



SAN LUIS POTOSÍ. S.L.P. 08/septiembre/2020

SECCIÓN: DIV. ESTUDIOS DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN  
OFICIO: D.E.P.I. /079  
ASUNTO: AUTORIZACIÓN DE IMPRESIÓN.

**ING. MIGUEL ANGEL MEDINA GOVEA**  
**ALUMNO DEL PROGRAMA DE MAESTRÍA EN ING. ELECTRÓNICA**  
**PRESENTE.**

El que suscribe, Jefe de la División de Estudios de Posgrado e Investigación, por este medio me permito comunicar a Usted que se autoriza la impresión de su trabajo de tesis titulado: **"DISEÑO Y SIMULACIÓN DE BANCO DE PRUEBAS PARA TIRISTORES DE ALTA POTENCIA"**, para que con ello pueda usted continuar con los trámites para la obtención de su grado de Maestro en Ingeniería Electrónica.

Lo anterior de conformidad con el dictamen emitido favorablemente por los integrantes del H. Jurado Revisor, integrado por:

- DR. EFRÉN FLORES GARCÍA**  
Presidente
- DR. RAMÓN DÍAZ DE LEÓN ZAPATA**  
Secretario
- DR. SAÚL ALMAZÁN CUÉLLAR**  
Vocal Propietario
- DR. ARIEL BENJAMÍN DE LA ROSA ZAPATA**  
Vocal Suplente

**ATENTAMENTE.**

**"CON TECNOLOGÍA Y ESPÍRITU UNA PATRIA FORJARÉ"**

**DR. ARIEL BENJAMÍN DE LA ROSA ZAPATA**  
**JEFE DEL DEPTO. DE LA DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN DEL ITSLP.**

C. C. P. ARCHIVO



Instituto Tecnológico de San Luis Potosí

**DEPARTAMENTO DE LA DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN**



## Instituto Tecnológico de San Luis Potosí



**Diseño y simulación de banco de pruebas para tiristores de alta potencia.**

**Presenta:**

Ing. Miguel Angel Medina Govea

**Asesor de proyecto:**

Dr. Efrén Flores Garcia

1	Introducción .....	3
1.1	Descripción del problema .....	5
1.2	Objetivo .....	11
1.3	Alcance del proyecto.....	11
1.4	Justificación.....	11
1.5	Marco teórico .....	12
1.6	SCR introducción .....	13
1.7	Revisión del estado del Arte .....	15
1.7.1	Modelo de pruebas K. Itoh, Y. Tsunoda, K. Akabane, H. Kashiwazaki.....	15
1.7.2	Modelo de pruebas Q. Li, P. Xing, X. Zhang .....	16
1.7.3	Modelo de pruebas H. Nakao, Y. Akagoshi, M. Hatano y H. Miyata 17	
2	Análisis.....	19
2.1	Dispositivo bajo prueba (DBP) SCR Infineon T2563N75. ....	20
2.2	Equipos de prueba en el mercado.....	21
2.3	Alto voltaje para DBP.....	21
2.4	Sistema de presión mecánica.....	23
2.5	Sistema de disparo óptico.....	24
2.6	Desarrollo y resultado de pruebas DBP, conducción, sostenimiento, polarización inversa. ....	24
3	Diseño.....	28
3.1	Elementos y dispositivos del banco de pruebas.....	28
3.2	Costos del proyecto. ....	30
4	Simulación .....	31
4.1	Interfase LABVIEW y lógica.....	31
4.2	Simulación PSPICE .....	35
4.3	Simulación conducción DBP .....	35
4.4	Simulación sostenimiento DBP.....	36
4.5	Simulación polarización inversa .....	37
5	Conclusión .....	39
6	Referencias.....	40

# 1 Introducción

Que sería el mundo sin la energía eléctrica.

La Comisión Federal de electricidad es la empresa más importante en México en los procesos de Generación, Transmisión, Distribución y Comercialización de energía eléctrica. Siendo Transmisión el ramo en donde inicia el desarrollo de este proyecto. Transmisión consta de varias especialidades para la gestión del transporte de la energía eléctrica, como son los departamentos de: Control, Protección, subestaciones, comunicaciones y líneas de transmisión.

Así es que este proyecto tiene sus orígenes en el departamento de control.

La automatización y control son de mucha importancia en una subestaciones eléctricas de potencia para tener Gestión remota y local de los elementos primarios como son interruptores, cuchillas, transformadores de corriente, transformadores de voltaje, mediciones de voltaje, mediciones de corriente, potencia activa, potencia reactiva, calidad de energía y otros como el control de Compensadores de carga reactiva, aquí es donde desarrollaremos el estudio de unos de los elementos electrónicos que intervienen en este proceso de regulación de voltaje en la red eléctrica en los niveles de 115kv, 230kv y 400kv.

El departamento de control en CFE Trasmisión tiene a su cargo la gestión de 10 subestaciones de potencia en los niveles de voltaje de 230kv, 400kv y 27 subestaciones de subtransmisión en el nivel de tensión de 115kv.

Según el estudio eléctrico de flujos de cargas y análisis de armónicos en la red eléctrica de la zona SLP, determina la instalación de un compensador estático de reactivos SVC (por sus siglas en ingles Static Voltage Compensator) en el año de 1999. Con el compromiso de mantener un equilibrio de voltaje en la red eléctrica de la zona SLP. Este sistema SVC fue instalado estratégicamente en la subestación la pila, está ubicado dentro del área industrial donde existen grandes consumidores de energía eléctrica en los niveles de tensión de alto voltaje, los flujos de potencia en esta zona son muy variantes donde las fluctuaciones de cargas inductivas y capacitivas dan lugar a variaciones en el voltaje de la red,

por lo que el compensador de reactivos viene a mejorar las condiciones eléctricas de la red.

La comisión federal de electricidad cuenta con 30 sistemas de regulación de voltaje SVC instalados estratégicamente en la república Mexicana, para todo los casos y en especial para la zona SLP se realiza un estudio del comportamiento de cargas y flujos en la red eléctrica y se toma la decisión de ser instalado en la subestación eléctrica de potencia “La Pila” S.E. SPI la *figura 1* muestra el diagrama de un sistema de compensación, con la finalidad de tener control y regulación de voltaje en los niveles apropiados para los procesos de potencia que lo requieren, dado que las cargas de la red eléctrica no son totalmente resistivas, existiendo cargar capacitivas e inductivas, las cuales son causantes de fluctuaciones del voltaje eléctrico, esto ocasiona paros operativos en la industria por la operación de las protecciones por alto y bajo voltaje de la red eléctrica.

