenón son complejas y costosas [11]. Con base en lo anterior, se busca diseñar una fuente de alimentación que cumpla con las condiciones mínimas para la clasificación de un simulador tipo pulso para la caracterización de los parámetros eléctricos consignados en el módulo fotovoltaico; este tipo de fuentes deben tener en cuenta las tensiones de descarga y disparo, la frecuencia, distancia de los conductores (efecto de la longitud de los conductores en la emisión de luz Figura 2), tipos de fuentes de respaldo y otros elementos topológicos que dependen de su aplicación [12].

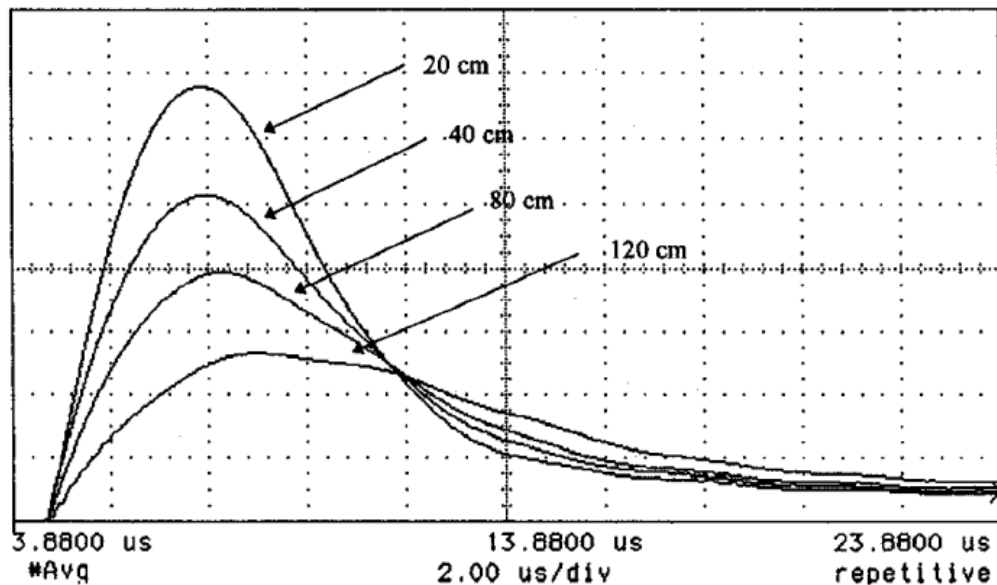


Figura 2. Efecto de la longitud de los conductores con la emisión de luz de la lámpara de xenón; tomado de:[12]

Para garantizar los niveles de tensión tanto de carga y disparo de lámpara de xenón se diseña una fuente de alimentación con la implementación de un transformador de 24 pulsos, una etapa de rectificación y una etapa de acople de las salidas en DC, este tipo de fuentes en corriente continua establecen un porcentaje de rizado inferior al 2%, entre otras ventajas [13].

Control

El sistema de control para el disparo de la lámpara se xenón, se especifica teniendo como referencia los valores de corriente y tensión de disparo. Según las especificaciones del fabricante, se debe diseñar con base en los siguientes criterios de afectación [14]:

1. Pico de corriente en el colector
2. $\frac{d_v}{dt}$
3. Ajuste $\frac{d_v}{dt}$
4. Cableado

Es diseño contempla la conexión del IGBT con la bobina de disparo encargada de la ionización de gas de xenón, así desconexión del banco de condensadores y la fuente de carga y respaldo del pulso esperado.

Para la definición de los dispositivos encargados del disparo, se deben contemplar los parámetros de mayor relevancia en aislamiento, corriente de operación, temperatura y tiempos de respuesta con base en los criterios de operación de la lámpara de xenón; valores dependientes de tipo de lámpara y características geométricas de la lámpara con valores de tensión en los rangos de 300 - 700 V y corrientes en el orden de los 100 - 1000 A[15]

2. Diseño

La implementación del simulador solar se basó en la evaluación de varias opciones recopiladas durante la revisión bibliográfica, definiendo un sistema que fuera viable y práctico de implementar de acuerdo con los recursos económicos y de equipos disponibles en el Laboratorio de Ensayos Eléctricos Industriales - LABE.

El sistema seleccionado se divide en tres bloques principales:

1. Fuente de luz: Para garantizar una respuesta espectral adecuada, uniformidad e intensidad de irradiancia, se optó por utilizar una bombilla de Xenón tipo flash.
2. Fuente de alimentación: Se diseñó un sistema que consta de un transformador de 12 fases, rectificadores y transformadores de interfaz, junto con un banco de condensadores para proporcionar la alimentación necesaria.
3. Interruptor semiconductor y su sistema de control: Para el interruptor de disparo, se eligió un IGBT (Transistor Bipolar de Puerta Aislada) y se implementó un sistema de control correspondiente.

2.1 Características lámpara Xenón escogida

Para la implementación del simulador, se escogió una lámpara con las especificaciones descrita en la Tabla 5, con esta información se calcula la resistencia de la lámpara en relación a su geometría, tipo de gas y presión de llenado[15]

Características	Descripción
Tipo	Vaso
Forma	Circular
Máxima energía de destello	600 [J]
Tensión de operación	400 – 700 [V]
Diámetro de tubo	15 [mm]
Diámetro interno	130 [mm]
Diámetro externo	160 [mm]

Tabla 5. Datos técnicos lámpara de xenón flash; datos del fabricante <https://www.xenonflashtubes.com/>.

Para el cálculo de la resistencia de lámpara se toma las ecuaciones definidas en [15]:

$$V = k_0 * |i|^{0,5} \quad (3)$$

$$k_0 = k * \frac{L}{D} \quad (4)$$

Donde V es la tensión de alimentación de la lámpara, i la corriente de operación y k_0 es una constante que depende de la geometría y de las características de presión de llenado de la lámpara de xenón [16]. Este valor de k_0 se calcula por dos métodos, el primero es por medio de la fórmula (4) teniendo como referencia la presión de llenado de 0,4 atm equivalente a 304 mm Hg, cuyo valor se relaciona con el factor k en la Figura 3.

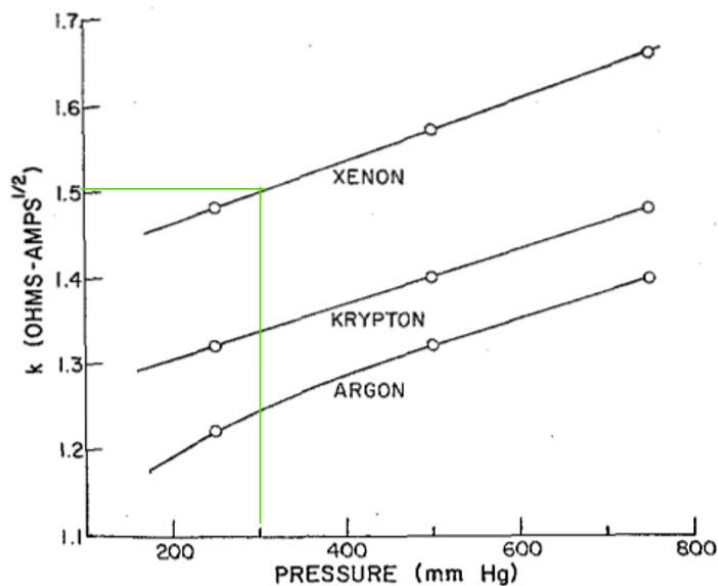


Figura 3. Relación de la presión de llenado de la lámpara de xenón y el factor k ; tomado de [15]

De la figura anterior se obtiene un valor k para la presión de 304 mm Hg de aproximadamente de 1,5 [$\Omega \cdot A^{0,5}$] con este valor y las dimensiones de la lámpara, se obtiene un $K_0 = 43,55$ [$\Omega \cdot A^{0,5}$]. En función de este parámetro K_0 y con la ecuación (3) se determina la corriente de operación de la lámpara en un rango de tensión de 0 a 900 [V_{dc}] como es mostrado en la Figura 4.

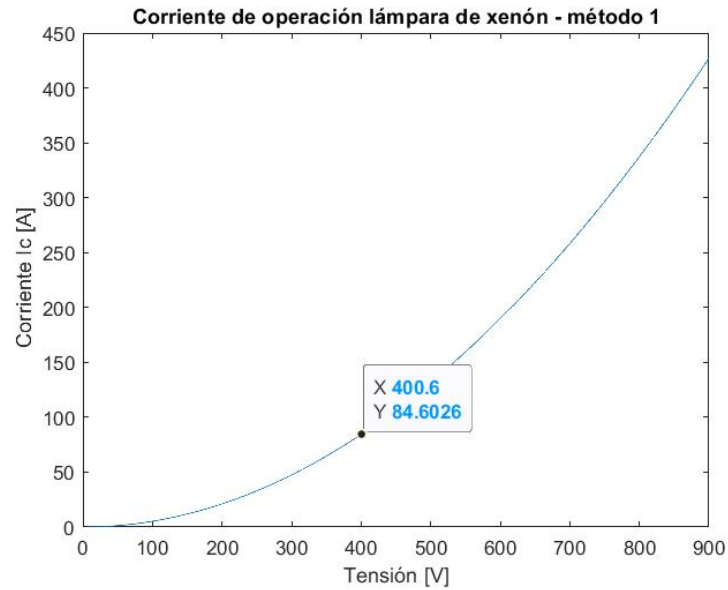


Figura 4. Relación de I-V de la lámpara de xenón flash para un k_0 de $45,55 [\Omega \cdot A^{0,5}]$
 La resistencia calculada para un valor de tensión de $400 [V]$ y una corriente de operación de $84,6 [A]$ es de $4,73 [\Omega]$

El segundo método para el cálculo de K_0 se realiza por medio de la siguiente ecuación[16]:

$$K_0 = 1,28 * \left(\frac{p}{450}\right)^{0,2} * \frac{L}{D} \quad (5)$$

Donde p es la presión de llenado correspondiente al gas de xenón de $304 [Torr]$, el valor de $k_0 = 34,04 [\Omega \cdot A^{0,5}]$, con este valor se determina la corriente de operación con la ecuación (3) en un rango de tensión de 0 a $900 [V_{dc}]$ como se muestra en la Figura 5.

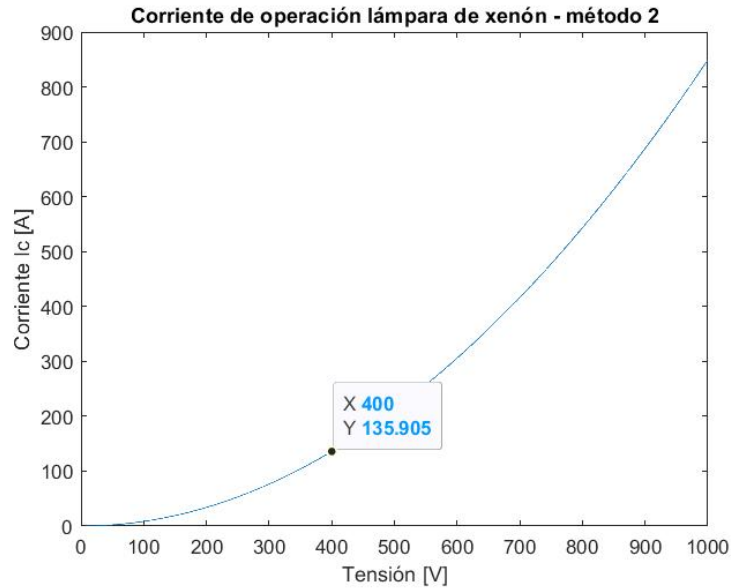


Figura 5. Relación de I-V de la lámpara de xenón flash para un K_0 de $34,31 [\Omega \cdot A^{0,5}]$

La resistencia calculada para un valor de tensión de disparo de 400 [V] y una corriente de operación de 135,9 [A] es de 2,94 [Ω] en la Tabla 6 en resumen los valores obtenidos de la resistencia características de la lámpara de xenón.

Método	$K_0 [\Omega \cdot A^{0,5}]$	$R_{lamp} [\Omega]$
1	45,55	4,73
2	34,31	2,94

Tabla 6. Valores de resistencia de la lámpara de xenón calculado por medio dos métodos.

El valor de la resistencia de descarga de las lámparas de Xenón varía significativamente en el inicio del destello, dicha variación está asociada a las características geométricas de la bombilla y las características del gas Xenón [17].

2.2 Banco de condensadores

Para el cálculo del banco de condensadores, se toma como valor crítico la resistencia de 2,94 [Ω], este valor permite calcular la energía requerida para un pulso de 12 ms por medio de la ecuación (6)

$$E_{lamp} = I_{op} * V_{op} * T_s \quad (6)$$

$$E_{lamp} = 136A * 400V * 12 * 10^{-3}s$$

$$E_{lamp} = 648J$$

La energía calculada, es mayor a la energía máxima de destello de 600 J, valor declarado en la ficha técnica del fabricante (Tabla 5). Dado que el valor de resistencia calculado por medio del método 2 tiene una incertidumbre de $\pm 10\%$ se mantiene este parámetro de referencia. La capacitancia requerida se calcula con la ecuación (7).

$$E_C = 0,5 * C * V_{op}^2 \quad (7)$$

$$C = \frac{2 * E_C}{V_{op}^2}$$

$$C = 8 \text{ mF}$$

El tiempo de disparo del pulso es 12 ms, por lo tanto los condensadores se descargarían aproximadamente el 63 % de su capacidad, lo cual corresponde a 413 J como se observa en la Figura 6. La energía (240 J) restante para mantener el pulso constante en los 12 ms, se suplirá por medio de una fuente de alimentación basada en un transformador trifásico con salida de 12 fases y su sistema de rectificación en DC.

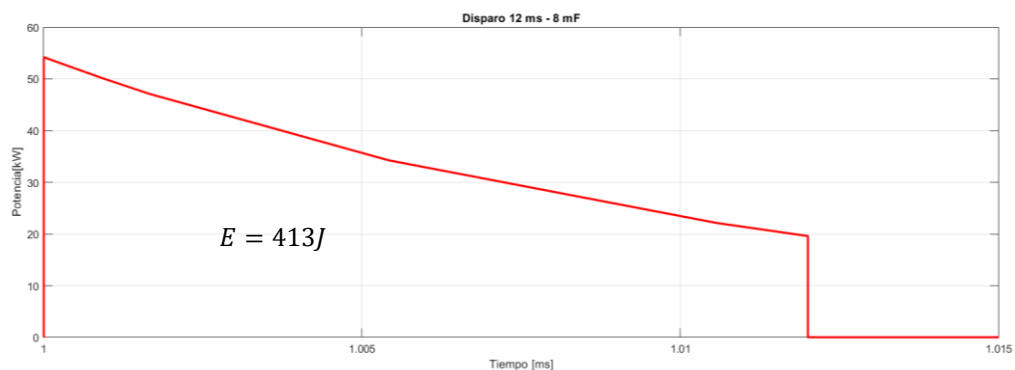


Figura 6. Curva de descarga de un banco de condensadores de 8 mF en 12 ms.

2.3 Fuente de alimentación

Con la finalidad mantener el nivel de tensión de la lámpara de Xenón en un rango de operación de 400 - 700V_{DC} y la energía del pulso durante los 12 ms, se diseña un transformador de 12 fases, alimentado desde la red trifásica. Esta fuente se diseña en 4 etapas alimentación de sistemas trifásicos con salida de 12 fases, los puentes rectificadores, los transformadores de interfaz y caracterización de la carga. Este tipo de fuentes garantizan un contenido armónico en corriente inferior al 5% y un valor de rizado inferior al 2%[13][18]. En el Figura 7 se presentan las etapas de la fuente a implementar.

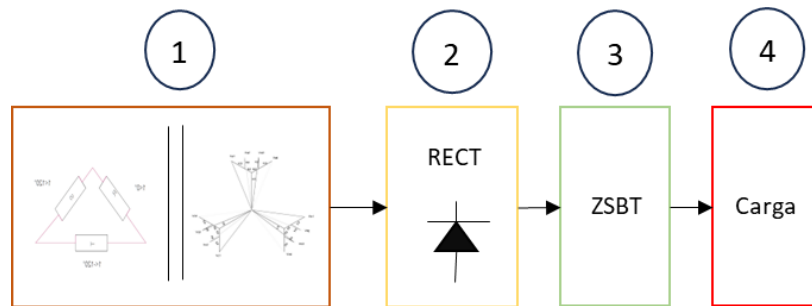


Figura 7. Etapas de la fuente de alimentación de 12 fases.

2.3.1 Transformador de 12 fases

Este transformador delta - horquilla, relaciona las tensiones de fase de entrada del transformador en delta ($V_{a,b,c} = \frac{V_{AC}}{\sqrt{3}}$) con los factores k, estos valores de $k_{1,2,3}$ y k_4 definen los niveles de tensión de cada una de las bobinas para la relación de transformación en el secundario. La ecuaciones que permiten calcular los factores k con base en el desfase y la tensión de entrada se muestran en (8),(9),(10) y (11) [13].

$$Va_1 = k_1Va - k_2Vb - k_3Vb \quad (8)$$

$$Va_2 = k_1Va - k_2Vb - k_4Va \quad (9)$$

$$Va_3 = k_1Va - k_2Vc - k_4Va \quad (10)$$

$$Va_4 = k_1Va - k_2Vc - k_3Vc \quad (11)$$

La salida del secundario del transformador de 12 fases (Delta – Horquilla) corresponde a tres grupos de tensión desfasadas entre sí 15° , lo que permite obtener 4 sistemas trifásicos tomando cada una de las fases con el mismo número subíndice como se presenta en la Figura 8.

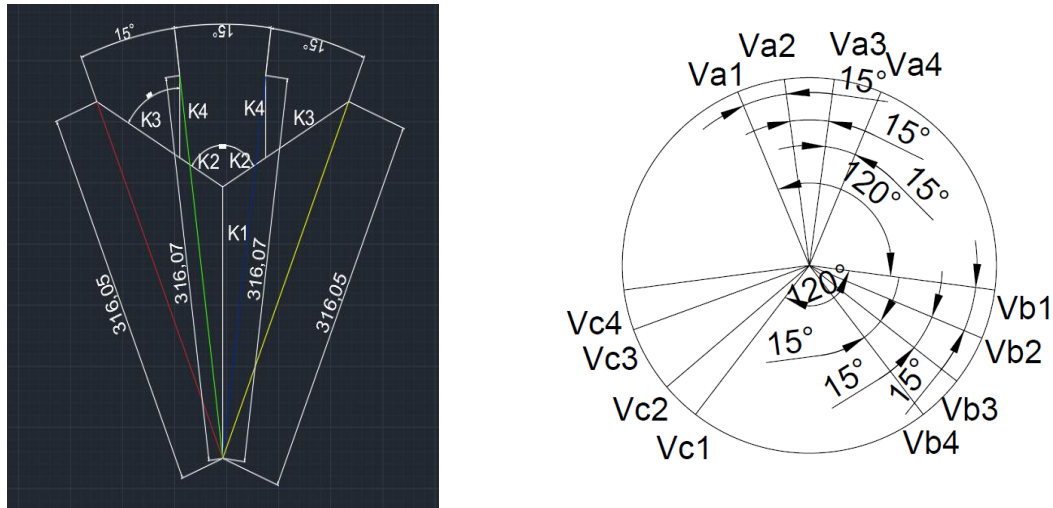


Figura 8. Desfase de las salidas de tensión del transformador en horquilla.

Estas tensiones de salida se obtienen por medio de la distribución y la conexión de las bobinas en las 3 ramas del núcleo las del transformador trifásico, relacionando la tensión de entrada y el valor de salida de tensión en el secundario [13].

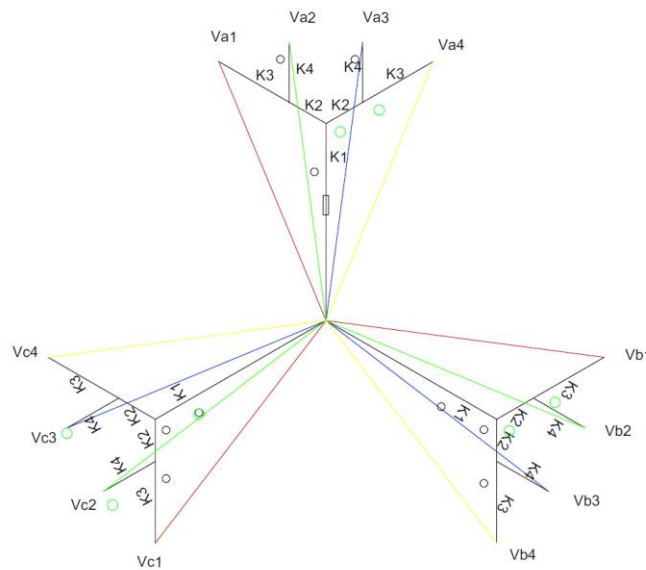


Figura 9. Diagrama de la suma fasorial para cada una de las salidas de secundarios del transformador de 12 fases.