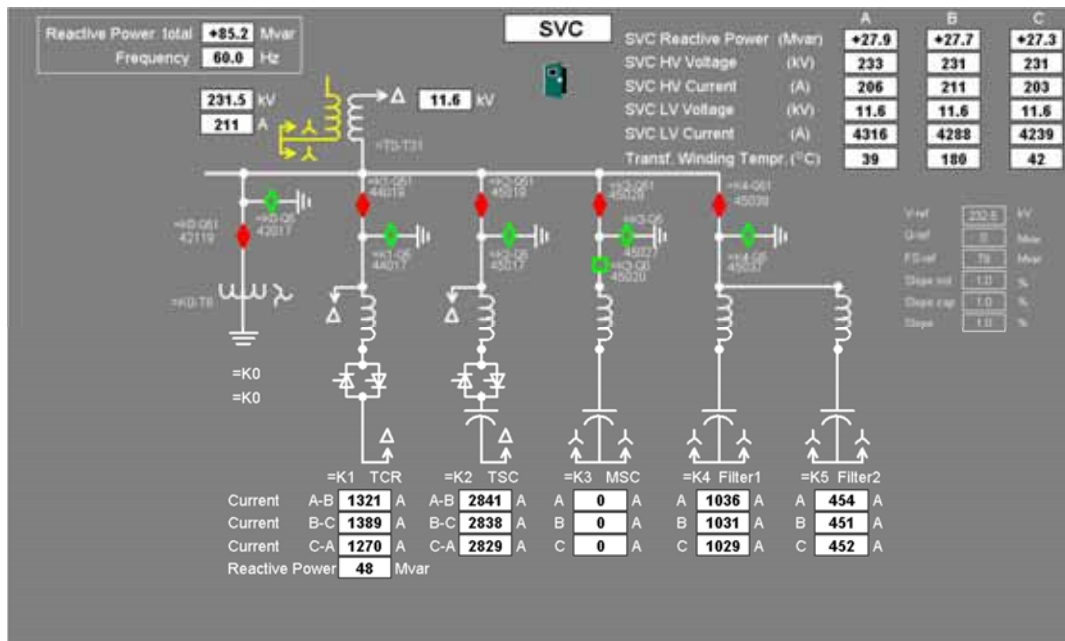


Figura 1. Unifilar Compensador +200 / -70

Un compensador de reactivos consta de varios subsistemas primarios, la *figura 2* muestra detalle de los elementos de la rama trifásica de TCR (Thyristor Controller Reactor, por sus siglas en inglés) el elemento principal de este sistema es el SCR.



*Figura 2. TCR Reactor Controlado por Tiristor*

## 1.1 Descripción del problema

El sector eléctrico está evolucionando día a día, existen diversos sistemas eléctricos donde el uso de los SCR es de vital importancia, se utilizan para la regulación de voltaje de estator en los generadores eléctricos de potencia, en los sistemas control de carga reactiva (compensador de carga reactiva) para los sistemas eléctricos de alto voltaje, 115kv, 230kv y 400kv y otros.

El problema de estudio se presenta en un sistema eléctrico de control de compensación de carga reactiva SVC (Static Voltage Compensator) +200 / -70 Mvar, +200 Mvar capacitivos y -70 Mvar inductivos respectivamente, este equipo está instalado en una subestación eléctrica de potencia que pertenece a la Comisión Federal de Electricidad Transmisión, está construido con los siguientes elementos primarios:

- Rama TCR (Thyristor Controller Reactor)
- Rama TSC (Thyristor Controller Capacitor)
- Rama MSC (Mechanical Switching Capacitor)
- Filtros de 5ª armónica (300 Hz)
- Filtros de 7ª armónica (420 Hz)

El compensador de reactivos actualmente tiene diversos problemas operativos, teniendo un estadístico de fallo alto por operaciones de falla en la rama TCR.

La *figura 3* muestra un evento de protección por falla y restablecimiento del sistema de compensación.

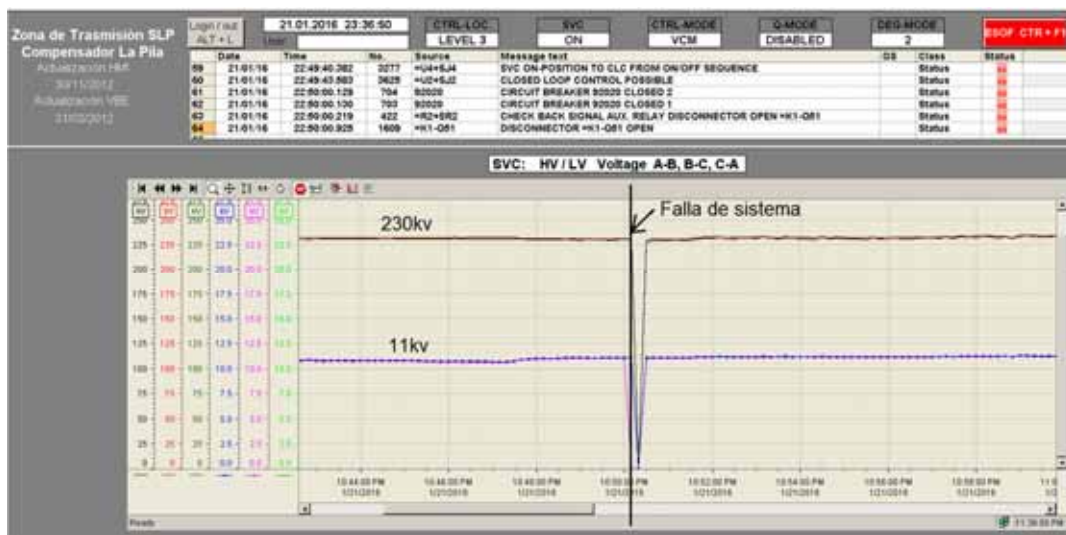


Figura 3. evento de protección por falla

La *figura 4* muestra los flujos de corriente en la rama TCR durante evento. Debido a que la resolución de muestreo es muy baja en la consola de control (1 ciclo/segundo), los datos de consola solo son de referencia general y no para estudio de eventos transitorios.



Figura 4. corrientes TCR durante evento.

Nos centramos en la rama TCR que es donde se ha tenido problemas operativos y continuamente la rama inductiva queda fuera de servicio. Esta rama trifásica está constituida por un total de 36 SCR's como ilustra la figura 5, por lo que cada fase consta de un grupo de 12 tiristores, 6 de ellos para controlar el voltaje alterno ciclo positivo y los otros 6 tiristores el voltaje alterno negativo, por lo que están en arreglo antiparalelo, la figura 6 muestra el arreglo real de tiristores.

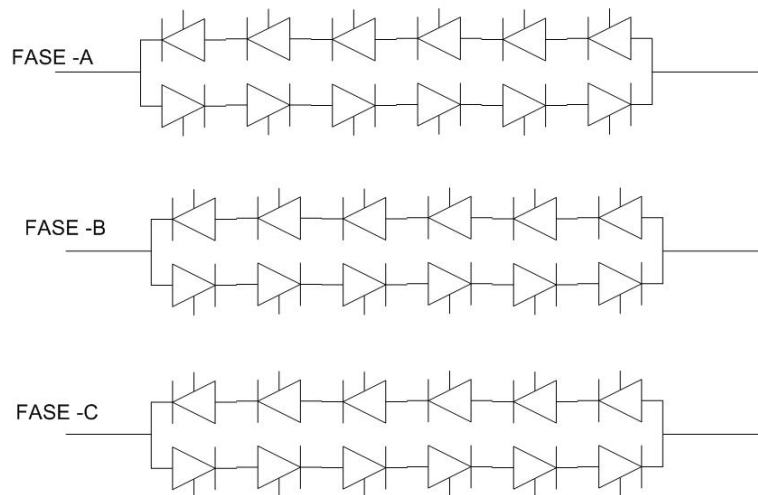


Figura 5. Arreglo de tiristores antiparalelo



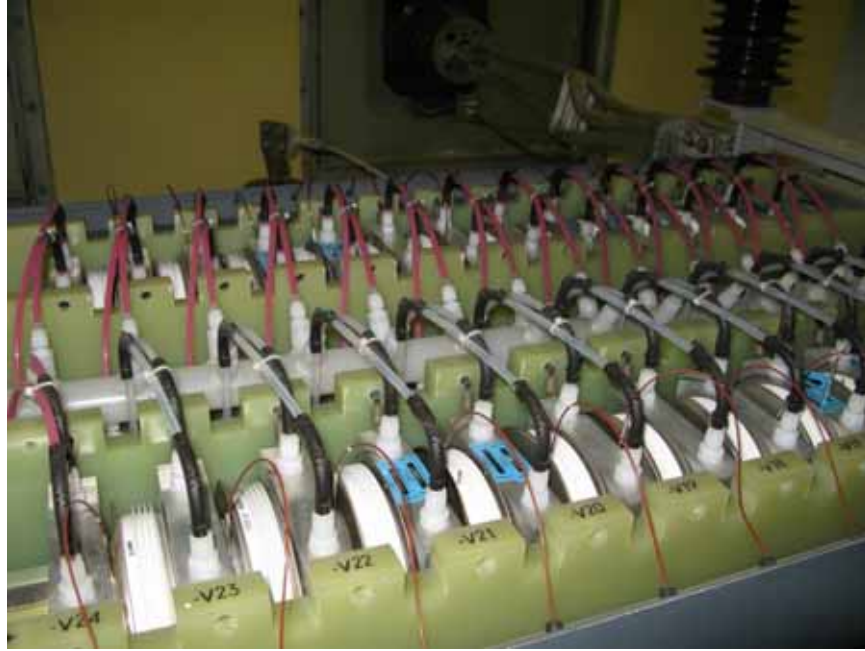


Figura 6. representación real de TCR

Este arreglo trifásico está conectado en disposición delta como muestra la figura 7.

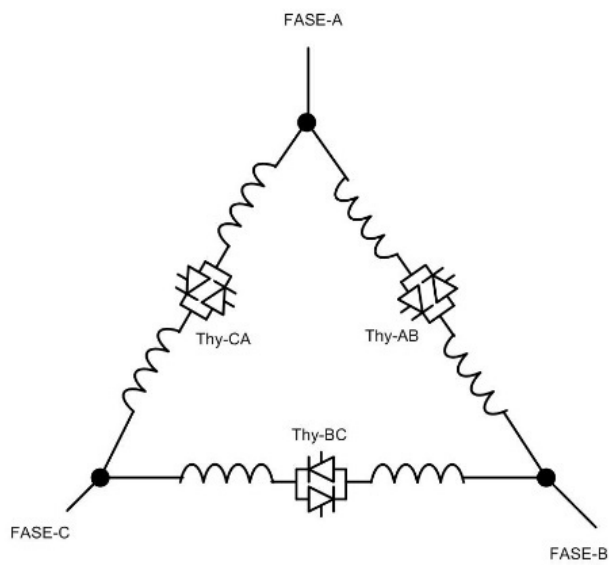


Figura 7. Arreglo delta TCR

El SCR no puede ser verificado en vivo (equipo energizado), para diagnosticarlo tendrá que ser en muerto (equipo des energizado), entonces se toman lecturas de impedancias de los tiristores estando aun conectados en el arreglo, por lo que es la única referencia que se tiene del SCR, el corto circuito del SCR nos indica que debe ser cambiado.

La figura muestra la manera clásica de verificar el estado del SCR, la cual es una prueba de poca confiabilidad, por solo obtener la impedancia como dato de referencia del diagnóstico, *figura 8*.



*Figura 8. Medición de impedancia*

La *figura 9* muestra el desensamble de un tiristor de potencia, en las superficies de contacto existen placas metálicas por las que circula agua desionizada, con el fin de mantener la temperatura del SCR en rangos operativos aceptables.



*Figura 9. Extracción de tiristor*

La cama de tiristores se desarma y se retira el elemento para ser revisado visualmente ya que una vez retirado sus características de impedancias no son las mismas y el dato no es útil, este equipo debe de estar sometido a una alta presión mecánica por lo que se entiende que la impedancia cambia al no estar comprimido.