El conjuntos de igual subíndice (V_a, V_b, V_c) se desfasan en un ángulo de 15° Figura 8. Con respecto a la tensión de la fase del primario, dos de estos conjuntos se desplazan en un ángulo de $\pm 7,5^\circ$, mientras que los dos conjuntos restantes se desplazan $\pm 22,5^\circ$ de esta tensión [13][18].

Al alimentar el transformador con tensión de $208V_{ac}$ se espera obtener una tensión de salida de $680V_{DC}$. Este valor tensión se encuentra en el rango de operación de la lámpara de xenón.

$$V_{DC} - 2 * V_{diodo} = V_{pico} * \sqrt{3} \quad (12)$$

$$V_{pico} = V_{rms} * \sqrt{2} \quad (13)$$

La ecuación (12) es válida teniendo como referencia los tiempos de operación de 0,69 ms de cada una de las 12 fases del secundario los que permite obtener 24 pulso después de los 4 puentes rectificadores trifásicos y los transformadores de bloqueo de secuencia cero (ZSBT por sus siglas en inglés) [18]. El valor de tensión V_{rms} a la salida del secundario del transformador (Delta-Horquilla) se obtiene de (13), asumiendo un valor de caída de tensión en los diodos de $0,7 V_{DC}$.

$$V_{rms} = \frac{V_{DC} - 1,4}{\sqrt{2} * \sqrt{3}}$$

$$V_{rms} = 277 [V_{ac}]$$

Tomando las ecuaciones (8),(9),(10) y (11) se plantea el siguiente sistema de ecuaciones:

$$Va_1 = (277 \angle 22,5) = k_1(120 \angle 0) - k_2(120 \angle -120) - k_3(120 \angle -120)$$

$$Va_2 = (277 \angle 7,5) = k_1(120 \angle 0) - k_2(120 \angle -120) + k_4(120 \angle 0)$$

$$Va_3 = (277 \angle -7,5) = k_1(120 \angle 0) - k_2(120 \angle 120) + k_4(120 \angle 0)$$

$$Va_4 = (277 \angle -22,5) = k_1(120 \angle 0) - k_2(120 \angle 120) - k_3(120 \angle 120)$$

En la Tabla 7 se consignan los valores calculado de $k_{1,2,3}$ y k_4 .

Factores	Valor calculado
k1	1,623
k2	0,3479
k3	0,6721
k4	0,492

Tabla 7. Valores de k para un nivel de 680 Vdc

Los cálculos de las tensiones (V_{b1} , V_{b2} , V_{b3} , V_{b4} , V_{c1} , V_{c2} , V_{c3} y V_{c4}) se obtienen de igual forma utilizando las ecuaciones descritas en (8),(9),(10) y (11). En la Tabla 8 se presentan los valores de tensión calculados y ajustados para la fabricación del transformador debido a las restricciones geométricas y constructivas del mismo.

Bobina	Tensión [V]	Tensión ajustada [V]
B1	194,8	195
B2	41,75	42
B3	80,65	81
B4	59,04	59

Tabla 8. Niveles de tensión por bobinas del sistema de conexión en horquilla del transformador de 12 fases.

En función de las tensiones y el número de bobinas por rama de núcleo del transformador, en la Figura 10 se define un esquema de conexión de cada una de las 12 fases del secundario.

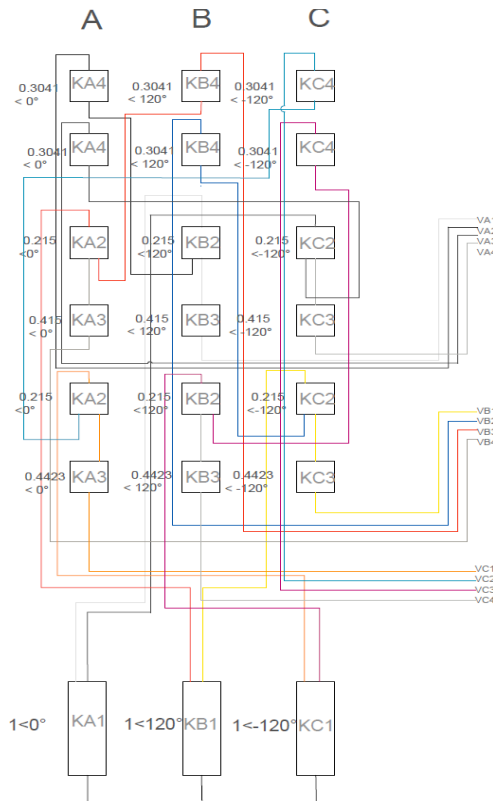


Figura 10. Esquemático de conexión de las 7 bobinas por rama para las 12 fase de secundario.

Para determinar la operación de la lámpara en el rango 400 y 700V_{dc}, se diseñan tres TAPs en el primario del transformador (Figura 11), basado en el nivel de tensión para Colombia de 208 Vac. Los valores de tensión esperados en DC se presentan en la Tabla 9.

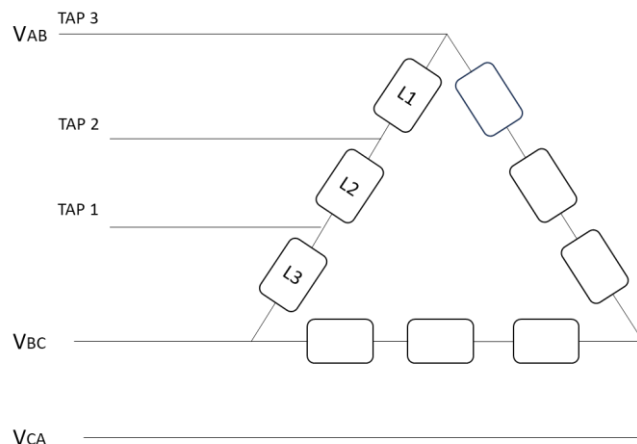


Figura 11. Configuración tensión de entrada para obtener diferentes niveles de tensión de operación de la lámpara de xenón tipo flash.

Tensión primaria	TAP	Relación con base en la tensión de primario	Tensión de línea _{rms} secundaria [V _{ac}]	Tensión [V _{DC}]
208	1	1	481	680
	2	1,7	283	400
	3	2,3	212	300

Tabla 9. Relación de tensión con base en el nivel de tensión de entrada de la red de alimentación y su tensión de salida esperada de la fuente en DC.

Para una energía de 240 J en un pulso de 12ms se requiere una potencia de 20 kVA del transformador. Dado que se busca caracterizar la operación de la fuente de 12 fases con el arreglo de capacitores, se decidió diseñar un transformador de 5 kVA, en la etapa inicial de evaluación. La corriente, tensión y energía del transformador se calculan con relación a las características principalmente resistiva de la lámpara de xenón ($\cos(0)=F_p=1$)[8]:

$$I_p = \frac{S}{V_{linea} * \sqrt{3}} \tag{14}$$

$$I_p = \frac{5 [kVA]}{208 [V] * \sqrt{3}}$$

$$I_p = 13,9 [A]$$

Este valor de corriente corresponde a la corriente de operación a plena carga. Los parámetros del transformador se detallan en la Tabla 8.

Característica	Valor
Potencia [kVA]	5
Tensión de línea primario [V_{AB}]	208
Tensión de línea secundario [V_{rms}]	283
Corriente de primario [A]	13,9
Corriente de secundario por grupo trifásico de salida [A]	3,5

Tabla 10. Parámetros eléctricos del transformador de la fuente de alimentación.

Sin embargo, en la etapa de diseño no se pudo determinar a nivel de simulación cuál puede ser la regulación de la tensión dinámica (impedancia asociada) de dicho transformador en operación con la lámpara de xenón, por lo cual, solo hasta cuando se tuvo el transformador fabricado se pudo medir dicha característica.

2.4 Rectificador

Para el cálculo del puente rectificador trifásico se toman los valores críticos de corriente de salida sobre la carga con (15)[19][20].

$$I_m = \frac{\sqrt{3}}{R} V_m \quad (15)$$

Donde R es la resistencia de la lámpara de xenón y V_m es la tensión máxima de fase, dado que los rectificadores son trifásicos desfasados 120° , la corriente de cada uno de ellos es la tercera parte de la corriente sobre la carga, y siendo rectificadores independientes debido a la implementación de los transformadores de interfaz (ZSBT); la proporción de la corriente en cada diodo es la doceava parte de la corriente total en cada ciclo[18]. Por medio de (15) se calcula la corriente de cada TAP como se muestra en la Tabla 11.

TAP	Corriente máxima $I_m [A]$
1	231,2
2	136,1
3	102

Tabla 11. Corriente máxima para cada TAP en relación con la resistencia de la lámpara de xenón.

Siendo la corriente máxima de operación en cada diodo la doceava parte de la corriente máxima de operación:

$$I_{diodo} = \frac{I_m}{12} \quad (16)$$

En la Tabla 12 se especifican los valores de corriente por diodo y punto de alimentación.

TAP	Corriente máxima $I_{diodo} [A]$
1	19,3
2	11,3
3	8,5

Tabla 12. Corriente máxima calculada por cada uno de los diodos.

La tensión máxima en inverso se determina con la ecuación (17) partiendo de la tensión del TAP 1, el cual corresponde al nivel de tensión máximo en DC a salida de la fuente de alimentación.

$$V_{inv} = \sqrt{3} * \sqrt{2} * V_f \quad (17)$$

$$V_{inv} = \sqrt{2} * 481[V]$$

$$V_{inv} = 680[V]$$

Con estos valores de corriente y tensión, se definen la implementación de diodos tipo avalancha con las especificaciones descritas en Tabla 13.

Características BYM36E	Símbolo Siglas en inglés	Valor
Tensión inversa = Repetitiva pico de tensión inversa	VR = VRRM	800 [V]
Corriente media de operación	IFAV	2.9[A]
Pico repetitivo de corriente de operación $t_p=10$ ms - media onda	IFRM	33 [A]
Pico no repetitivo de corriente de operación	IFSM	65 [A]

Tabla 13. Especificaciones de operación de diodo de avalancha; Tomado de la página del fabricante <https://html.alldatasheet.com/html-pdf/17481/PHILIPS/BYM36E/745/3/BYM36E.html>

Dadas las características de combinación de materiales, estos diodos permiten flujos de corrientes elevados. En la Figura 12, se muestran el esquema conexión con base en las características constructivas de los diodos y la conexión de los 4 puentes rectificadores tanto en las entradas como las salidas de cada uno de ellos.

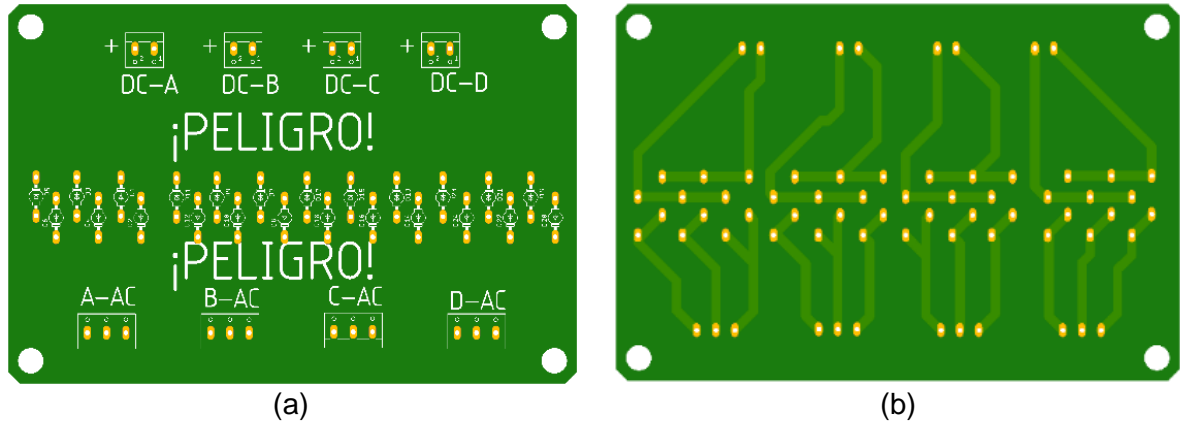


Figura 12. Esquemático en Eagles® de la conexión de los puentes rectificadores con la entrada desde el transformador de 12 fases y salidas a los transformadores de interfaz ZSBT (a) Vista superior; (b) Vista inferior de la PCB.

2.5 Transformadores de interfaz (ZSBT)

Los Transformadores de Bloqueo de Secuencia Cero (ZSBT por sus siglas en inglés), permite la operación independiente de los 6 pulso por cada puente rectificador (conducción de los sistemas trifásicos cada 120°). La operación independiente de cada fuente trifásica respalda la cuarta parte de la potencia suministrada a la carga, y la distribución igualitaria de corriente entre las diferentes fases. Estos transformadores cuentan con bobinas de igual número de vueltas y direcciones opuestas; con base en la ley de ampere, el flujo DC generado por cada bobina en el núcleo que debe ser de igual magnitud y en sentido opuesto[18].

El nivel de tensión sobre cada uno de los bobinados de los ZSBT se relaciona al punto de conexión en la salida de los puentes rectificadores; los mayores niveles de tensión soportados por los ZSBT, corresponde a los puntos de conexión de los ZSBT 1 y ZSBT 4 dado el desfase (modelos de conexión en la Figura 13). Para los ZSBT 2 y ZSBT 3 los desfases entre sistemas son de 15° por lo tanto se obtienen valores de tensión inferiores a los ya mencionados en los extremos de conexión.

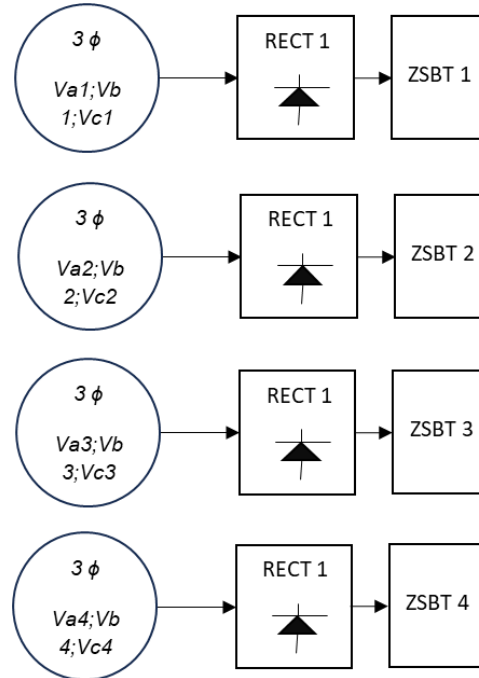


Figura 13. Modelo de conexión de rectificadores ZSBT.

Para el cálculo de los niveles de tensión V_{rms} , se tiene un factor multiplicativo con la tensión máximas de salida del rectificador expresado en las ecuaciones (18) y (19).

$$V_N = 0,121 * V_m [V_{rms}] \text{ para ZSBT 2 y 3} \quad (18)$$

$$V_N = 0,186 * V_m [V_{rms}] \text{ para ZSBT 1 y 4} \quad (19)$$

Por lo tanto, el nivel de tensión calculado para los ZSBT 2 y 3 corresponde a $V_{Nrms} = 0,121 * 392,6 = 47,5 [V_{rms}]$ y para los ZSBT 1 y 4 $V_N = 0,186 * 392,6 = 73,02 [V_{rms}]$

El número de vueltas del devanado de los ZSBT se calcula cumpliendo con la relación descrita en la ecuación (20), en esta ecuación se especifica que la tensión de la bobina (V_N) debe ser menor a la fuerza electromotriz (E), La fuerza electromotriz se determina por medio de los parámetros eléctricos y constructivos de diseño de los ZSBT.

$$V_{Nrms} < E = 4,44 * f * N * B_m * A \quad (20)$$

Donde:

f : Frecuencia de la tensión sobre ZSBT.

N : Número de vueltas de bobinado.

B_m : Densidad de flujo magnético máximo asociado al material

A : Área central del núcleo de la estructura del transformador.

La potencia de los transformadores ZSBT, y el tamaño del núcleo a implementar se determina con la ecuación descrita en [18], en esta ecuación se debe contemplar la tensión V_N sobre las bobinas y la corriente que fluye por cada una de ella.

$$kVA_{ZSBT} = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^4 \frac{1}{4} * I_o * V_{Ni} = 0,034 P_o \quad (21)$$

$$kVA_{ZSBT} = 0,034 * [kVA]$$

$$kVA_{ZSBT} = 0,17 [kVA]$$

$$VA_{ZSBT} = 170 [VA]$$

De los materiales laminados disponibles en el mercado, se tomó la información de los núcleos utilizados por los fabricantes de transformadores Tabla 14.

Característica	Descripción
Potencia [VA]	180
EI 50	Acero ferromagnético
Área de núcleo [cm ²]	15,5
B_m [Gauss]	10000
Frecuencia [Hz]	180
Número de vueltas	130

Tabla 14. Características de diseño del transformador ZSBT.

2.6 Control de disparo

La etapa de control se diseñó con Transistores bipolares de puerta aislada (IGBT por sus siglas en inglés), con referencia en los criterios de aplicación propuestos en [14] y el esquema de disparo con la fuente de 12 fases como se muestra en la Figura 14.

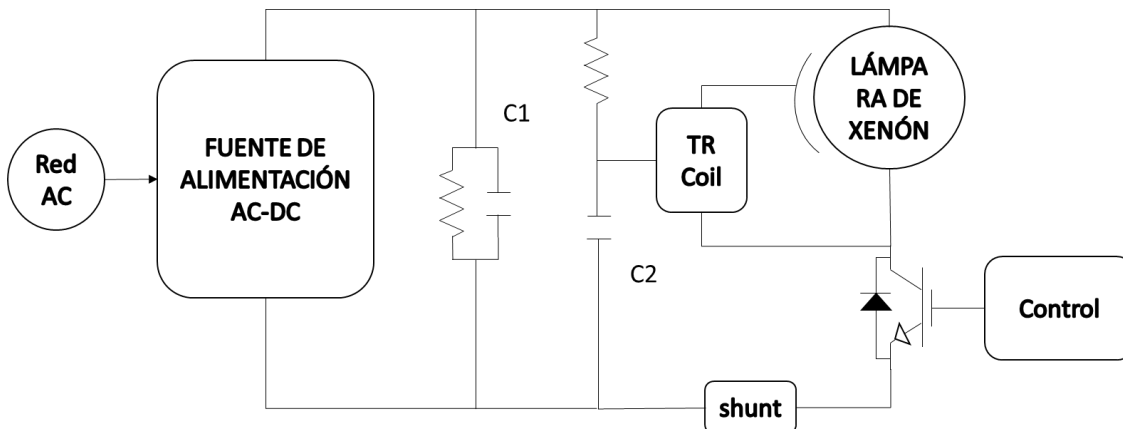


Figura 14. Esquema de disparo fuente DC e IGBT.

En capacitor C1 corresponde al arreglo de 8 mF – 400 V_{DC} y C2 corresponde al capacitor del control de operación de la bobina de disparo (TR coil).

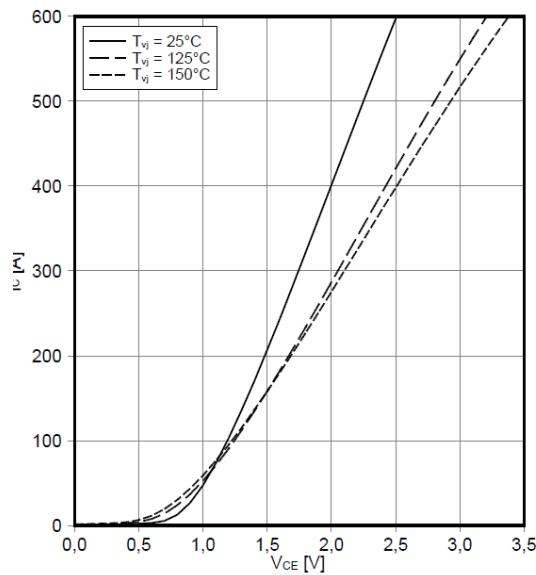
2.6.1 Interruptor semiconductor IGBT

La corriente de operación calculada para el disparo de la lámpara de xenón es aproximadamente de 136 A, una tensión de inverso máxima de 680 V y un tiempo de disparo de 12 ms, en la Tabla 15 se especifica un IGBT.