Se ha realizado una búsqueda en el mercado para ubicar una herramienta que tenga la facultada de diagnosticar y conocer más datos del estado del SCR. El disparo de compuerta de este SCR es controlado ópticamente.

## 1.2 Objetivo

Con el propósito de aportar una herramienta de diagnóstico de un SCR, y derivado a los requerimientos de elementos que exige este diseño, nos centramos en la simulación con software de ingeniería ORCAD PSPICE.

Donde implementaremos con circuitos las etapas fundamentales para la simulación del SCR como son: el control de polarización, el control de disparo de SCR y observaremos el comportamiento de la corriente, voltaje de polarización directa e inversa y disparo del dispositivo.

Este desarrollo facilita la verificación de tres estados del SCR de alta potencia como son: conducción, sostenimiento y corte. De tal manera que tendremos información valiosa para determinar si el tiristor cumple las funciones operativas que se proponen en este desarrollo.

## 1.3 Alcance del proyecto

El alcance será la simulación de las siguientes características:

Selección de elementos electrónicos necesarios para diagnosticar el SCR, como son drivers, puentes H MOSFET, SCR, fuente de voltaje.

Para la simulación seleccionamos un SCR similar al que opera en el compensador la pila, dado que no existe librerías de apoyo para la simulación del SCR con las características similares al que está en operación en el compensador (T2563N75).

## 1.4 Justificación

La importancia de verificar el estado del SCR es tal que las falla en un sistema de compensación reactiva repercuten grandemente en la regulación de voltaje en la red eléctrica de la ciudad. Esto ocasiona paros eléctricos en los procesos industriales de los grandes consumidores de energía por operación de protecciones debido a bajo o alto voltaje. Este desarrollo contribuye a la verificación del SCR por medio de la simulación.

El desarrollo nos permitirá en la simulación analizar el comportamiento de encendido y apagado de un SCR y obtenemos datos muy aproximados a los que sucederían físicamente en el dispositivo.

## 1.5 Marco teórico

Las tecnologías de materiales semiconductores son factor importante para el continuo desarrollo de la electrónica, en la última década ha habido grandes avances y se está logrando la miniaturización en unos casos y en otros la aplicación para altos voltajes, el uso de semiconductores en bajo voltaje y grandes corrientes para los sistemas industriales ejemplo el sector automotriz, así también el uso de semiconductores para el alto voltaje para sistemas eléctricos de potencia, esta carrera ha sido interminable y día a día se escuchan grandes avances tecnológicos en materiales de conducción.

En la actualidad existe un sin número de dispositivos semiconductores para un sinfín de aplicaciones, dependiendo de la aplicación es posible ahora elegir el semiconductor más apropiado, esto dependerá del voltaje de aplicación (V), demanda de corrientes (A) y rapidez de respuesta (Hz). La *figura 10* muestra el avance tecnológico de algunos dispositivos semiconductores más utilizados donde se hace notar la velocidad de trabajo y el nivel de tensión de operación, en década pasada el uso de los GTO e IGBT predominan en el control de compensación reactiva.

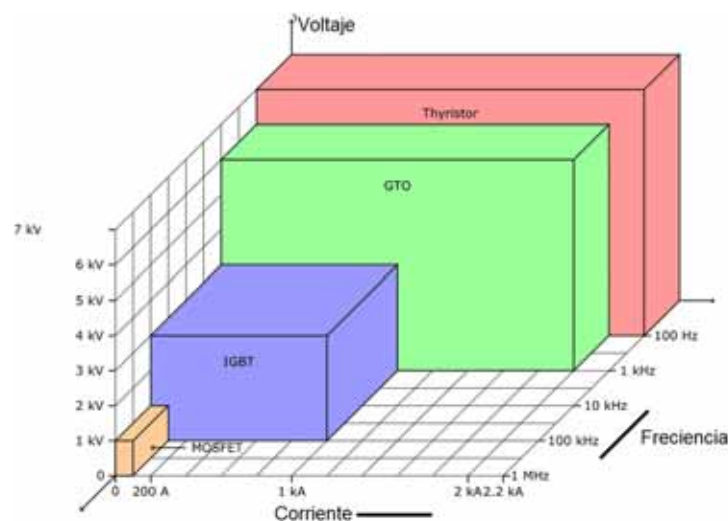


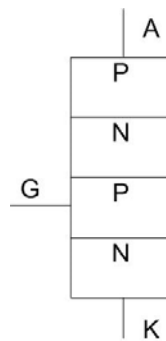
Figura 10. Evolución de semiconductores

## 1.6 SCR introducción

SCR (Silicon Controller Rectifier), es un dispositivo formado por 4 capas de material semiconductor PNP. Esencialmente dos transistores interconectados PNP y NPN, como muestra la *figura 11*.

Este dispositivo solo se usa para conmutar y no se debe usarse para procesos de amplificación de señales.

Tiene tres uniones tipo PN, por lo que la conducción solo se da en un solo sentido (es unidireccional), sus terminales de operación con ánodo (A), cátodo (K) y compuerta (G).



*Figura 11. SCR*

El funcionamiento de un SCR es el siguiente.

Cuando el terminal del ánodo del tiristor es negativo con respecto al cátodo, la unión N-P central está polarizada directa, pero las dos uniones P-N externas están polarizadas inversamente y se comporta como un diodo ordinario. Por lo tanto, la unión bloquea el flujo de corriente inversa hasta que en algún nivel de alto voltaje se excede el punto de voltaje de ruptura de las dos uniones externas y el tiristor conduce sin que sea aplicación una señal de compuerta.

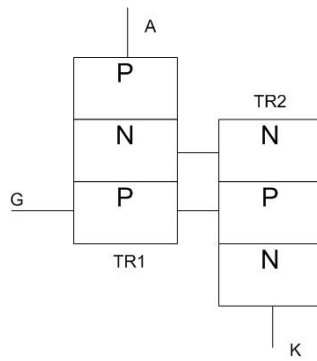


Figura 12. uniones SCR

Si el terminal del ánodo se vuelve positivo con respecto al cátodo, las dos uniones externas P-N ahora están polarizadas en directa, pero la unión central N-P está polarizada inversamente. Por lo tanto, la corriente directa también está bloqueada. Si se inyecta una corriente positiva en la base del transistor NPN TR2 (gate), la corriente del colector resultante fluye en la base del transistor TR1. Esto a su vez hace que la corriente de colector fluya en el transistor PNP, TR1, lo que aumenta la corriente base de TR2 y así sucesivamente, la *figura 12* muestra los detalles en mención.