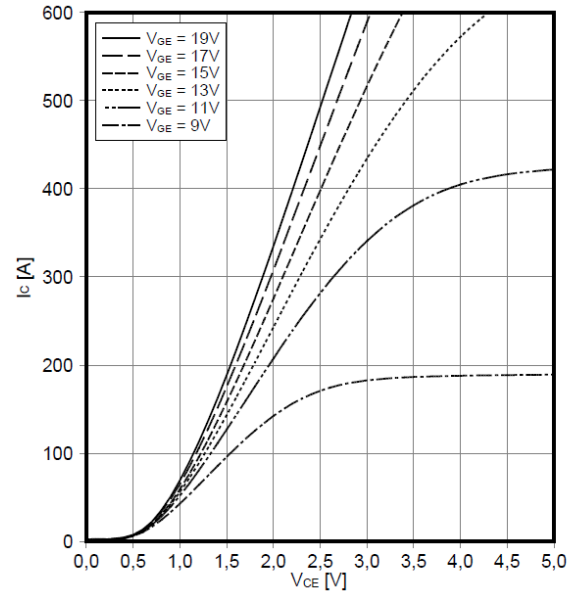
Características	Símbolo	Valor
Tensión colector – Emisor	V_{ces}	1200 V
Corriente colector continua DC	$I_{C\ nom}$	300 A
Corriente pico repetitivo Colector	I_{CRM}	600 A
Tensión pico compuerta – Emisor	V_{GES}	$\pm 20V$
Temperatura bajo condiciones de conmutación	$T_{vj\ op}$	-40 _ 150 °C
Corriente de fuga puerta-emisor	I_{GES}	400 nA

Tabla 15. Especificaciones eléctricas IGBT; Tomado de ficha técnica infineon FF300R12KT4P

Los sistemas de control de los IGBT deben garantizar los métodos de protección para evitar disparos errados o daños por sobretensiones, debido a la presencia de inductancias.



Característica de salida IGBT, inversor (típica)
 $I_c = f(V_{CE})$
 $T_{vj} = 150^\circ\text{C}$



Característica de salida IGBT, inversor (típica)
 $I_c = f(V_{CE})$
 $V_{GE} = 15\text{V}$

Para el valor de corriente calculado de colector – emisor de 136 A, se cumple con la condición de trabajo en la franja de operación del IGBT para una temperatura de 150°C . Además, existe la posibilidad de operar en condiciones seguras hasta 300 A.

2.6.2 DRIVER de protección y control del IGBT

Para el IGBT de la marca Infineon se especifica el uso del DRIVER 1EDI30I12MF, el cual garantiza la tensión de apertura y cierre de este siguiendo el modelo de conexión del fabricante.

En la Figura 15, se tienen tres parámetros relevantes como son la señal de control del DRIVER, la fuente de alimentación del driver y la fuente aislada para garantizar la tensión de V_{GE} del IGBT encargada de la operación. En la conexión se especifica la importancia de eliminar los valores de resistencia altos entre el punto de conexión del emisor y la referencia negativa de la fuente, ya que los valores de resistencia altos en los periodos de operación de alta corriente y frecuencia puede generar una variación entre la tensión real de la compuerta y el emisor, esto se mitiga disminuyendo las distancias y aumentando el calibre de los conductores de conexión[14].

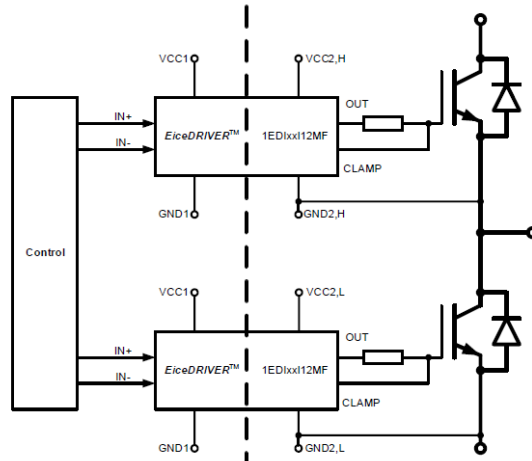


Figura 15. Esquema típico de aplicación de driver; tomado de la ficha técnica de infineon 1EDI30112MF

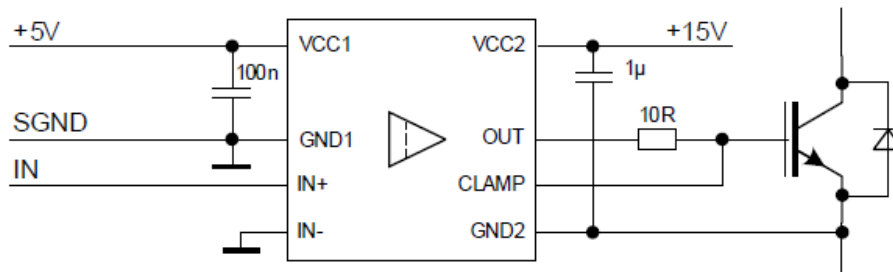


Figura 16. Ejemplo de aplicación de driver; tomado de la ficha técnica infineon 1EDI30112MF.

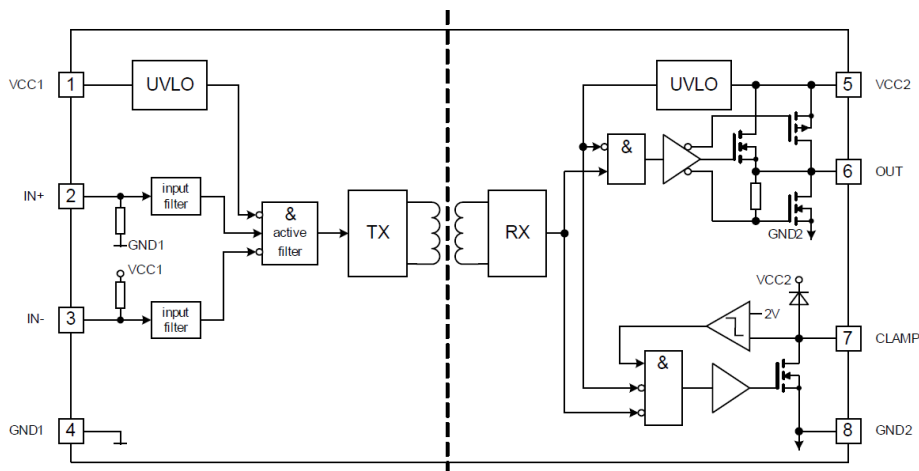


Figura 17. Diagrama de bloques definido por el fabricante; tomado de la ficha técnica de Infineon 1EDI30112MF.

De la Figura 17 se identifican los pines y las funciones del driver esta información se amplía en la Tabla 16.

# Pin	Nombre	Función
1	VCC1	Alimentación lógica positiva
2	IN+	Entrada de controlador no invertida (activa alta)
3	IN-	Entrada de controlador invertida (activa baja)
4	GND1	Tierra lógica
5	VCC2	Alimentación positiva Lado de salida
6	OUT	Salida del driver
7	CLAMP	Pinza Miller activa
8	GND2	Masa de alimentación

Tabla 16. Pines y funciones de cada uno del driver 1EDI30I12MF; tomado de la ficha técnica del fabricante de Infineon.

- **Aislamiento del Driver**

En el diagrama de la Figura 17, se puede apreciar el diagrama de bloques funcionales del driver recomendado por el fabricante INFINEON para el IGBT escogido. Una de las principales características corresponde al aislamiento galvánico de 1500 V que existe entre la señal de control (IN+, IN-), la fuente de alimentación de la entrada (VCC1, GND1) y la fuente de alimentación (VCC2, GND2) y las señales de control (OUT, CLAMP y GND2) que van directamente al IGBT.

- **Protección de baja tensión en las fuentes de alimentación**

Una de las principales protecciones de este Driver es el bloqueo por baja tensión (UVLO por sus siglas en inglés), de las fuentes de entrada (VCC1) y salida (VCC2) de este dispositivo. En la figura 19 se pueden ver los umbrales de inhibición y sus respectivas histéresis del pulso de salida cuando la tensión de VCC2 no ha llegado a un nivel mínimo V_{UVLOH2} y en el caso de VCC1 la tensión se cae por debajo del nivel V_{UVLOL1} .

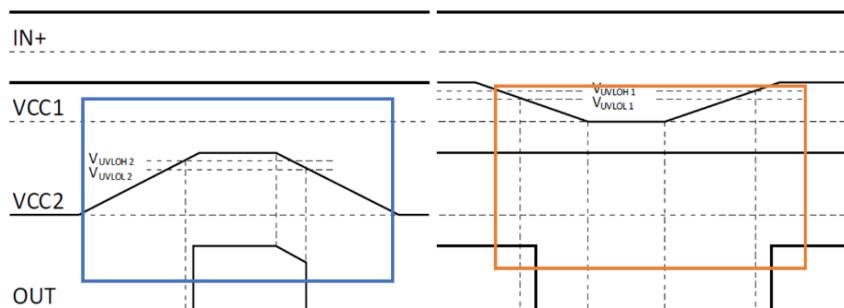


Figura 18. Comportamiento de la protección de operación del IGBT UVLO; Tomado de la ficha técnica de Infineon 1EDI30I12MF.

De esta forma se garantiza, si las fuentes de alimentación del driver no tienen los niveles adecuados el driver inhibe la señal de disparo del IGBT.

- **Apagado dinámico (Active Miller Clamp)**

Esta protección funciona en el apagado del IGBT y hace que la señal CLAMP del driver, ponga el Gate del IGBT en el nivel GND2, cuando la tensión del Gate está por debajo de 2V. El camino que ofrece el driver para hacer esto es un MOSFET que al encender ofrece una baja impedancia entre los terminales CLAPM y GND2.

Esto asegura que el IGBT se apague a pesar del efecto Miller del IGBT y que el driver no requiera fuente negativa para hacer un apagado efectivo y rápido de este.

2.6.3 Fuente aislada de alimentación

La tensión de la fuente aislada es de 15 V para V_{GE} del IGBT (VCC2-GND2), se utiliza una fuente DC-DC aislada MGFS400515 de la marca COSEL, las especificaciones técnicas se encuentran en la Tabla 17. Especificaciones técnicas de la fuente aislada COSEL; tomado de la ficha técnica de la referencia MGFS400515.

Característica- *1 minute, corriente de corte = 10mA	Valor
Tensión de entrada [V_{DC}]	4.5 - 13
Corriente de entrada[A]	6
Tensión de salida ajustable [V_{DC}]	15
Corriente de salida [A]	2
Aislamiento entre la entrada y la salida [V_{DC}]*	1500
Aislamiento entre la entrada y empaque [V_{DC}]*	1000
Aislamiento entre la salida y empaque [V_{DC}]*	1000

Tabla 17. Especificaciones técnicas de la fuente aislada COSEL; tomado de la ficha técnica de la referencia MGFS400515.

La tensión de salida de la fuente aislada se fija en 15 V para mantener las características de VCC2 definidas en la Figura 16 de la aplicación típica del driver, adicionalmente se tiene un nivel de aislamiento en el rango de los 1000 -1500 V_{DC} con base en el valor máximo de tensión proyecto con el TAP 1 de 680 V_{dc}.

2.6.4 Sistema de control de disparo

Por medio de un Arduino se diseña la interfaz de disparo y control por medio de un módulo bluetooth, esto se desarrolla teniendo presente los niveles de tensión y corriente de disparo de la lámpara, de tal forma que se garantice una distancia mínima de operación de 5 m.

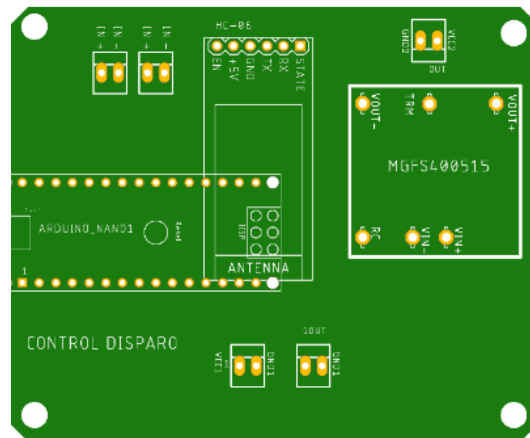


Figura 19. Esquema de distribución PCB sistema de control y fuente aislada; desarrollado en la interfaz de Eagle de autodesk.

En la Figura 19 se presenta el esquemático de PCB con la implementación de la fuente de alimentación de circuito por medio de un power bank con tensión de salida de 5 V y 600 mA, la conexión de la fuente aislada con el nivel de tensión de entrada de 5 V y tensión de salida de 15 V para el nivel la operación V_{GE} encargado del cierre y apertura del IGBT.

2.6.5 Bobina de disparo (Trigger coil)

La bobina de disparo se provee directamente por el fabricante y tiene como finalidad la ionización del gas de xenón con un pulso corto de alta tensión de 12 kV, la referencia de tensión viene desde los condensadores y la fuente de tensión AC-DC; las especificaciones de la bobina de disparo se presentan en la Tabla 18.

Característica	Valor
Tensión de entrada [V _{DC}]	300 - 500
Tensión de salida [V]	12 kV
Capacitancia de primario [μ F] _{630 V}	0,047
Resistencia de primario [Ω]	260

Tabla 18. Especificaciones técnicas de la bobina de disparo PFT-1052V; Tomado de la ficha técnica de xenon tube.

Con base en los valores de operación definidos y los puntos de conexión, se diseña la PCB mostrada en la

Figura 20.

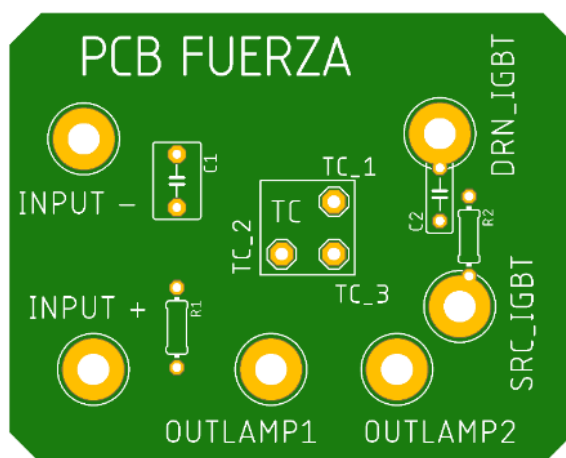


Figura 20. Esquema de conexión bobina de disparo PFT-1052V; desarrollado en la interfaz de Eagle de autodesk.

2.6.6 Calibre de los conductores

Conductores para cada una de las etapas de emulador					
Etapas	Descripción	Tensión [V]	Calibre AWG	Capacidad [A]	Tipo
Transformador	Primario	208	12	30	THHW
	Secundario	600	14 - 15	18 - 30	THHW
Rectificadores	Conexión Entrada - Salida	600	14	25	THHW
ZSBT	Conexión Entrada - Salida	600	12	30	THHW
Capacitores	Paralelo - Salida	600	6	125	Soldador
Lámpara de xenón	Conexión	600	6	125	Soldador

Tabla 19. Definición de calibre de los conductores por cada una de las etapas de conexión del emulador solar.

Los calibres de los conductores definidos están ajustados a los valores de corrientes calculados y a la capacidad geométrica del núcleo de transformador para una potencia de 5 kVA.

3. Simulación

Las simulaciones se desarrollaron con base en los cálculos definidos en la sección de diseño.

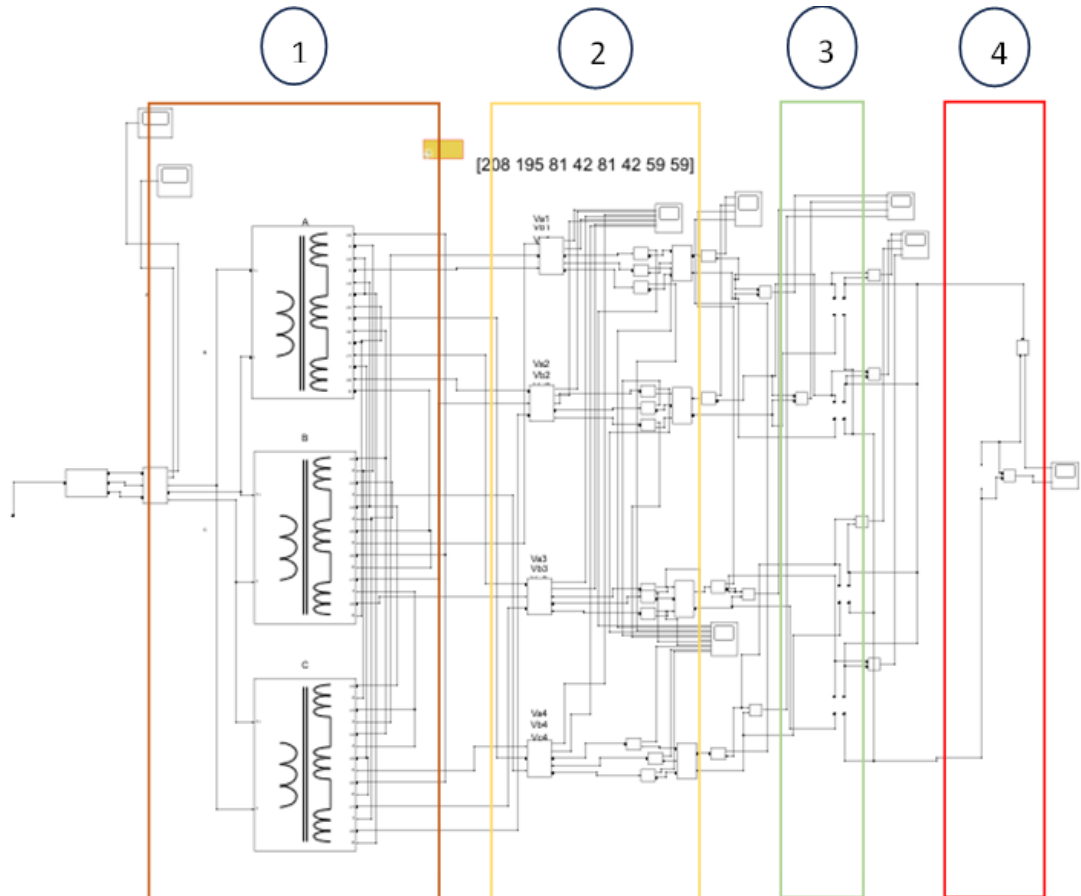


Figura 21. Modelo en MATLAB de la fuente de alimentación para la lámpara de xenón flash.

A través del entorno de bloques de Simulink del software Matlab, se creó el modelo de cada una de las etapas de diseño de la fuente de alimentación con el propósito de determinar los parámetros eléctricos relacionados con su funcionamiento en conjunto en cada una de las etapas. En la Figura 22, se definieron los parámetros de entrada de la red eléctrica de $208 V_{ac}$ con conexión en el tap 2, esto con la finalidad de obtener un nivel de tensión de salida en la carga de $400 V_{DC}$.

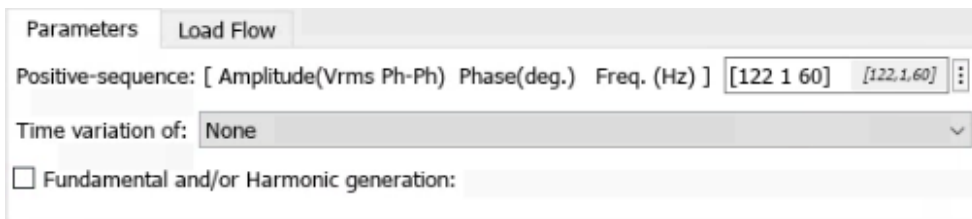


Figura 22. Parámetros de entrada para la fuente de alimentación de 12 fases.

Para el modelo del transformador en horquilla, se especifican las conexiones de las siete bobinas por cada uno de los brazos del transformador y en el secundario los valores de tensión ajustados (etapa de diseño) como se muestran en la Figura 23.