Muy rápidamente, los dos transistores entran en un ciclo de conducción hasta lograr la saturación, ya que están conectados en un circuito de retroalimentación regenerativa que no puede detenerse. Una vez que se activa, la corriente que fluye a través del dispositivo entre el ánodo y el cátodo está limitada solo por la resistencia del circuito externo, ya que la resistencia directa del dispositivo cuando conduce puede ser muy baja en el orden de los mili ohms, por lo que la caída de voltaje a través de él y la pérdida de potencia es baja, la *figura 13* muestra la curva característica V-I.

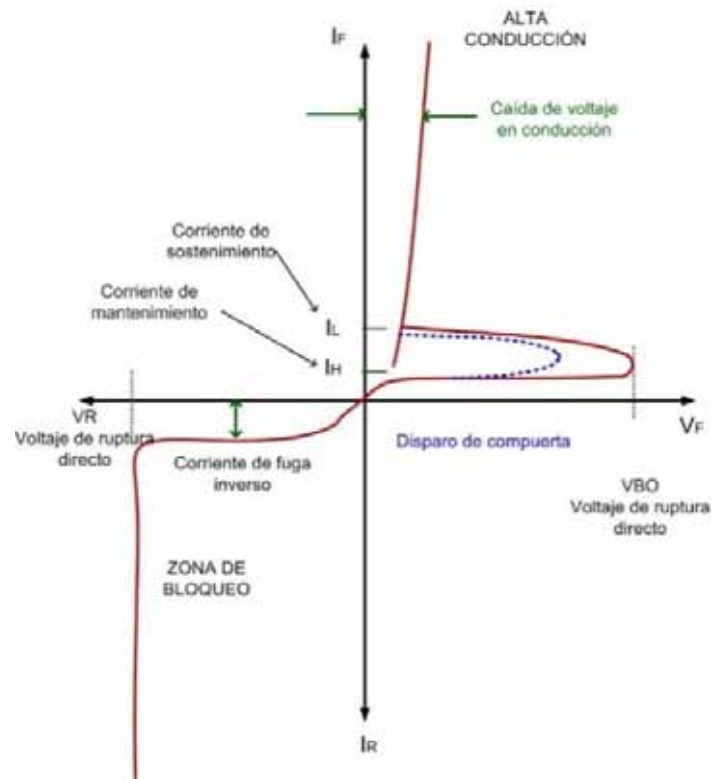


Figura 13, curva VI SCR

## 1.7 Revisión del estado del Arte

### 1.7.1 Modelo de pruebas K. Itoh, Y. Tsunoda, K. Akabane, H. Kashiwazaki

El modelo de [1] menciona la tecnología de la protección del tiristor las cuales han evolucionado significativamente, con el avance de la tecnología se ha logrado la disminución de componentes de protección y se ha obtenido mayores velocidades de control, este análisis esta fuera del alcance del proyecto.

**¡Error! Vínculo no válido.**



### 1.7.2 Modelo de pruebas Q. Li, P. Xing, X. Zhang

Los dispositivos para el control eléctrico de alta potencia más utilizados son los SCRs ETT por sus siglas en inglés (Electrically Triggered Thyristors), [2] menciona un método de verificar el comportamiento del SCR, el cual utiliza disparo de compuerta no periódico (un pulso largo). [2] expone en *figura 14* el circuito de prueba con alimentación senoidal de  $\pm 125\text{kV}$  (debido a la complejidad y robustez de los elementos este análisis fue simulado por [2], se observan 3 señales de control voltaje, pulso TA, TB y TC.

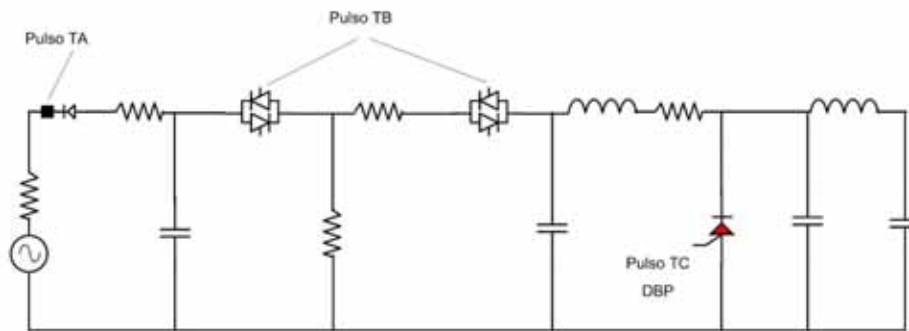


Figura 14. Circuito de prueba experimental

Los pulsos TA y TB que muestra la figura 15 se utilizan para elevar el potencial que polarizara el SCR (en rojo DBP), estos pulsos deben de estar sincronizados con un retardo de tiempo para estabilidad del voltaje de polarización y un pulso final TC para activación del SCR.

En el proyecto de banco de pruebas a desarrollar se utilizará el control de disparo no periódico.

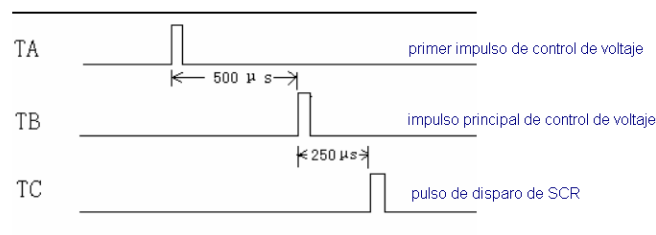
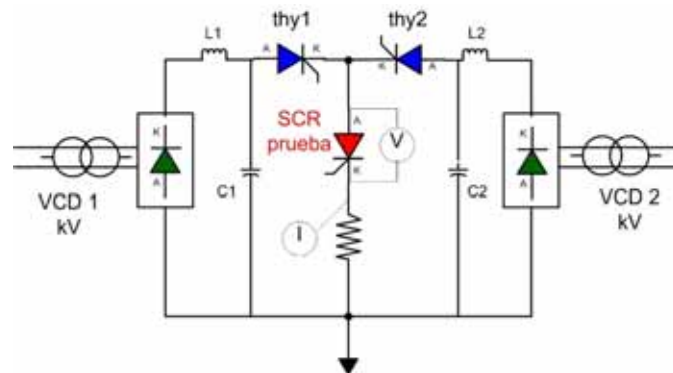


Figura 15. Pulsos de control

### 1.7.3 Modelo de pruebas H. Nakao, Y. Akagoshi, M. Hatano y H. Miyata

El método para verificar el funcionamiento de una válvula de SCR controlado por luz laser lo describe [3], llámese válvula a un conjunto de tiristores en arreglo serie y antiparalelo distribuidos en una fase en un sistema trifásico.