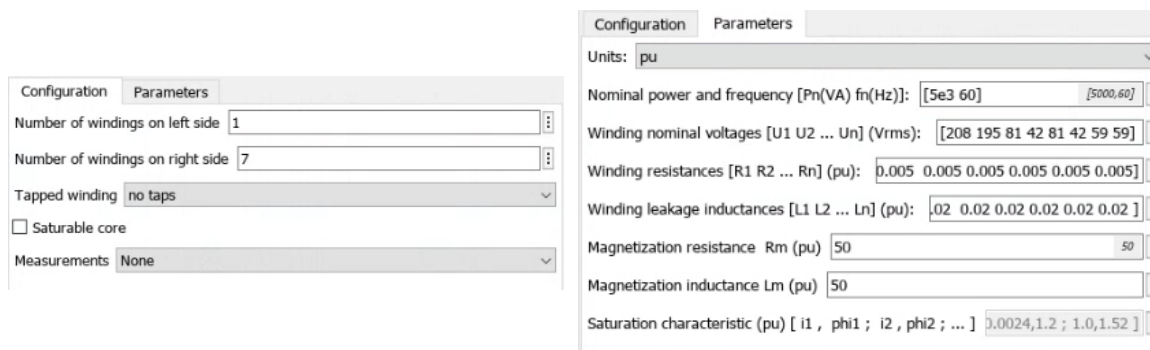


Figura 23. Parámetros de configuración en el secundario en horquilla; Desarrollado en la interfaz de Simulink de Matlab.

La configuración de los puentes rectificadores se modela con el bloque del puente rectificador trifásico generado por defecto, y ajustados con los valores declarados por el fabricante en la ficha técnica con los elementos dispuestos en la base de Simulink.

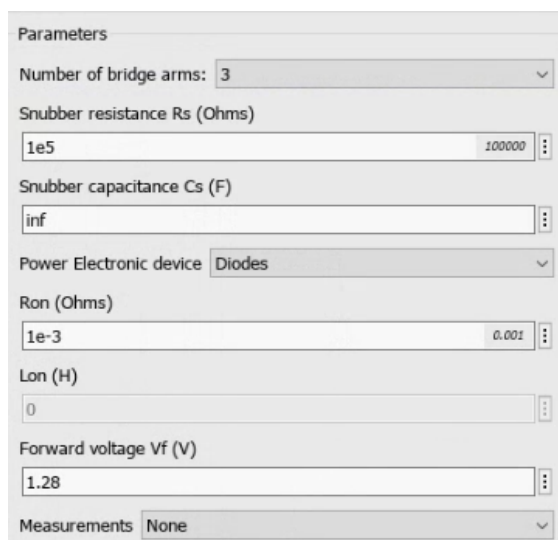
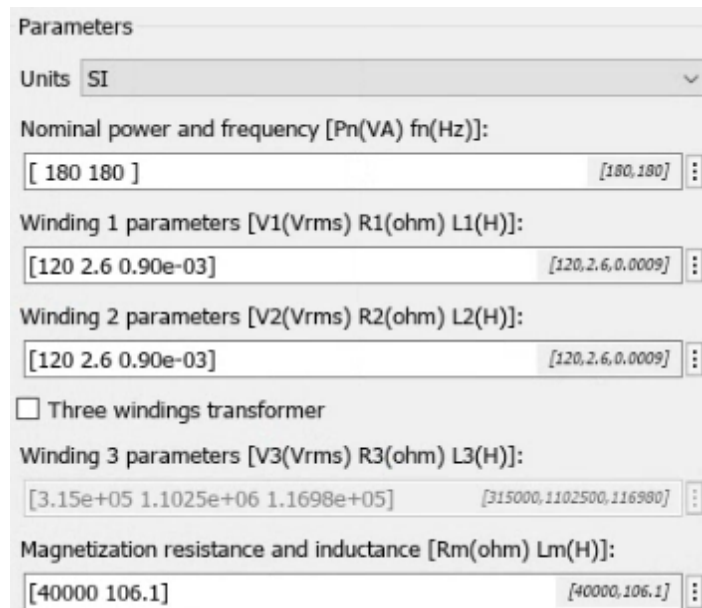


Figura 24. Parámetros de ajuste de un puente rectificador trifásico; Desarrollado en la interfaz de Simulink de Matlab

Los ZSBT se implementa por medio de transformadores de acople (1:1) con un valor de potencia de 180 VA y frecuencia 180 Hz (tres veces la frecuencia de la red eléctrica). La conexión de los puentes rectificadores trifásico de subíndice 1 y 4 con los ZSBT en los puntos centrales y los de subíndice 2 y 3 se conectan en los extremos de conexión a la carga.



Parameters

Units SI

Nominal power and frequency [Pn(VA) fn(Hz)]:
[180 180] [180,180]

Winding 1 parameters [V1(Vrms) R1(ohm) L1(H)]:
[120 2.6 0.90e-03] [120,2.6,0.0009]

Winding 2 parameters [V2(Vrms) R2(ohm) L2(H)]:
[120 2.6 0.90e-03] [120,2.6,0.0009]

Three windings transformer

Winding 3 parameters [V3(Vrms) R3(ohm) L3(H)]:
[3.15e+05 1.1025e+06 1.1698e+05] [315000,1102500,116980]

Magnetization resistance and inductance [Rm(ohm) Lm(H)]:
[40000 106.1] [40000,106.1]

Figura 25. Parámetros de ajuste ZSBT; Desarrollado en la interfaz de Simulink de Matlab. Para la verificación de la operación del conjunto, ante diferentes valores de carga, se propone la comparación de las simulaciones y pruebas de laboratorio con valores de potencia de 100, 80, 60, 40, 20 % con referencia a la potencia nominal de diseño, esta información se presenta en la sección de resultados.

Las mediciones en cada una de las etapas se presentan a continuación, con la finalidad de verificar las condiciones de operación en simulación y la comparación con el prototipo propuesto en la etapa de diseño.

3.1.1 Nivel de tensión y desfase.

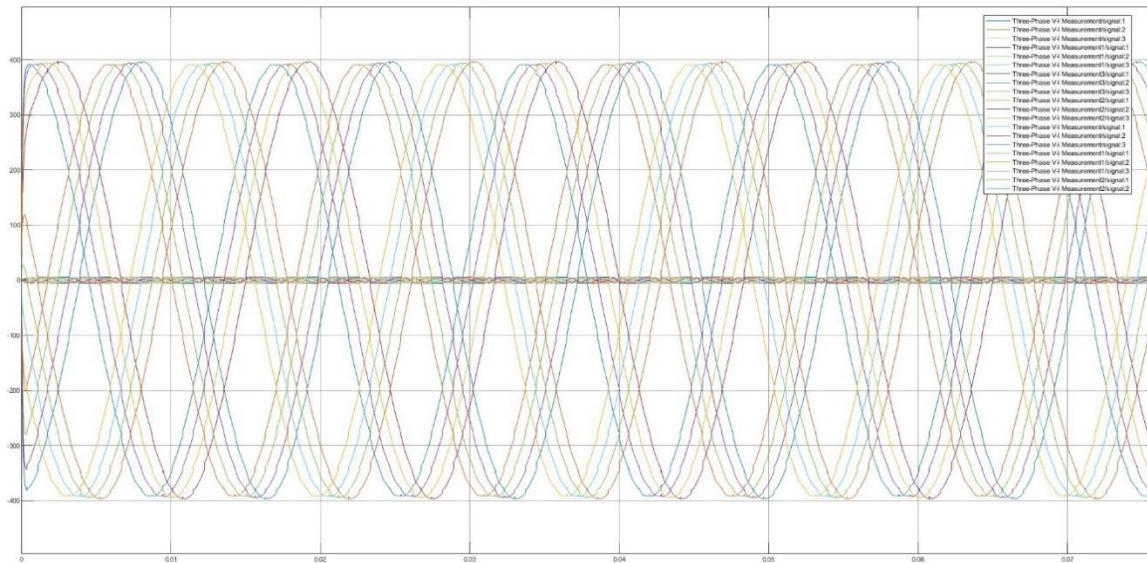


Figura 26. 12 fases de salida del transformador tipo horquilla con tensión pico de 400 V.

En la Figura 26 se observa las 12 fases de tensión de salida del transformador en horquilla, esta medición se realiza en los cuatro grupos trifásicos desfasados 120°, adicionalmente se verifica el desfase y el nivel de tensión pico en 400V.

3.1.2 Distribución de corriente puente rectificador

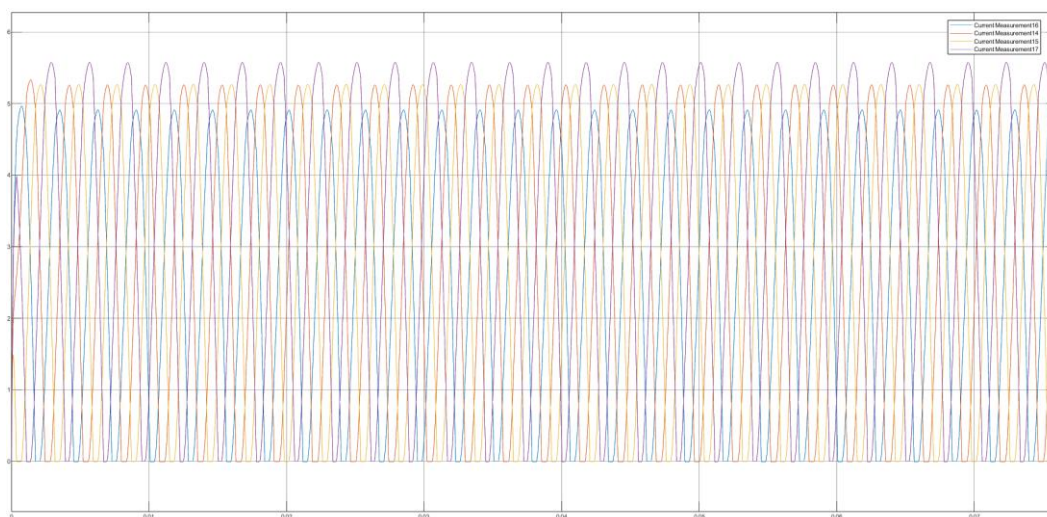


Figura 27. Corriente de salida de los cuatro puentes rectificadores con una carga de 32Ω.

En la Figura 27 se tiene la distribución proporcional de la corriente de aproximadamente 6 [A] en cada una de las salidas de los puentes rectificadores (carga conectada de 32 Ω).

3.1.3 ZSBT

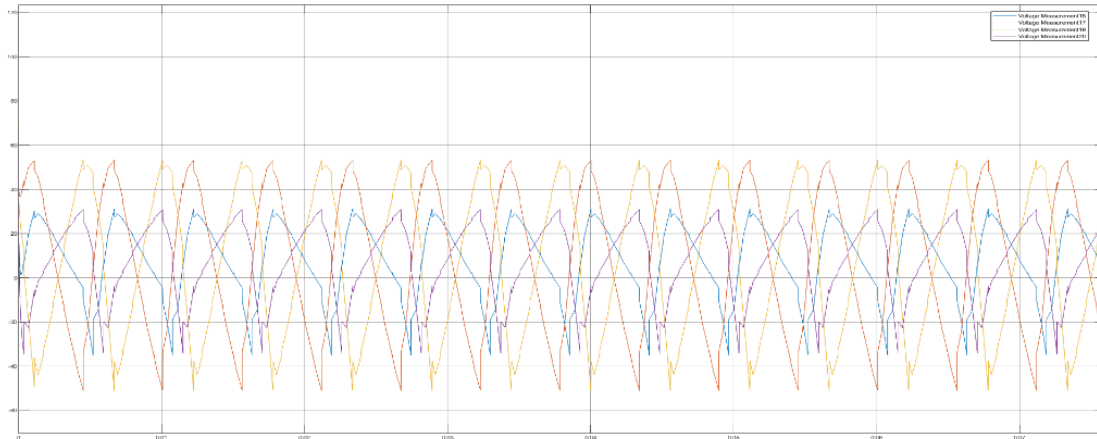


Figura 28. Tensión sobre las bobinas del ZSBT con carga de 32Ω .

Con base en la gráfica de la Figura 28, se observa la tensión sobre cada una de las bobinas de los ZSBT y con base en el desfase eléctrico de los cuatro sistemas trifásicos obtenido en el secundario del transformador, se comprueba por medio de simulación los niveles de tensión de superiores en los ZSBT de subíndice 1 y 4 en un rango de tensión entre 80 y 70V y para los sistemas de subíndice de 2 y 3 entre 50 y 40V.

3.1.4 Nivel de tensión de DC

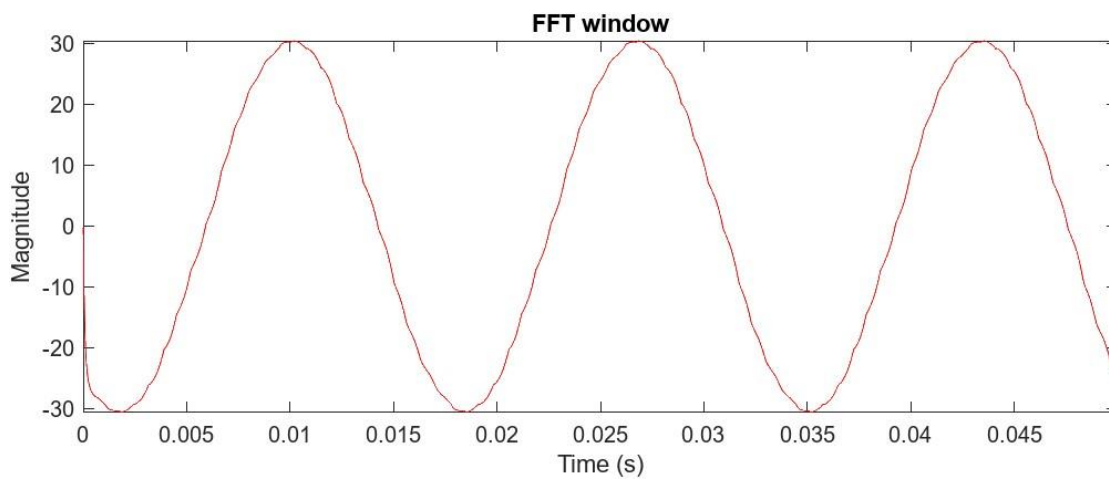
Para la medición de la tensión a la salida, se configuró una carga de 32Ω con la finalidad suministrar la potencia máxima de operación en la Figura 29, en esta figura se identifica la suma de cada una de la fuente trifásica por medio de operación de los 24 pulsos de salida en un periodo de 16,6 ms asociados a la frecuencia de la red eléctrica (60 Hz).



Figura 29. Salida de 24 pulso con nivel de tensión de 400 Vdc en el punto de alimentación TAP 2 - 208 Vac.

Adicionalmente se calcula el rizado en la salida de tensión de sistema con valores de rizado inferior al 3% con relación a la tensión nominal de operación sobre la carga de 400 V.

3.1.5 Contenido Armónico en corriente



Con base en la forma de onda de la corriente de entrada en el primario del transformador de 12 fases, se presenta la distorsión armónica para la fase B de las líneas de alimentación.

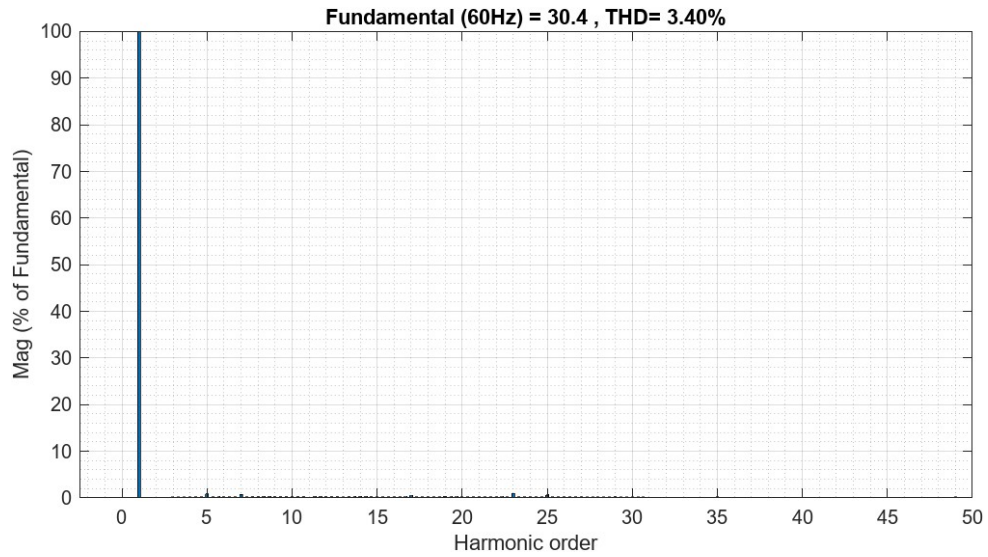


Figura 30. Distorsión armónica en corriente del primario.

En la Figura 30 se aprecia la baja distorsión armónica en la entrada, la cual es inferior al 5 % con un valor de 3,4%, siendo este el valor el más alto calculado entre las tres fases de alimentación; los armónicos 23 y 25 se pueden identificar, debido a la frecuencia de operación del sistema de 24 pulsos en la carga (Figura 31)[13][18].

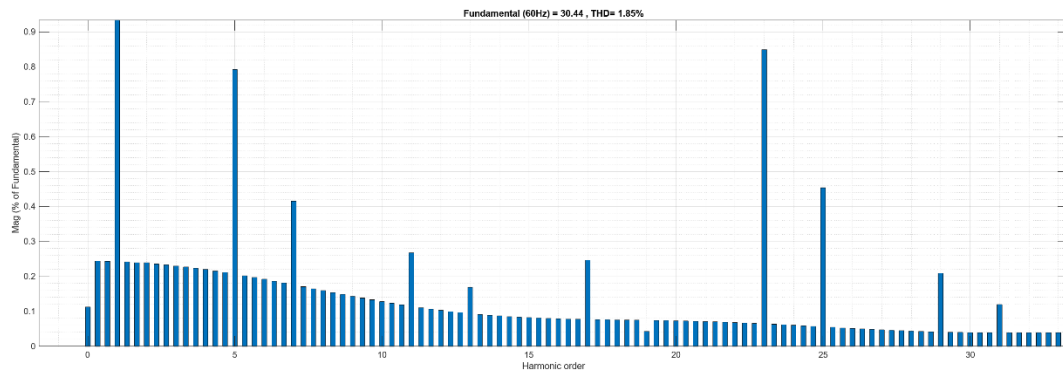


Figura 31. Componentes armónicos en corriente con mayor presencia de 23 y 25.

3.1.6 Corto circuito

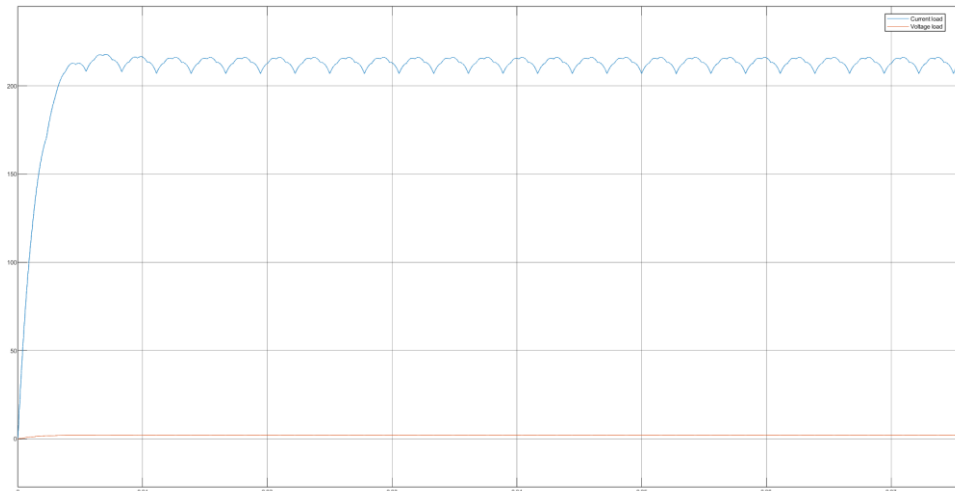


Figura 32. Simulación de corto- circuito con resistencia de $0,01\Omega$.

En Figura 32 se presenta en rojo la corriente para una resistencia de carga de $0,01\Omega$, esta corriente se asume como la corriente de corto para determinar la impedancia equivalente del sistema con relación al nivel de tensión de circuito abierto de 400V:

$$Z_{12p} = \frac{400[V]}{250[A]} = 1,7\Omega$$

Es importante identificar que este valor de impedancia representa el 0.54 de la impedancia de la lámpara de xenón, calculada en la etapa de diseño por medio del método 2.

4. Pruebas de laboratorio

En (a) de Figura 33, se observa el transformador 5 kVA y en (b) de esta misma figura, podemos identificar en la parte superior las bornas de conexión de primario con los tres TAPs para el ajuste de la tensión de salida sobre la carga, adicionalmente en la parte inferior de esta figura se observan las bornas de salida de secundarios con las 12 fases del transformador en horquilla.

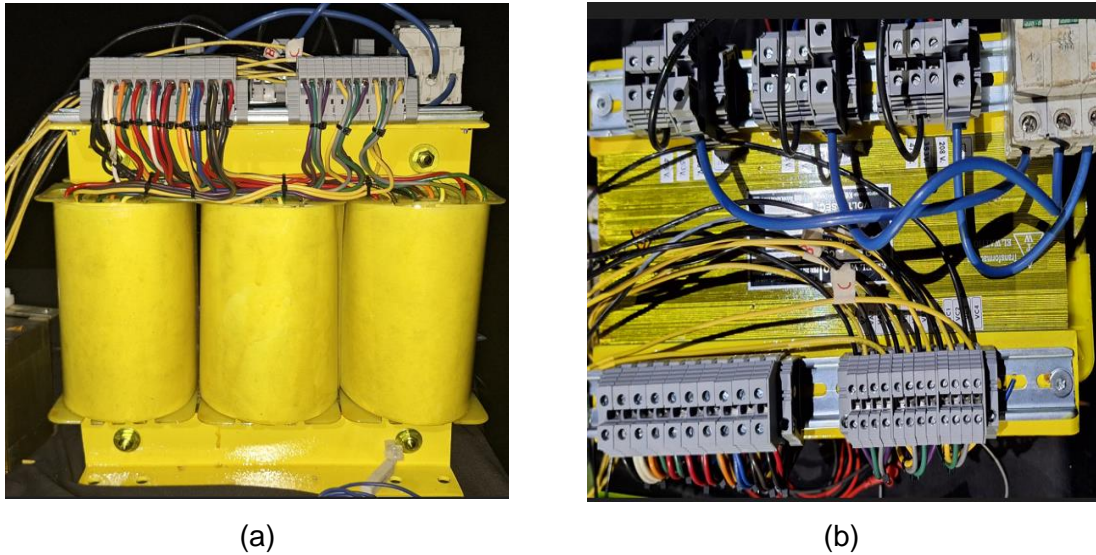


Figura 33. (a) Transformador de 12 fases con potencia de 5 kVA, (b) Entradas y salidas de conexión de primario y secundario.

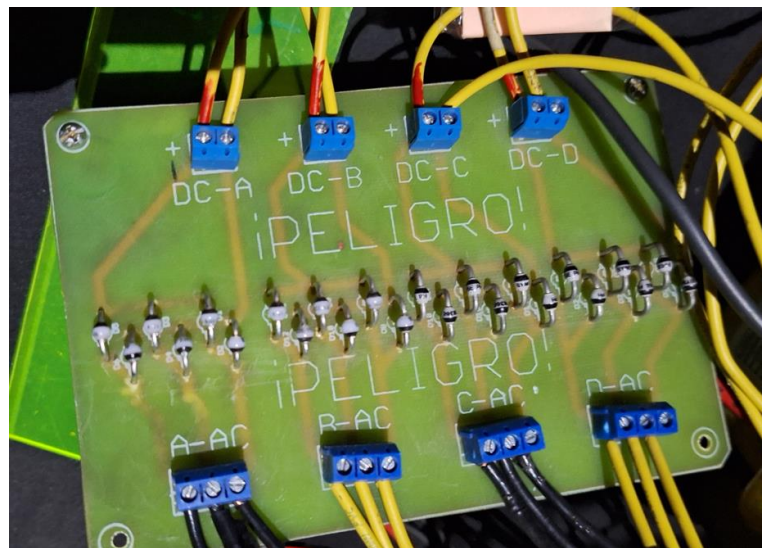
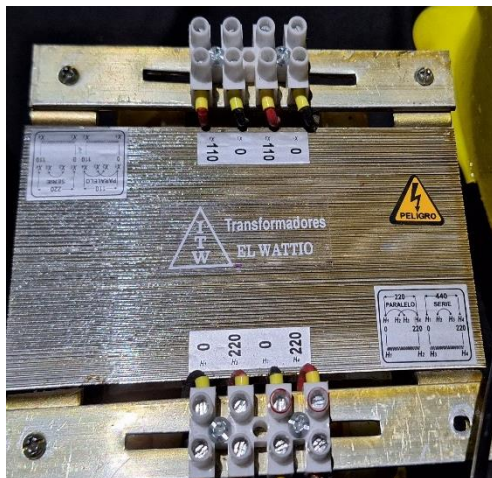


Figura 34. PCB con las bornas de conexión de los cuatro sistemas trifásico, con la configuración de los puentes rectificadores (diodos de avalancha) y salidas de conexión hacia los ZSBT.

En la Figura 34, se presenta la PCB diseñada e implementada con las entradas de los cuatro sistemas trifásico del transformador, la disposición de los diodos de avalancha para los cuatro sistemas trifásicos.



(a)



(b)

Figura 35. Transformador de interfaz implementado con entradas de 110 V y salidas 220 V de 350 VA.

Dado que se quiere verificar el respaldo de la fuente de alimentación para una carga de hasta 4 veces la potencia nominal de transformador diseñado (20 kW), se decide implementar un transformador de interfaz con características comerciales de 350 VA capacidad, este cuenta con entradas de alimentación de 110V y 220V, los cuales están dispuestos en la superior e inferior de (a) en la Figura 35 respectivamente. Por otra parte, en (b) de esta misma figura, se presentan las conexiones de los cuatro puentes rectificadores cumpliendo con la conexión de los puentes de subíndice 1 y 4 con los ZSBT centrales y los de subíndice 2 y 3 en los externos en la entrada de 220V.

En la Figura 36 se observa la conexión e implementación del IGBT infineon FF300R12KT4P y la resistencia shunt para la medición de la corriente de operación de la lámpara de xenón; en el recuadro naranja se resaltan las conexiones de negativo del banco de condensadores con uno de los IGBT (nombrado IGBT 1), es importante realizar la conexión en los terminales (cortocircuitar) de control de gate – emisor del IGBT 2, encargado de la apertura y cierre, esto con la finalidad de evitar tensiones inducidas que puedan afectar las condiciones de operación del IGBT 1 o generar tensiones de referencia, las cuales pueden provocar condiciones de disparo del IGBT 1.

Dada esta posibilidad de disparo, el driver de control cuenta con la protección de CLAMP (información descrita en la sección de diseño). En el recuadro verde está la conexión de IGBT con la resistencia Shunt cuya relación es de 500 mV/ 500A.

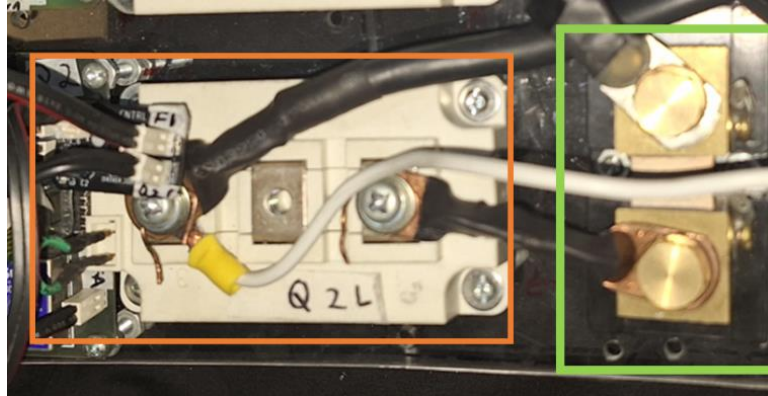


Figura 36. Recuadro naranja conexión del IGBT y recuadro verde resistencia shunt con relación 500 mV / 500 A.

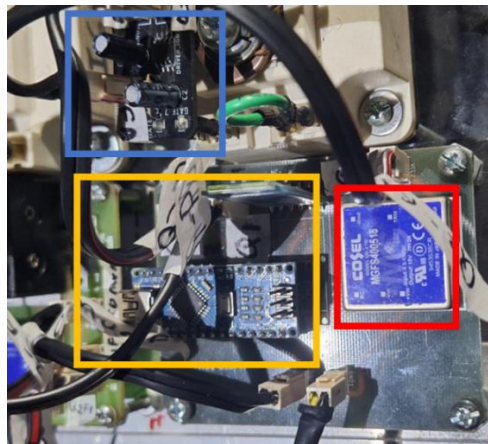


Figura 37. Recuadro azul PCB Driver control, recuadro amarillo Control de disparo por bluetooth y en rojo fuente DC-DC aislada 5 - 15 V.

En el recuadro amarillo de la Figura 37, se implementó un sistema de disparo por medio de bluetooth con la finalidad de disparar el emulador desde una distancia entre 5 y 9 metros, esta medida se adopta teniendo presente los niveles de tensión y corriente asociados a la operación de la lámpara de xenón. En el cuadro azul se observa la PCB del driver de control del IGBT 1, el cual se conecta directamente sobre los terminales del gate – emisor del bloque IGBT infineon FF300R12KT4P (IGBT 1), esto mitiga los valores de tensiones inducidas. Por último, en el cuadro rojo de la Figura 37 se resalta el convertor DC-DC aislado con alimentación de 5 V y salida de 15 V encargado de la alimentación desde el driver para la correcta apertura y cierre del IGBT 1.



Figura 38. PCB con la bobina de disparo y elementos electrónicos especificados por el fabricante.

Para ionizar el gas de la lámpara de xenón, se implementa la PCB con el circuito para la bobina de disparo como se muestra en la Figura 38, con un de tensión de referencia de 300 V y salida de 12 kV.

Se proponen el desarrollo de las siguientes pruebas de operación por separado y en conjunto:

4.1 Medición de parámetros eléctrico de fuente de alimentación

La medición de los parámetros eléctricos se realiza en a potencia nominal del transformador.

Potencia y energía				
FUND	0:00:20			
	A	B	C	Total
kW	1.65	1.66	1.67	4.98
kVA	1.65	1.67	1.68	5.00
kVAR	0.12	0.12	0.18	0.42
PF	1.00	1.00	0.99	1.00
DPF	1.00	1.00	0.99	1.00
A _{rms}	14.5	14.5	14.7	
	A	B	C	
V _{rms}	113.78	115.37	114.34	
22/10/20 13:29:37 120V 60Hz 3Ø WYE EN50160				
VOLTAGE	ENERGY		TREND	HOLD RUN

Figura 39. Parámetros eléctricos de prueba del transformador de 12 fases a plena carga.

En Figura 40 con una potencia de operación del transformador del 100 % se observa el valor de contenido armónico en corriente inferior al 5% [13][18]. Esto se complementa con la comparación en la sesión de resultados de las simulaciones y pruebas del 80, 60, 40, 20 %.

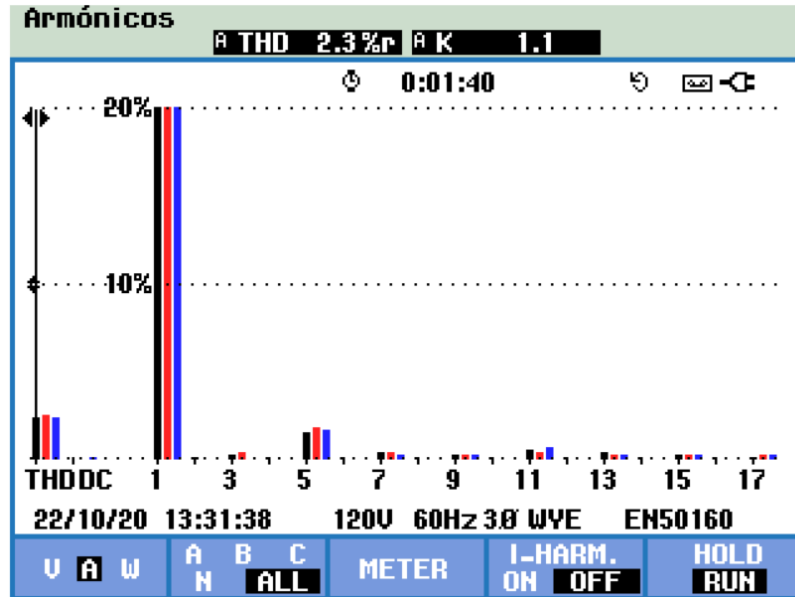


Figura 40. Contenido armónico de corriente (Thdi) medido en la entrada al 100 % de la capacidad nominal del transformador delta -horquilla.

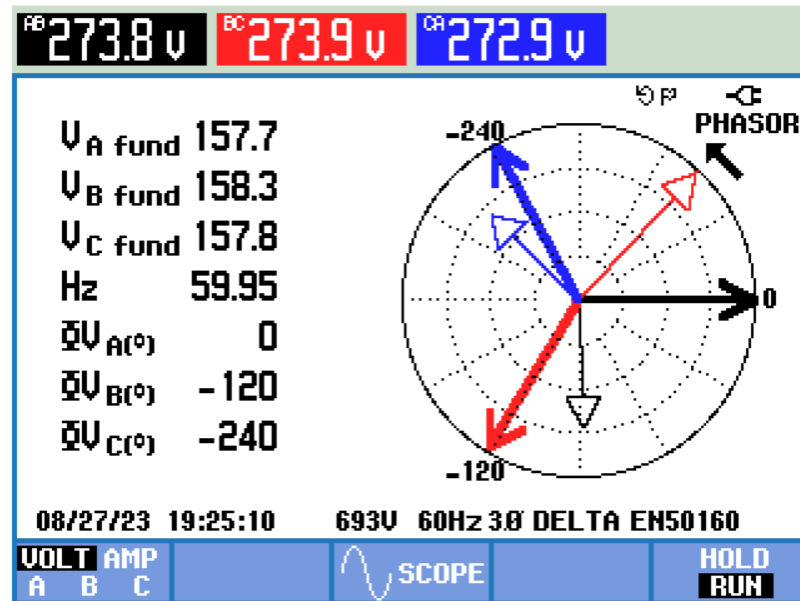


Figura 41. Desfase de salida de una de las cuatro (4) fuentes trifásicas.

En la Figura 41 se identifica la tensión de salida con tensión de fase de 273,8 V y una tensión pico de 400 V, alimentado con un sistema trifásico de 208 V en el TAP 2.

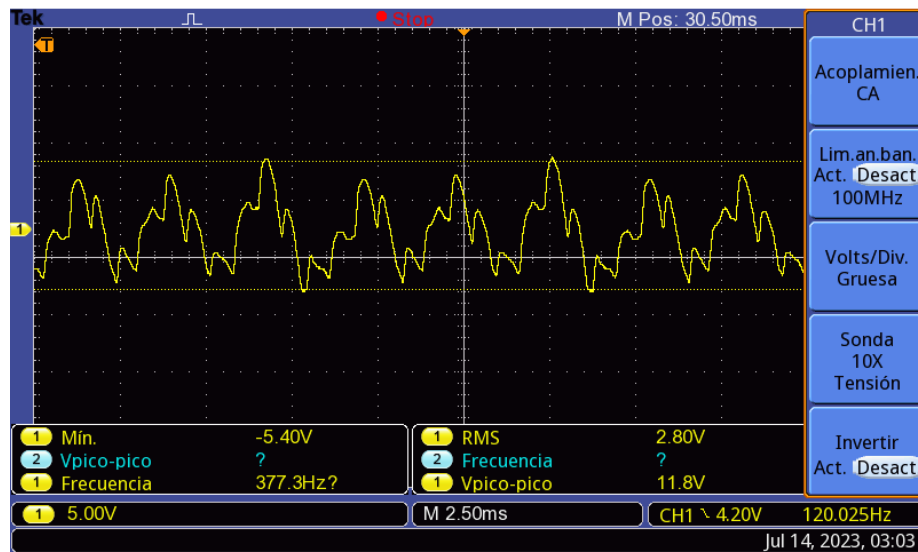


Figura 42. Salida de tensión con carga de 5kVA.

En la Figura 42, se verifica la operación de los 4 sistemas trifásicos por medio de la suma y salida de los 24 pulsos en los 16,6 ms y el valor de tensión de 2,8 V rms valor de rizado entre el 2 y 3 % con relación a la tensión de salida de 400 V.

4.2 Pruebas sistema de control

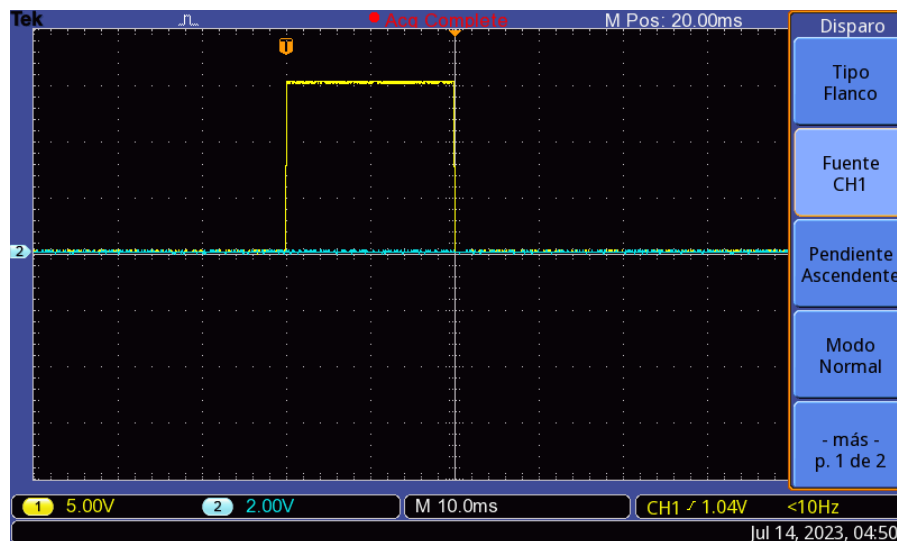


Figura 43. Prueba de sistema de control driver INFINEON.

En la Figura 43, se muestra la medición de la señal de disparo de IGBT con un tiempo de cierre de 12 ms y un nivel de tensión de 15 V_{dc} esta señal es la requerida para la alimentación del IGBT en V_{GE}.

Dado que se dispone de la señal de cierre y apertura, se efectúan mediciones de las sobretensiones ocasionadas por la apertura del IGBT, utilizando un tiempo de pulso de 12 ms y un nivel de tensión de alimentación de 297 V_{DC}. Esto permite determinar la necesidad de implementar un circuito de supresión o ayuda a la conmutación del IGBT. Estas pruebas se llevan a cabo variando el conductor de conexión entre el emisor del IGBT, el banco de condensadores y la fuente de alimentación.

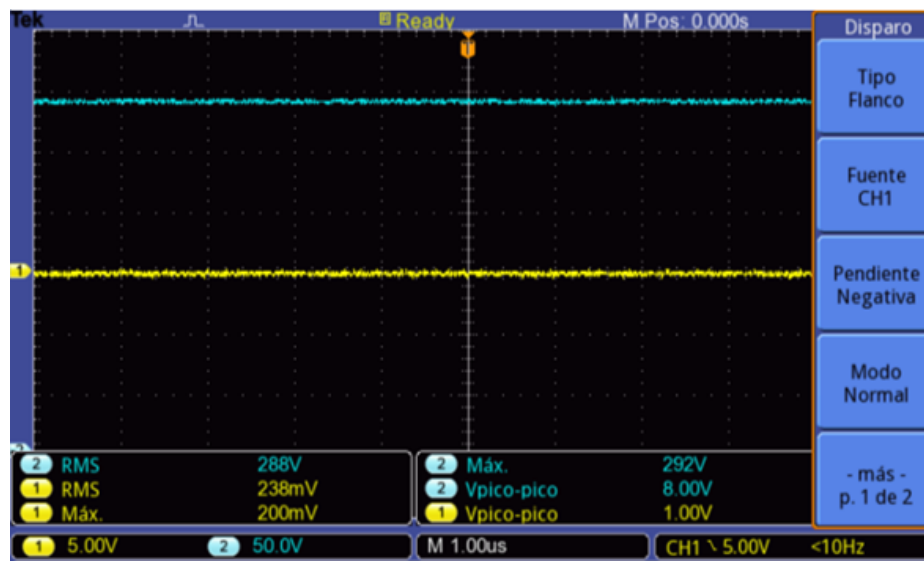


Figura 44. Señales de alimentación en azul y señal de tensión de operación del control del driver del IGBT.