El arreglo eléctrico hace uso de un sistema trifásico de válvulas, para esta prueba [3] decide la verificación de una válvula en lugar del conjunto trifásica de válvulas, debido a un desbalance de voltaje. Hace uso de dos fuentes de alto voltaje para la conversión a 210kV VCD como muestra la *figura 16*.



*Figura 16. Circuito de prueba de válvula*

El lado izquierdo del diagrama el voltaje VCD1 se utiliza para polarización directa, el tiristor thy1 es de las mismas características del SCR de prueba y el tiristor thy2 es un semiconductor de alta impedancia.

El funcionamiento es el siguiente:

Ambos capacitores C1 y C2 se cargan, [3] menciona que L1 y C1 están calculados para que entren en resonancia, inmediatamente después ocurre el disparo de thy1 y se valida la conducción del SCR de prueba. Transcurrido un tiempo de polarización directa se aplica un voltaje de impulso al SCR a través de thy2 y VCD2.

Los tiempos de disparo de thy1 y thy2, están sincronizados para evitar daño en componentes de las fuentes. Una vez que opera thy1 posterior thy2 con un retardo, thy1 deberá de bloquear el voltaje de VCD2, e impide que VCD1 sea afectada.

La respuesta al pulso no periódico se muestra en la *figura 17*:

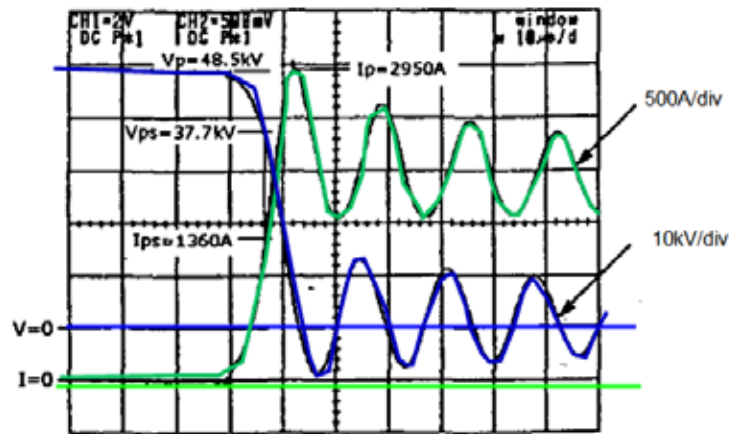


Figura 17. Respuesta de conmutación

Conclusión de introducción.

La forma tradicional que se utiliza para verificar el tiristor de potencia que opera en la subestación La Pila no es confiable, ya que únicamente se toman lecturas de impedancia estando el sistema de compensación apagado (en muerto, es el termino coloquial que se utiliza por las personas que trabajan en una subestación eléctrica de potencia) y sometido a una fuerza de compresión (en arreglo de 6+6 tiristores por fase y en antiparalelo), esta impedancia arroja valores entre 30 a 150 Kohm, si la impedancia es cero, el tiristor es reemplazado. Este es el único dato de referencia que se tiene y no es definitivo para deducir si está en buenas condiciones o no.

Por lo que se desarrollará una herramienta que nos indique si el tiristor conduce o si el tiristor no conduce al aplicar una polaridad y hacer circular una corriente, así mismo al aplicar un disparo óptico a la compuerta del SCR.

## 2 Análisis

El análisis se orienta a la necesidad de poder verificar el estado de conducción saturación y sostenimiento del tiristor de potencia T2563N75 y en el desarrollo de la herramienta que favorecerá este objetivo. Por lo que examinaremos los elementos principales del banco de pruebas y el circuito de control general.

Dado que el DBP (SCR) es el elemento que queremos verificar, encontramos que sus características de construcción hacen de este dispositivo un reto para diagnosticarlo. Nos referimos primeramente que es un tiristor que requiere de un rayo de luz para la compuerta óptica, otro punto interesante es que requiere estar comprimido con una fuerza de 9 kN (kilo newtons).

Este SCR en su estado operativo nominal (compensador de carga reactiva) está en el rango de 1.8 kv y corriente nominal de 3000 A. Para verificar su estado de conducción, corte y sostenimientos construimos una fuente de 707.1 VCD (transformador elevador, puente de diodos y capacitores), se ha elegido este nivel de tensión debido a que el controlador del circuito tiene un límite operativo de 1.2kv, con el voltaje de la fuente seleccionado damos al circuito un margen de seguridad para su operación.

Para aplicar la polarización al SCR en sentido directo e inverso, construimos un puente H con transistores MOSFET. El transistor seleccionado es el IXFH12N100 el cual tiene un límite operativo de 1.2kv y corriente de 12 A. Estas características se ajustan a la necesidad para lograr las pruebas propuestas al SCR, la *tabla 1* muestra valores de la corriente necesaria para verificar la conducción (100mA) y sostenimiento (1 A) circulando por el tiristor.

Para el disparo del SCR seleccionamos el emisor óptico HFBR-1414MZ el cual tiene un conector ST con el que adaptamos la fibra óptica al SCR.

Para controlar la prueba del SCR utilizaremos el kit de desarrollo Arduino Mega 2560. Con el que aplicaremos los pulsos de control para la polaridad de alimentación al SCR y el pulso de control para el disparo de SCR a través del controlador para MOSFET.

A continuación, se presente la descripción de cada uno de los elementos del banco de prueba de tiristores.

## 2.1 Dispositivo bajo prueba (DBP) SCR Infineon T2563N75.

Las características de este SCR se describen a continuación:

Tiristor de potencia disparado por luz, con protección interna VOD.