En la Figura 44 se observan los valores previos al desarrollo del disparo con un nivel de tensión de la salida del driver de 0 V y un nivel de tensión de alimentación de 292 V_{DC}

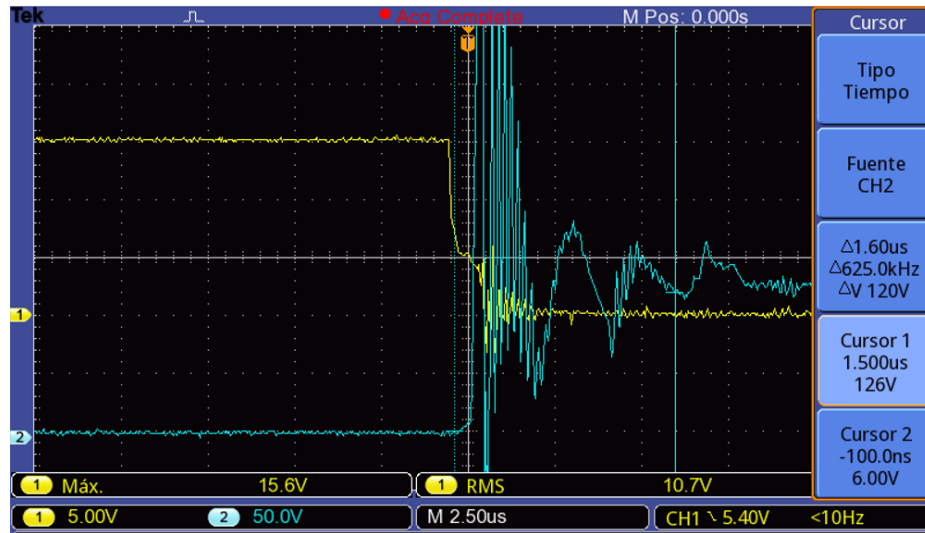


Figura 45. Nivel de sobretensión medido sobre el IGBT con los conductores de alimentación de 20 cm hacia la lámpara de xenón.

En la Figura 45 se muestra la señal de operación de 15 V, que llega a 0 V cuando se cumple con el tiempo de pulso de 12 ms. Además, en amarillo se registra el valor de sobretensión en el IGBT, con niveles de sobretensión cercanos a los 500 V. Este valor de sobretensión se obtuvo de manera similar en las 15 pruebas de operación realizadas. Es importante destacar que este nivel de sobretensión es inferior al valor de tensión inversa del IGBT.

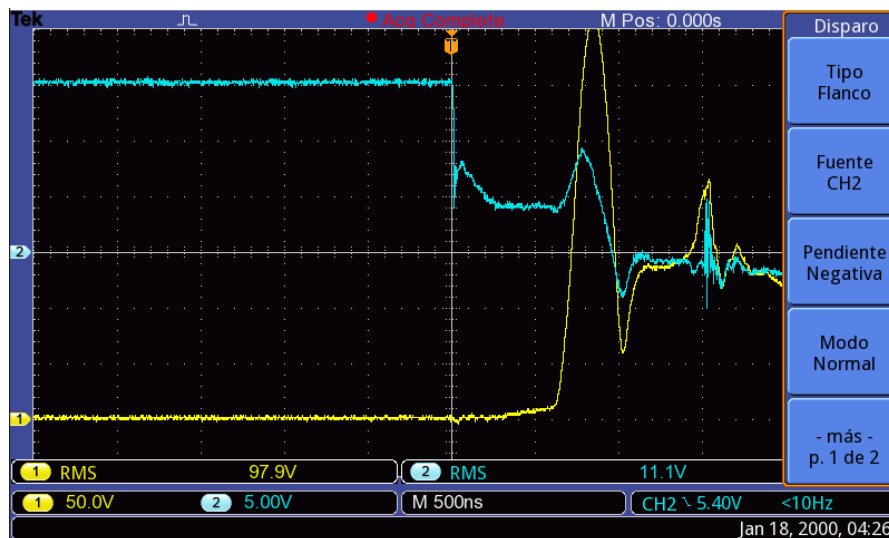


Figura 46. Respuesta de sobretensión con los conductores de 5 cm a de IGBT.

Al reducir la longitud del conductor de conexión entre el emisor, el banco de condensadores y la fuente de alimentación, se observa en la Figura 46 un valor máximo de tensión de

400V en amarillo. Este valor de sobretensión se obtuvo de manera consistente en las 15 pruebas realizadas. Una vez más, se identifica una tensión inferior a la tensión inversa del diodo del IGBT de 1200 V según la ficha técnica de fabricante.

4.3 Pruebas kanthal ®

Con la finalidad de probar la operación del sistema en conjunto, se decidió realizar pruebas de operación construyendo una resistencia con el material kanthal ® (aleación ferrítica de hierro-cromo-aluminio) dado que cuenta con características térmicas que permiten su operación en un rango de temperatura de hasta 1400 °C y de 1,45 - resistividad eléctrica a 20 °C [$\Omega \cdot \text{mm}^2 / \text{m}$].

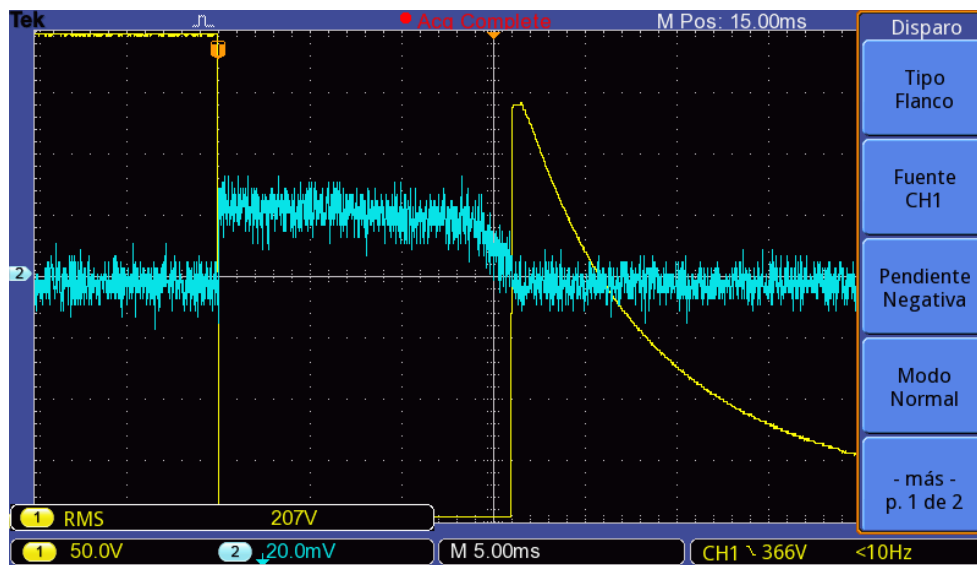


Figura 47. Medición de tensión - corriente con resistencia de 3 Ω sin fuente de alimentación - Desarrollada en kanthal emulando los valores calculados en la etapa de diseño.

Inicialmente se desarrolló el disparo del circuito sin fuente de alimentación con la resistencia de 3 Ω en un tiempo de disparo de 16 ms, sólo se contempló el arreglo de condensadores de 60 mF, el valor de la caída de tensión medido sobre el IGBT durante el pulso de 16 ms tiene un valor aproximado de 60 V pasando de 400 V a 340 V y una corriente aproximada de 230 A.

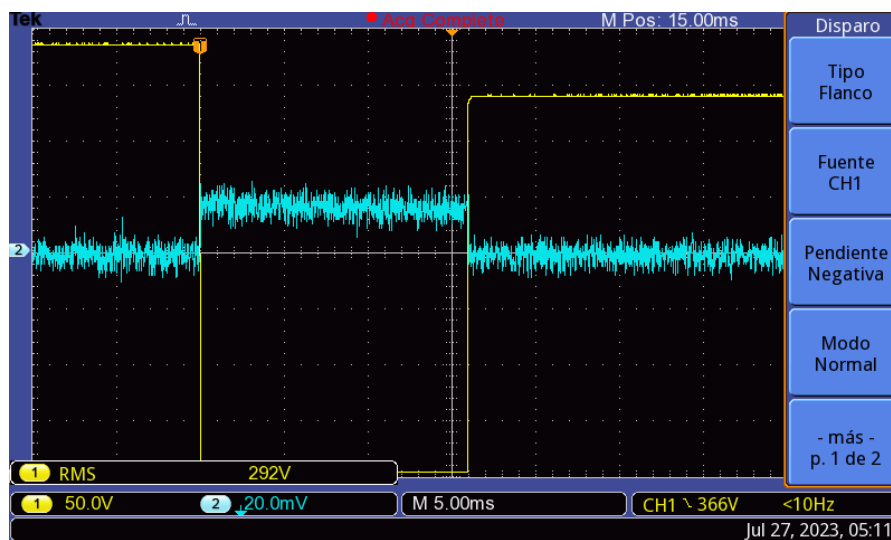


Figura 48. Medición de tensión - corriente con resistencia de 3Ω con fuente de alimentación - Desarrollada en kanthal emulando los valores calculados en la etapa de diseño.

En la Figura 48, se tiene las mediciones de tensión y corriente sobre el IGBT donde la caída de tensión en un pulso de operación de 16 ms con la implementación de la fuente de alimentación de 24 fases corresponde a un valor aproximado de 40 V pasando de 380 V a 340 V y una corriente de 230 A.

Teniendo estos resultados, se decide determinar la impedancia característica del transformador con la finalidad de calcular la máxima transferencia de energía con relación a la impedancia de sistema.

4.4 Prueba de corto circuito

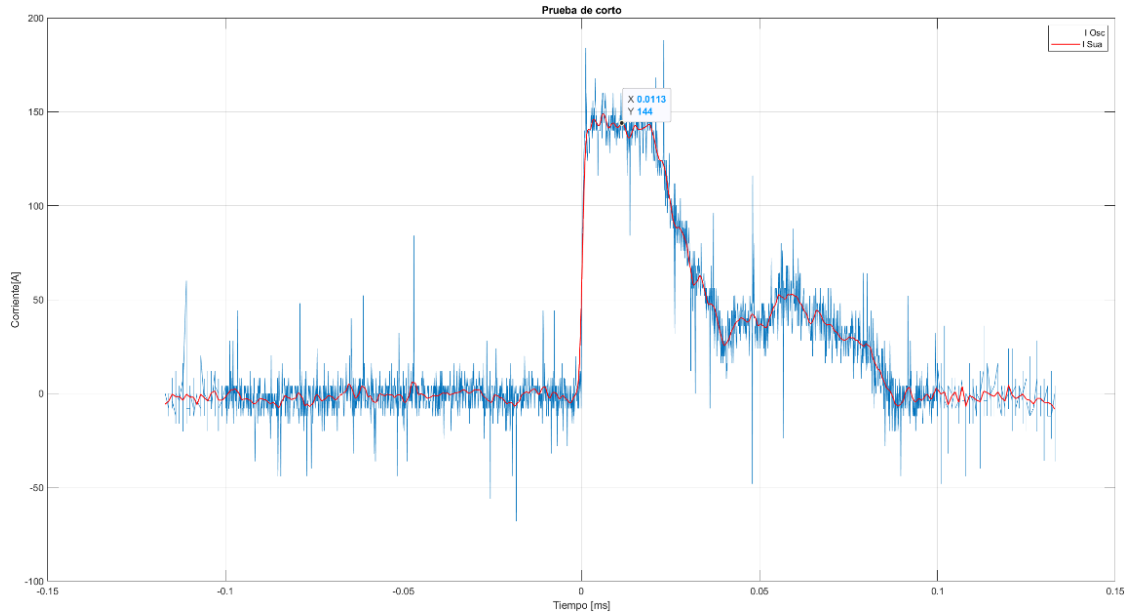


Figura 49. Corriente de corto circuito del transformador 5kVA en delta - Horquilla.

Para estimar la impedancia característica del transformador, puente rectificador y transformadores de interfaz, se realizó un corto controlado con la finalidad de medir la corriente. De la Figura 49 se determina que el valor promedio aproximado de la corriente es de 144 A. Con esta corriente se calcula la impedancia con el nivel de tensión de circuito abierto medido de 327 V.

$$Z_{12p} = \frac{327[V]}{144 [A]}$$

$$Z_{12p} = 2,27\Omega$$

Con estos resultados se identifica que la fuente de alimentación no permite un respaldo suficiente dada su potencia de diseño de 5 kVA y la impedancia característica, la cual es proporcional a la resistencia de la lámpara de xenón calculado con el método 2. Con la finalidad de determinar la equivalencia entre la impedancia de la fuente de alimentación y la lámpara de xenón, se realizan las mediciones directamente sobre la lámpara por medio del respaldo de alimentación de un banco de condensadores de 60 mF, cargados previamente con la fuente de 12 fases.

4.5 Prueba lámpara de xenón

Los resultados de las mediciones para el cálculo de la impedancia de la lámpara de xenón se muestran a continuación:

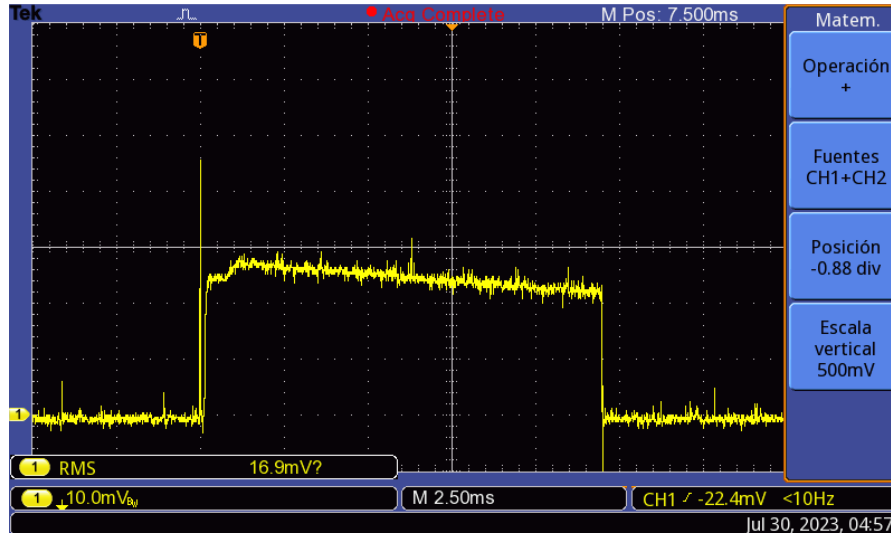


Figura 50. Medición de corriente de operación con disparo de 12 ms.

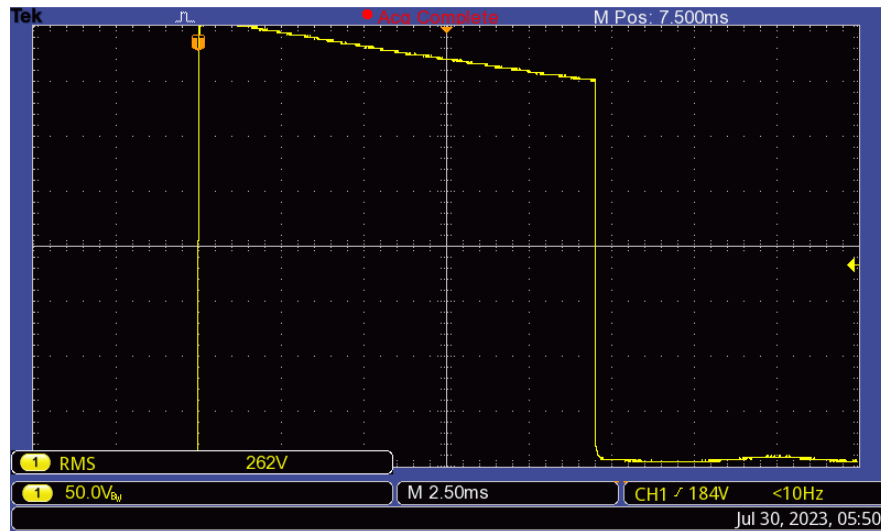


Figura 51. Medición de caída de tensión sobre la lámpara de xenón en el pulso de 12 ms.

De la Figura 50 y Figura 51 se determina valores de operación de la lámpara de 400 V y 240 A, valores medidos por separado sobre la resistencia shunt y sobre los bornes de la lámpara de xenón.

$$Z_{12p} = \frac{400[V]}{240 [A]}$$

$$Z_{12p} = 1,66 [\Omega]$$

5. Resultados

Teniendo como referencia los resultados obtenidos de las simulaciones y las pruebas de laboratorio, a continuación, se presentan por etapas:

5.1 Resultados fuente de alimentación

Con los valores definidos en la simulación y los valores obtenidos por medio de pruebas de laboratorio, se realizó la comparación de los parámetros eléctrico de operación de la fuente de alimentación con diferentes porcentajes de carga como se presenta en la Tabla 20 y Tabla 21.

Simulación 12 fases											
Carga [%]	Tensión fuente [Vrms]	Tensión TR_24 [Vrms]	Carga [Ω]	Corriente AC- ϕ [Arms]	PF	THDi [%]	Potencia [kW]	Carga [%]	Tensión DC [V]	Rizado [%]	corriente DC [A]
20	200	575,04	500	4,5	0,99	2,46	1,14	23	761	0,35	1,5
40	200	546,22	300	6,75	0,99	1,87	1,89	38	756	0,53	2,5
60	200	545,68	178	10,5	0,99	2,4	3,17	63	750	0,48	4,22
80	200	545,25	130	13,76	0,99	2,47	4,25	85	745	0,42	5,71
100	200	544,73	108	16,25	0,98	2,06	5,04	101	741,4	0,37	6,8

Tabla 20. Parámetros eléctricos de operación obtenido por simulación con diferentes porcentajes de cargas del transformador de 12 fases.

Medición transformador 12 fases											
Carga [%]	Tensión fuente [Vrms]	Tensión TR_24 [Vrms]	Carga [Ω]	Corriente AC- ϕ [Arms]	PF	THDi [%]	Potencia [kW]	Carga [%]	Tensión DC [V]	Rizado [%]	Corriente DC [A]
23,8	201,9	544,3	500,9	3,4	1	3,3	1,16	23	761,5	1,46	1,52
38,7	199,5	539,4	300	5,6	1	2,6	1,88	38	751,6	1,36	2,51
63,5	199,1	533,8	178	9,2	1	2,5	3,03	61	734,5	1,40	4,13
83	199,7	523,8	127,3	12,0	1	2,6	4,03	81	716,3	1,34	5,63
99,9	199,7	517,4	101,9	14,5	1	2,3	4,87	97	704,2	1,38	6,91

Tabla 21. Parámetros eléctricos de operación obtenido por medición en laboratorio con diferentes porcentajes de cargas del transformador de 12 fases (Mediciones de THD en el anexo a).

De acuerdo con los resultados presentados en las Tabla 20 y Tabla 21, se confirma que el porcentaje de distorsión armónica en corriente es inferior al 5%. Este porcentaje se mantiene por debajo del 5% en las diferentes condiciones de carga, dentro de un rango

que varía entre el 2% y el 4 % para el caso de simulación y la prueba de laboratorio respectivamente.

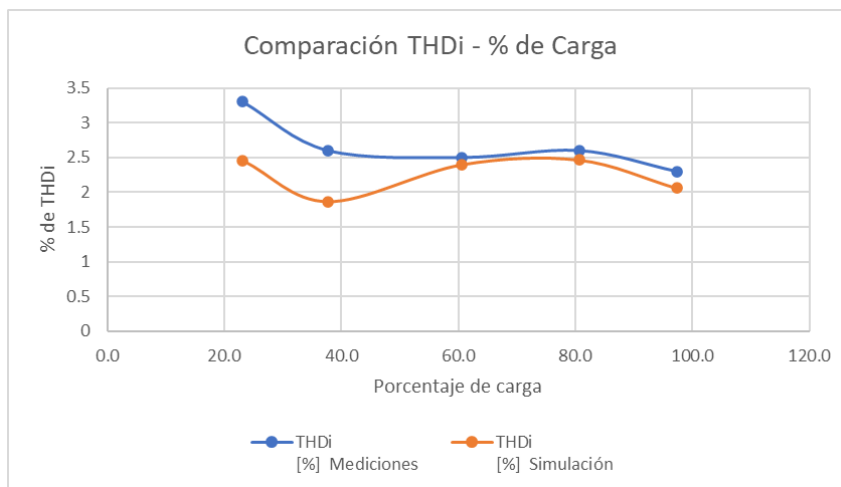


Figura 52. Comparación de THDi con los porcentajes por medio de simulación y pruebas de laboratorio.

Adicionalmente se verifica el comportamiento del contenido armónico con una carga del 100 % sobre la fuente de alimentación cuyo un valor está entre 2 y el 2,5 % tanto en simulación como en las pruebas de laboratorio Figura 52 .

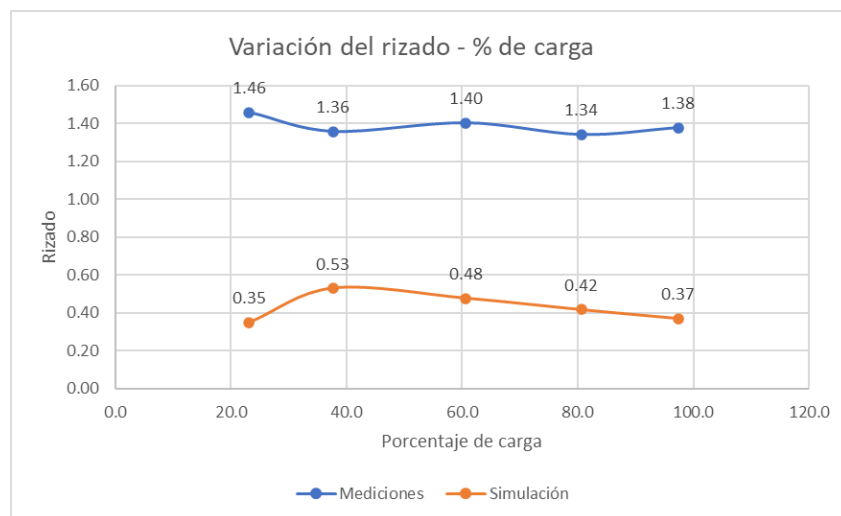


Figura 53. Comparación del rizado con la variación del porcentaje de carga en la salida de 24 pulsos con los valores obtenidos por simulación y pruebas de laboratorio.

De acuerdo con las gráficas de la Figura 53, el porcentaje de rizado está por debajo de 2 % con relación la tensión de salida de los transformadores de interfaz, este valor de rizado se ajusta a los valores definidos en la literatura para fuente de 12 fases.

5.2 Resultados modelo equivalente

Con los valores obtenidos mediante las pruebas de laboratorio, se desarrolló un modelo en Simulink con el propósito de evaluar la confiabilidad de las mediciones obtenidas tanto en el laboratorio como en el software simulink de la librería de Matlab. El modelo desarrollado se muestra en la Figura 54.

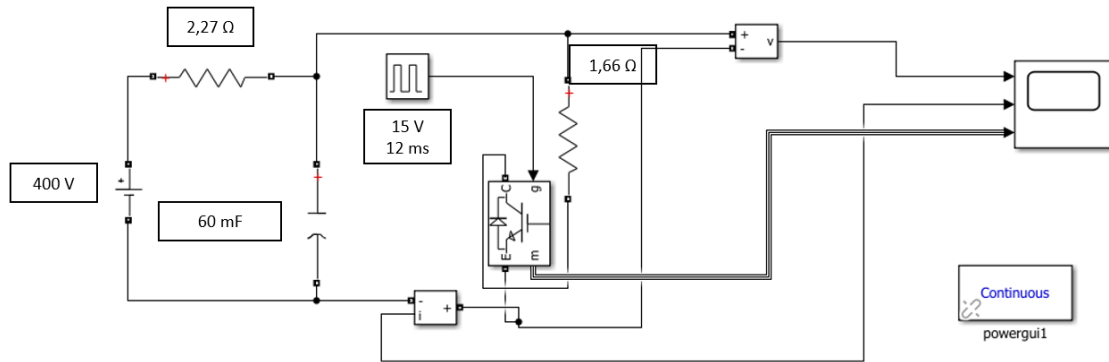


Figura 54. Modelo equivalente obtenido por medio de las pruebas en laboratorio de fuente de alimentación implementada con tensión de salida de 400V.

Para este modelo se definió un pulso de 12 ms, 400 V como condición inicial de tensión sobre el arreglo de condensadores, 2,27 Ω para la impedancia de la fuente de alimentación y una impedancia de la lámpara de xenón de 1,66 Ω como se observa en la Figura 54.

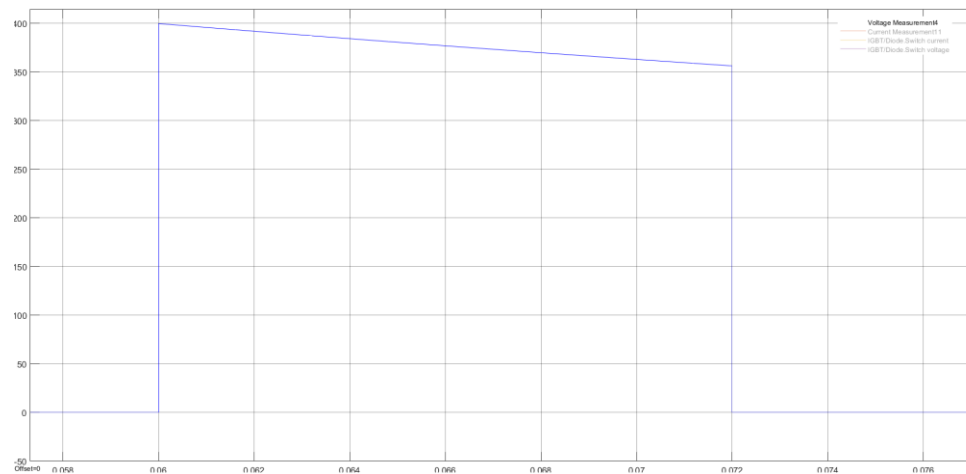


Figura 55. Caída de tensión calculado en el modelo equivalente con las impedancias calculadas en las pruebas de laboratorio.

▼ Measurements

	Time	Value
1	0.060	4.000e+02
2	0.072	3.565e+02
ΔT	12.010 ms	ΔY 4.347e+01
$1 / \Delta T$		83.267 Hz
$\Delta Y / \Delta T$		3.620 (/ms)

Figura 56. Diferencia de tensión sobre la lámpara de xenón con relación al encendido y apagado de IGBT en un pulso de 12 ms.

Con la información mostrada en la Figura 56, se define una diferencia de 43 V, calculados desde el cierre y apertura del IGBT con la fuente y el banco de condensadores.

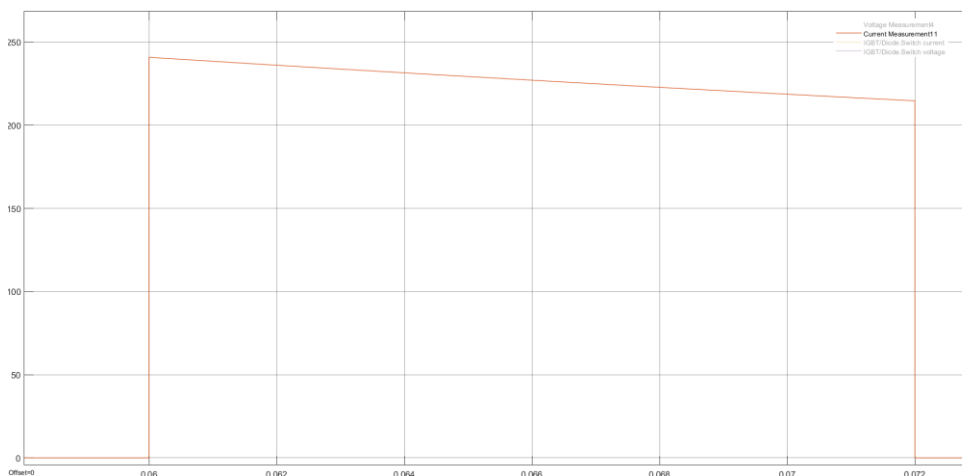


Figura 57. Resultados de la caída de corriente del modelo equivalente con las impedancias calculadas de las pruebas de laboratorio.

▼ Measurements

	Time	Value
1	0.060	2.408e+02
2	0.072	2.146e+02
ΔT	11.981 ms	ΔY 2.613e+01
$1 / \Delta T$		83.464 Hz
$\Delta Y / \Delta T$		2.181 (/ms)

Figura 58. Diferencia de corriente de alimentación de la lámpara de xenón con relación al encendido y apagado de IGBT en un pulso de 12 ms.

El valor de la corriente de operación de la lámpara cae 26 A, condición calculada de una corriente inicial de 240 A, tal como se muestra en la Figura 58.

De forma comparativa, se presentan los resultados de caída de tensión obtenidos por medio de las pruebas de laboratorio Figura 59.

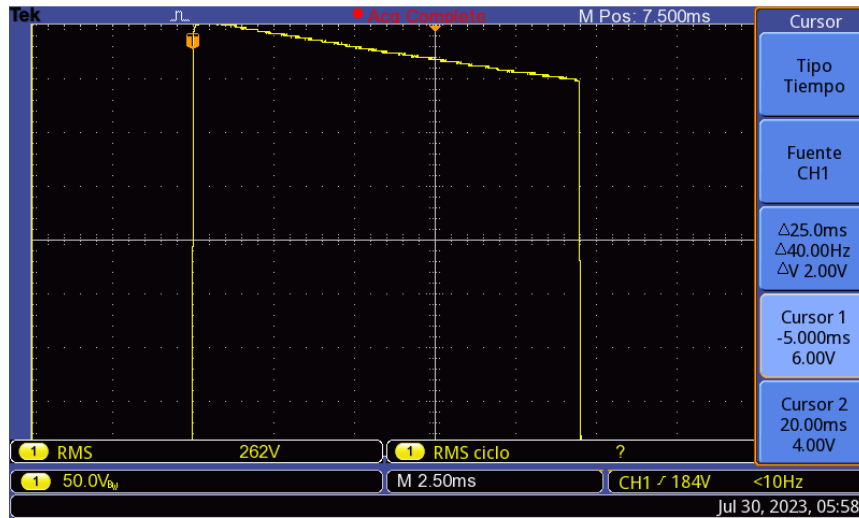


Figura 59. Caída de tensión medido sobre los terminales de conexión de lámpara de xenón en el laboratorio.

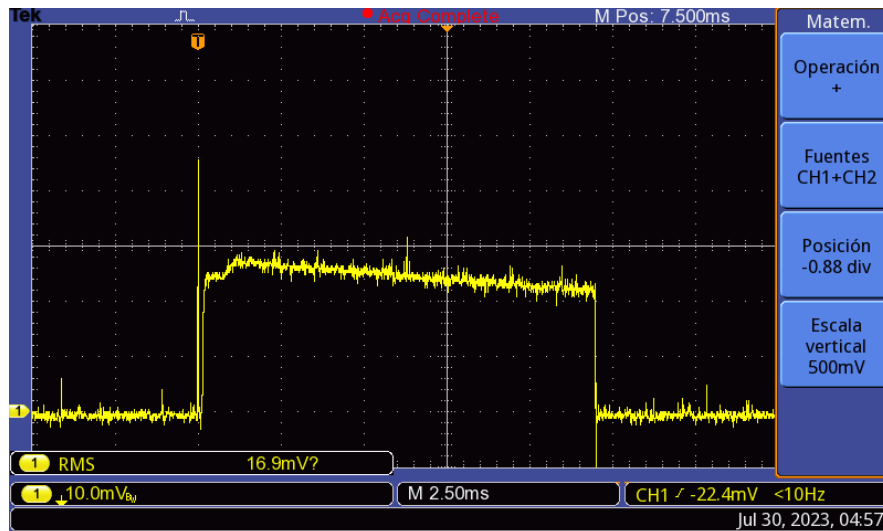


Figura 60. Caída de corriente medida en la lámpara de xenón en la prueba de laboratorio.

A partir de la simulación y las mediciones de tensión se confirma una caída de 50 V (Anexo de pruebas de caída de tensión sobre los terminales en anexo A1 y A2) y una caída de corriente 30 A en la lámpara de xenón (Figura 59 y Figura 60) durante el pulso de 12 ms. Esto refuerza los cálculos previos en los que se evidencia que el sistema de alimentación de 12 fases no es capaz de respaldar el pulso debido a la impedancia de $2,27\Omega$, asociada a las características constructivas del transformador, los puentes rectificadores y los ZSBT.

Adicionalmente, la potencia requerida para un pulso objetivo de 12 ms, con la implementación de un arreglo de capacitores de 60 mF, es de 10 kW, el doble de la potencia de diseño de la fuente en el presente estudio.

5.3 Resultados energía de destello

Por medio de las mediciones sobre la lámpara de xenón, se determina la energía de destello de esta.

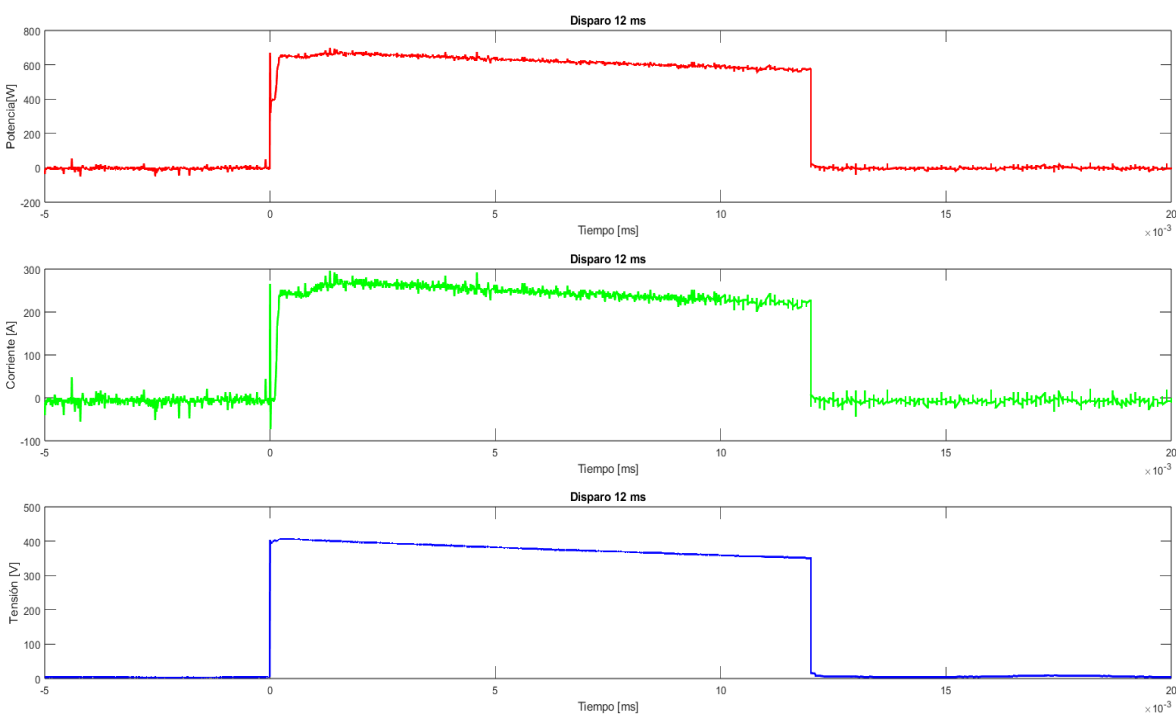


Figura 61. Resultados de operación del pulso con la conexión de la lámpara de xenón tipo flash; la potencia (rojo), la corriente (verde) y la tensión (azul).

En la Figura 61, a partir de la gráfica de potencia en color rojo, se calcula una energía de destello de 704J (mediciones de correlación de corriente e irradiancia anexo A4). Este valor de energía representa 1,17 veces la energía máxima de destello especificada por el fabricante en su ficha técnica de 600 J. Con base en esta información, se propone la implementación de sistemas alternativos de medición que permitan garantizar una medición más precisa y reducir la susceptibilidad al ruido eléctrico durante la medición de la energía de operación de la lámpara de xenón.

5.4 Resultados mediciones de irradiancia

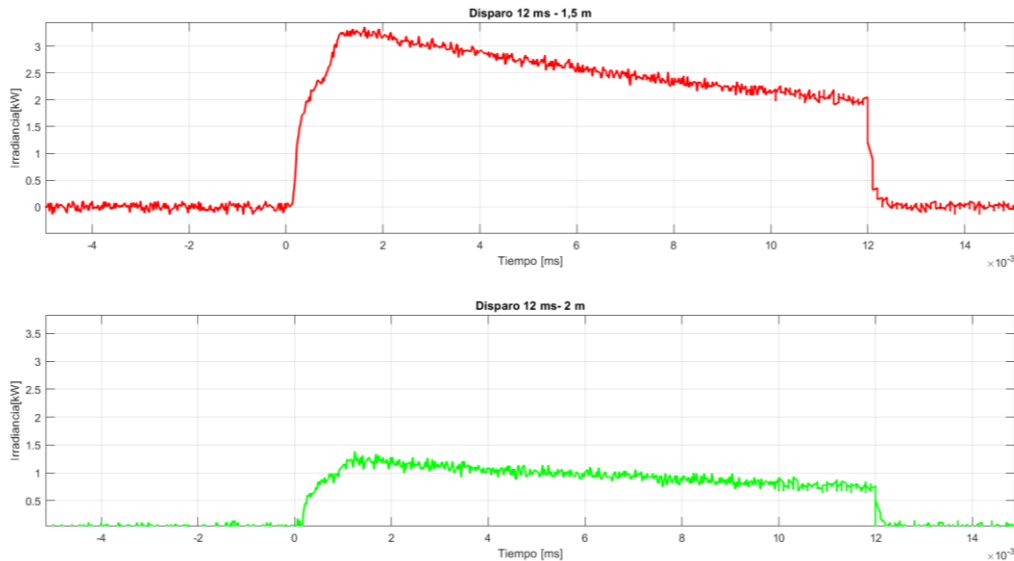


Figura 62. Medición de irradiancia medida con la celda de referencia policristalina para 1,5 y 3 m con un pulso de 12 ms.

En la Figura 62, se consigna la medición de la curva de irradiancia sobre una celda de referencia ubicada a 1,5 y 2 m. Como se puede apreciar, el valor de irradiancia está directamente relacionado con la corriente de operación de la lámpara. El valor de inestabilidad temporal se calcula para el caso de 1,5 m, donde se encuentran los valores máximos y mínimos, según se especifica en la siguiente ecuación:

$$Inestabilidad\ temporal\ (\%) = \left[\frac{3.214 - 2.086}{3.214 + 2.086} \right] \times 100\%$$

$$Inestabilidad\ temporal\ (\%) = 21\%$$

Con este porcentaje se confirma que, con esta fuente de alimentación el emulador solar no estaría clasificado en ninguno de los parámetros definidos en la IEC, ya que, para la clasificación C, la inestabilidad temporal debe ser inferior al 10%.

6. Conclusiones y recomendaciones

6.1 Conclusiones

En las etapas de desarrollo de emulador solar, la fuente de 24 pulsos implementada cumple con los parámetros eléctricos de 400 Vdc y con un rizado inferior al 3% sin condensadores, de igual forma la distorsión armónica medida en la red de alimentación es menor del 5% tal como se esperaba.

Ya en el desempeño del sistema implementado para el disparo de la bombilla Xenón de destello, se logró obtener un pulso de luz de 12 ms, que, por las pruebas realizadas, es seguro para la bombilla Xenón de destello de 600 J.

Sin embargo, la forma del pulso de luz presenta una caída en el tiempo, que básicamente se debe a la descarga de los condensadores, y que no lo hace apto para cumplir con la inestabilidad temporal definido en el estándar IEC 60904-9.

Esta situación se presenta debido a que la fuente DC no opera como la fuente principal de sistema debido a la alta impedancia característica del conjunto de transformador, rectificador de 24 pulsos, puente rectificador y transformadores de interfaz ZSBT.

Por medio de pruebas, se determinó que la impedancia de la fuente de alimentación es 1,37 veces la impedancia de la lámpara lo que conlleva a una caída de tensión cercana al 75% y de tal solo el 25% sobre el arreglo de condensadores de 60mF. Esta caída de tensión no permite mantener el pulso estable durante los 12 ms como se observa en la Figura 61 para cumplir con los criterios de clasificación del estándar IEC 60904-9.

Con base en los resultados de este trabajo, se identifica la necesidad de aumentar la potencia del transformador delta-horquilla (mejor regulación de tensión), aumentar la característica de corriente de los diodos rápidos de rectificación y ajustar los elementos de conexión para disminuir la impedancia del transformador con la finalidad de lograr la máxima transferencia de energía.