Amplio rango de bloqueo por temperatura.

Alta estabilidad de bloqueo DC  
 Alta capacidad de sobre corriente.  
 Alta capacidad di/dt.

Aplicaciones típicas de uso.  
 Transmisión de corriente en alto voltaje HVDC  
 Compensador Estático de Reactivos (SVC Static Voltage Compensator)  
 Controlador de voltaje  
 Aplicaciones de potencia pulsada o switcheo.

La *tabla 1* muestra las características del SCR de estudio.

*Tabla 1. SCR Infineon*

$V_{BO} / V_{RRM}$	7500V / 8000V
$I_{TAVM}$	2300A (TC=85°C) 3570A (TC=55°C)
$I_{TSM}$	93000A
$V_{T0}$	1,2V
$r_T$	0,35mΩ
$R_{thJC}$	4,5K/kW
Fuerza Comprensión	90 ... 130kN
Diámetro Max.	172.5mm
Diámetro contacto	115mm
Altura	40mm
$I_L$ sostenimiento	100mA
$I_H$ amarre	1A

Las características de este SCR originan cierta complejidad para aplicar la tensión directa e inversa y disparo de compuerta óptica.

## 2.2 Equipos de prueba en el mercado

En el mercado local e internacional existen varias herramientas para examinar tiristores, pero ninguna de las existentes se adapta para poder examinar al SCR T2563N75.

Herramienta Larkin Power M3K-100V.

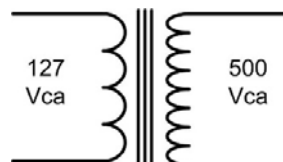
- Mecanismo de baja presión con diseño de palanca mecánica sin manómetro de identificación de presión del esfuerzo.
- Control de disparo eléctrico.
- Corriente de saturación SCR del orden de miliamperes.

Atlas SCR100

- Corriente de compuerta de 100  $\mu$ A a 90 mA
- Corriente de carga hasta 100 mA

## 2.3 Alto voltaje para DBP.

Para esta necesidad de alto voltaje, se consideraron los siguientes elementos Transformador elevador con relación de voltaje de 127VCA : 500VCA y 2.5KVA, *figura 18*, con la finalidad de lograr un voltaje de 707.1 VCD rectificadas.



*Figura 18. Transformador elevador*

Puente de diodos Vishay GBPC12 con un voltaje de bloqueo hasta 1000v, y corriente de 12A suficiente para nuestra necesidad de prueba *figura 19*.

Tabla 2, puente rectificador

$V_{RRM}$	1000v
$I_F$	12A
$I_R$	5uA

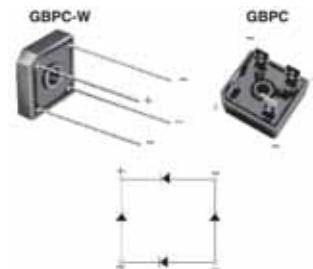


Figura 19. Puente rectificador

Capacitor Vishay 36DY 3300uF y 450v, figura 20, utilizamos doble capacitor en serie para soportar la tensión rectificada de 707.1 VCD.



Figura 20. Capacitor

La figura 21 muestra el transistor MOSFET IXFH12N100 con las siguientes características tabla 3, están dentro del rango del voltaje rectificado.

Tabla 3 características MOSFET

$V_{DSS}$	1kv
-----------	-----

$I_{D25}$	12A
$R_{DSon}$	1.05 ohm
$P_D$	300W
$V_{GSth}$	2v a 4.5v
$V_{GS}$	$\pm 20v$ continua, $\pm 30v$ pulsado

TO-247 AD (IXFH)

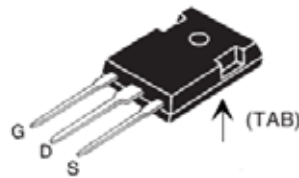


Figura 21. MOSFET

## 2.4 Sistema de presión mecánica.

Se utilizar prensa hidráulica *figura 22* con capacidad de 10 toneladas de compresión. Suficiente para cumplir la fuerza de compresión necesaria para el SCR.



Figura 22. Prensa hidráulica

## 2.5 Sistema de disparo óptico.

Led laser Broadcom HFBR-1414MZ longitud de onda 900nm y potencia de 40mW conector ST. Para el control del dispositivo óptico utilizamos compuertas lógicas NAND como muestra la *figura 23*.





Figura 23. Led laser

## 2.6 Desarrollo y resultado de pruebas DBP, conducción, sostenimiento, polarización inversa.

Con los elementos mencionados, disponemos ahora el circuito para el control de voltaje para el SCR el cual consiste en cuatro MOSFET en disposición H (puente H), dos drivers IRF2213 cada driver controlara a un par de MOSFET, uno conectado con polarización positiva (posición alta HO) y otro MOSFET conectado con referencia a tierra (posición baja LO), como muestra la *figura 24*. Este circuito opera bien para niveles de voltaje bajos hasta 20V, niveles superiores de tensión el corte (apagado del MOSFET) se complica apareciendo picos de recuperación de conmutación que dañan a dispositivos semiconductores, la *figura 24* muestra los picos de voltaje en mención.