6.2 Recomendaciones para trabajos futuros

Las recomendaciones para garantizar un pulso de luz como lo solicita el estándar IEC 60904-9, se pueden enumerar de la siguiente forma:

Fuente de alimentación

- Aumento de la potencia del del transformador de 12 pulsos.
- Aumento del calibre de los conductores de primario del transformador.
- Reducir al máximo todo el cableado del sistema de rectificación y transformadores de interfaz.
- Disminuir la distancia entre las pistas de conexión de los puentes rectificadores.

Circuito control

- Inhibición del disparo de la bobina de ionización de la lámpara Xenón de destello por medio de un interruptor o microcontrolador para evitar disparos indeseados.
- Sistema de monitoreo de las condiciones previas al disparo como tensión colector - emisor del IGBT y tensión de los condensadores.
- Verificar mediante un microcontrolador que la tensión colector-emisor este en el rango de encendido definido por el fabricante o de lo contrario generar apagado automático.
- Dado que no se generan pulso continuos de operación no se implementó el disipador de temperatura para el IGBT, y con la finalidad de tener un sistema de control robusto, se propone la implementación para el IGBT.

Bibliografía

- [1] A. Samimi and S. Zarinabadi, "Reduction of Greenhouse gases emission and effect on environment," *J. Am. Sci.*, vol. 8, no. 8, 2012, [Online]. Available: <http://www.americanscience.org><http://www.americanscience.org>editor@americanscience.org.
- [2] N. L. Panwar, S. C. Kaushik, and S. Kothari, "Role of renewable energy sources in environmental protection: A review," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 15, no. 3, pp. 1513–1524, 2011, doi: 10.1016/j.rser.2010.11.037.
- [3] D. L. King, W. E. Boyson, and J. A. Kratochvil, "Analysis of factors influencing the annual energy production of photovoltaic systems," pp. 1356–1361, 2003, doi: 10.1109/pvsc.2002.1190861.
- [4] C. R. Osterwald, T. W. Cannon, D. R. Myers, T. Glatfelter, W. Czubytyj, and J. Yang, "Methods for Measuring Solar Cell Efficiency," *Sol. Energy*, no. c, pp. 623–628, 1985.
- [5] N. Kishor, M. G. Villalva, S. R. Mohanty, and E. Ruppert, "Modeling of PV module with consideration of environmental factors," in *2010 IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Conference Europe (ISGT Europe)*, Oct. 2010, pp. 1–5, doi: 10.1109/ISGTEUROPE.2010.5638902.
- [6] M. Bliss, T. R. Betts, and R. Gottschalg, "Advantages in using LEDs as the main light source in solar simulators for measuring PV device characteristics," *Reliab. Photovolt. Cells, Modul. Components, Syst.*, vol. 7048, p. 704807, 2008, doi: 10.1117/12.795428.
- [7] I. 60904-9, International Standard International Standard, vol. 2003. 2003, p. 13.
- [8] V. Esen, Ş. Sağlam, and B. Oral, "Light sources of solar simulators for photovoltaic devices: A review," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 77, no. March, pp. 1240–1250, 2017, doi: 10.1016/j.rser.2017.03.062.
- [9] G. Leary, G. Switzer, G. Kuntz, and T. Kaiser, "Comparison of xenon lamp-based and led-based solar simulators," *2017 IEEE 44th Photovolt. Spec. Conf. PVSC 2017*, pp. 6–9, 2017, doi: 10.1109/PVSC.2017.8366725.
- [10] R. J. Matson, K. A. Emery, and R. E. Bird, "Terrestrial solar spectra, solar simulation and solar cell short-circuit current calibration: A review," *Sol. Cells*, vol. 11, no. 2, pp. 105–145, 1984, doi: 10.1016/0379-6787(84)90022-X.
- [11] W. Wang and B. Laumert, "Simulate a 'Sun' for Solar Research: A Literature Review of Solar Simulator Technology," pp. 1–37, 2014.
- [12] J. C. Campo, M. A. Perez, J. M. Mezquita, and J. Sebastian, "Circuit-design criteria for improvement of xenon flash-lamp performance (lamp life, light-pulse, narrowness, uniformity of light intensity in a series of flashes)," pp. 1057–1061, 2002, doi: 10.1109/apec.1997.575780.
- [13] N. Selvaganesan and S. Lecturer, "A 24-Pulse AC-DC Converter For Improving Power Quality Using Fork Connected Transformer," no. June, pp. 1–8, 2009.
- [14] H. D. Division, "Xenon Flash Light IGBT Application Note," 2014.
- [15] J. R. Oliver and F. S. Barnes, "A Comparison of Rare-Gas Flashlamps," *IEEE J. Quantum Electron.*, vol. 5, no. 5, pp. 232–237, 1969, doi: 10.1109/JQE.1969.1075765.
- [16] J. Fiz, "Study of Single-Mesh LC Flashlamp Driving Circuit for Xenon Flashlamp," vol. 3, pp. 95–98, 2008.
- [17] H. Akiyama, M. Kristiansen, H. Krompholz, and B. Maas, "Current-Voltage Characteristics

- of a High-Current Pulsed Discharge in Air," *IEEE Trans. Plasma Sci.*, vol. 16, no. 2, pp. 312–316, 1988, doi: 10.1109/27.3830.
- [18] W. Yao, F. Blaabjerg, X. Zhang, Y. Yang, and Z. Gao, "Zero sequence blocking transformers for multi-pulse rectifier in aerospace applications," *2014 IEEE Energy Convers. Congr. Expo. ECCE 2014*, pp. 999–1006, 2014, doi: 10.1109/ECCE.2014.6953508.
- [19] D. F. D. Narváez, "Modelado de un convertidor ca/cc trifásico para el análisis de la distorsión armónica .," p. 82, 2011.
- [20] Limones Pozos Cesar A and Mendoza Rivera José, "Diseño De Un Rectificador Trifásico Con Convertidor Reductor," *ResearchGate*, no. August, 2019.

Anexo: Mediciones del prototipo

A1. Contenido armónico con relación a la carga de operación de transformador de 12fases.

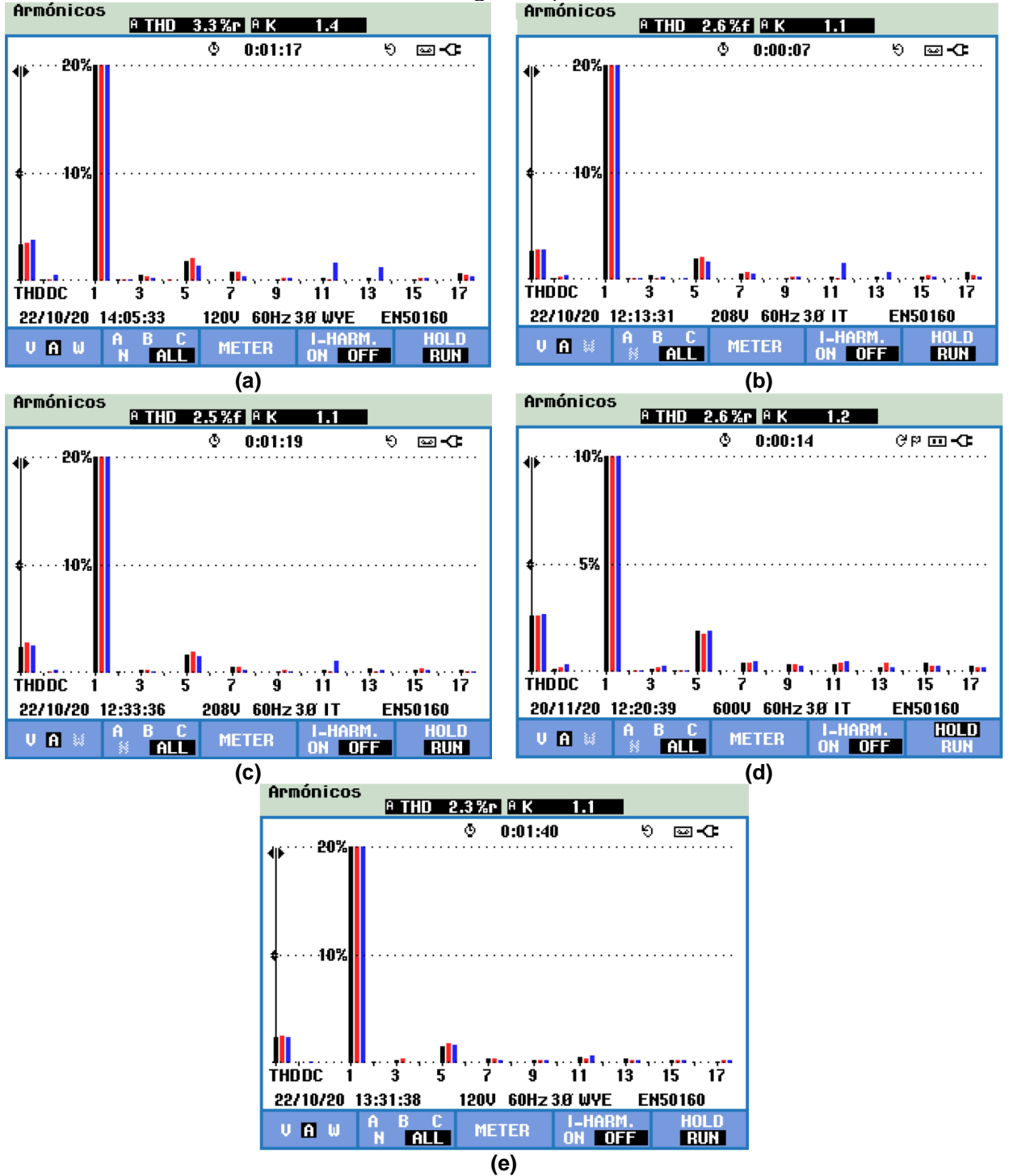


Figura 63. Mediciones de contenido armónico de transformador en condiciones de carga de: (a) 23,8 %; (b) 38,7 %; (c) 63,5 %; (d) 83 %; (e) 99,9 %.

A2: Medición de corrientes de operación lámpara de xenón.

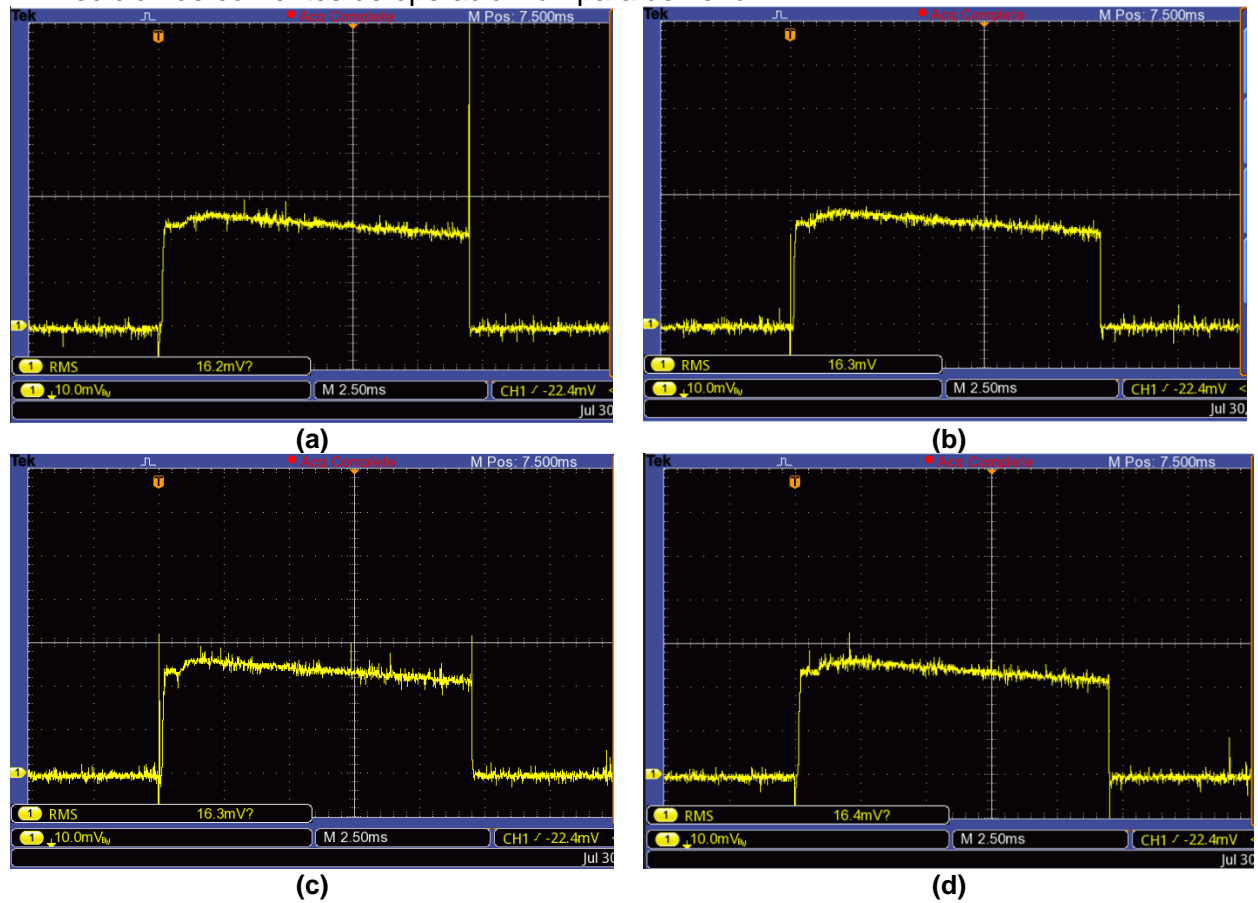
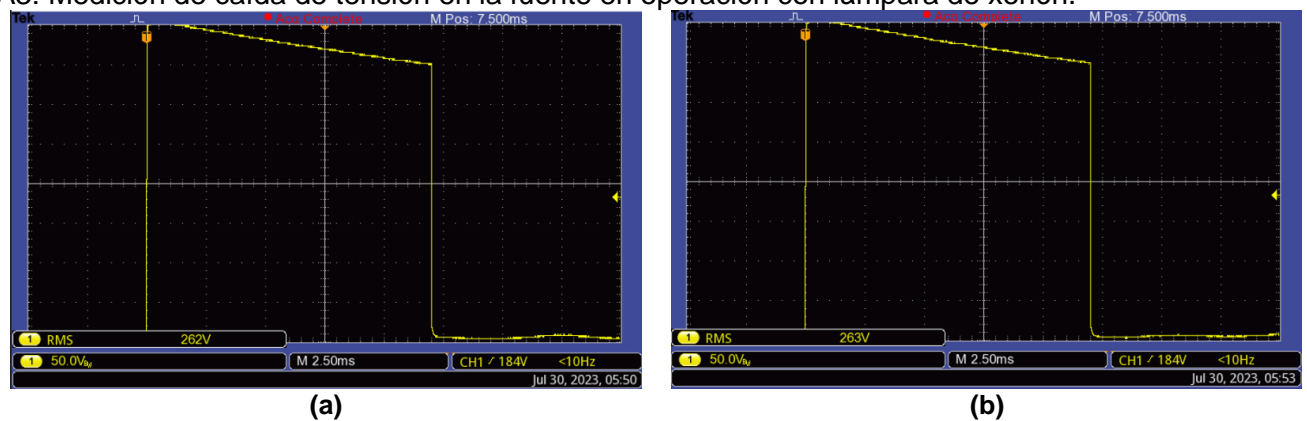
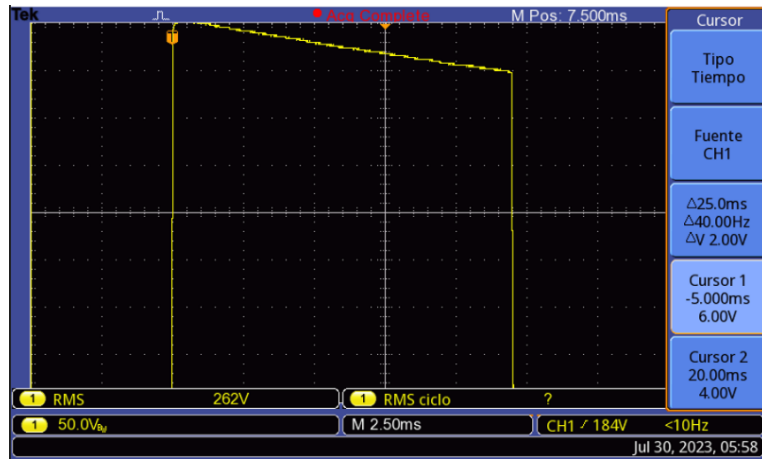


Figura 64. Mediciones de corrientes de resistencia shunt por separado

A3: Medición de caída de tensión en la fuente en operación con lámpara de xenón.

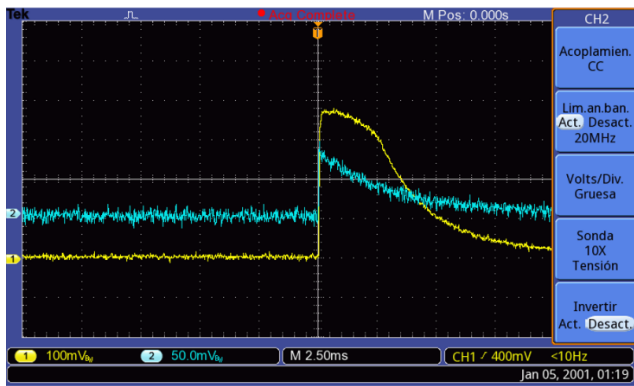




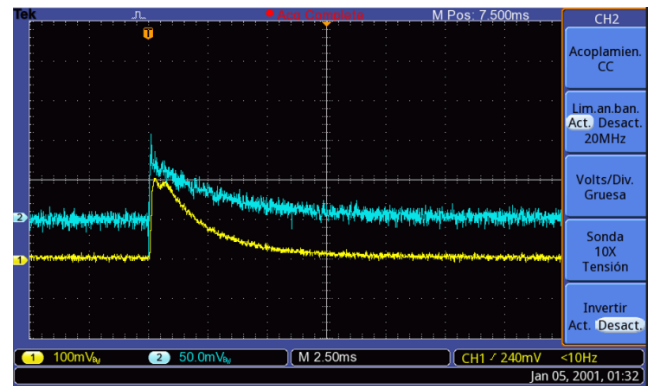
(c)

Figura 65. Medición de tensión en los bornes de la lámpara de xenón.

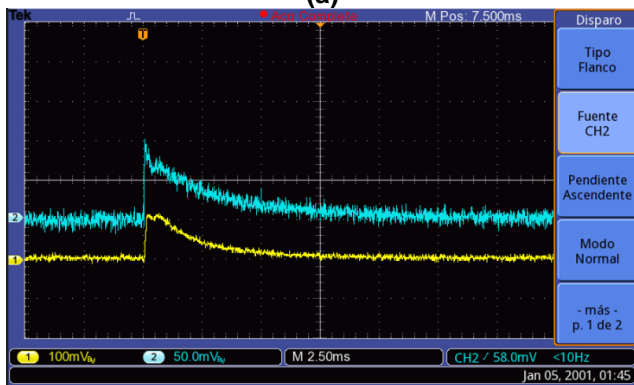
A4: Correlación de corriente e irradiancia en 4 distancias medidas desde la fuente de emisión.



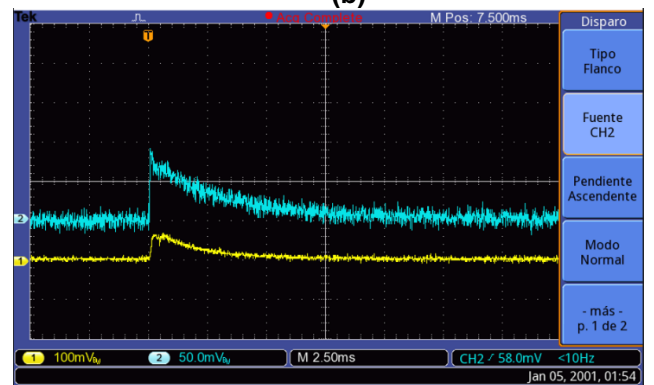
(a)



(b)



(c)



(d)

Figura 66. Medición de corriente e irradiancia para: (a) 1 m; (b) 2 m (c) 3 m (d) 4 m.