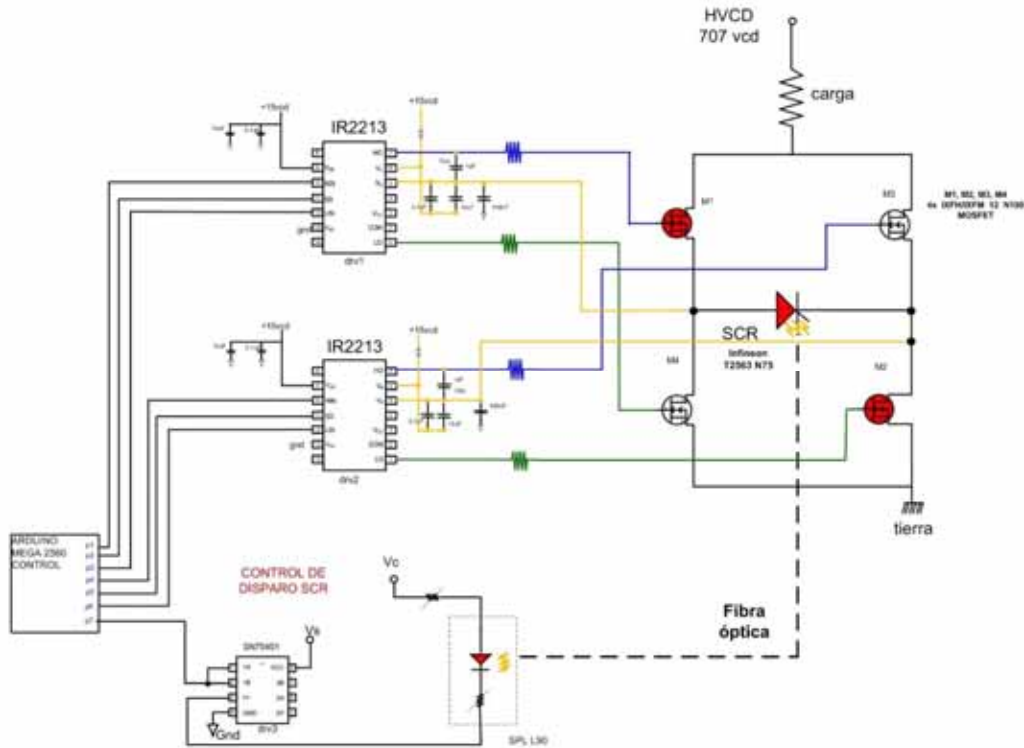


Figura 24 Circuito de controlador y puente H

Explicación del circuito.

El circuito de control Arduino se utiliza para el control del driver IR2213 y control de disparo de SCR, el kit Arduino se encarga de generar una frecuencia de 60Hz para las señales SD, Hin y Lin para conmutar los MOSFET del puente H. Se selecciona la frecuencia de 60 Hz ya que el DBP opera en un ambiente real de 60Hz.

Las señales Ho y Lo del driver1 gestionan los MOSFET M1 y M4, así el controlador 2 se encarga de la gestión de los MOSFET M2 y M3. Con la finalidad de fijar la polaridad directa e inversa al SCR que es el dispositivo bajo pruebas DBP, las señales que se generan en el IR2213 se muestran en la *figura 26*.

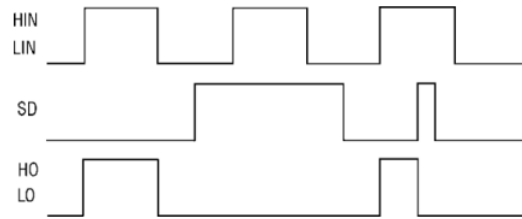


Figura 26. Señales de controlador IR2213

La carga que se utilizará será aproximada a 707 ohms con el fin de lograr el flujo de 1 A sobre el DBP que es el mínimo requerido para mantener la corriente de sostenimiento del DBP. Esto implicará una carga de mucha potencia que se aproxima a los 707watts.

Se procedió a implementar circuito diferente del controlador para puente H y se obtuvieron resultados satisfactorios en el control de conmutación de los MOSFET, con este circuito se logra controlar voltajes superiores a los 180 V sin presentarse voltaje inverso de recuperación por conmutación de los MOSFET. La figura muestra el circuito a utilizar en la práctica real (en base a la hoja de datos del controlador IR2213) *figura 27*.

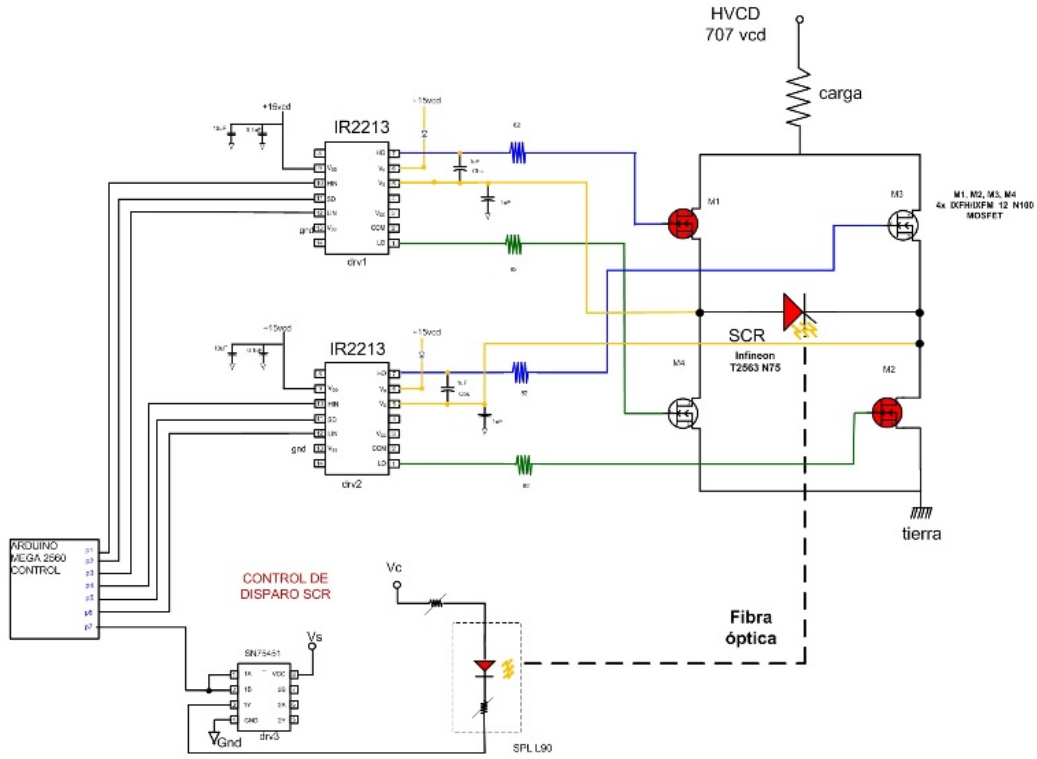


Figura 27. Driver puente H, control voltaje de recuperación MOSFET

Los resultados reales de conmutación de puente H se muestran en la *figura 28*, se observa un voltaje superior a 180V sin presentar voltaje inverso de recuperación, este voltaje es medido con referencia a tierra y Vs (drivers IR2213)



Figura 28. Conmutación de puente H sin picos de voltaje

### 3 Diseño

#### 3.1 Elementos y dispositivos del banco de pruebas.

Para el diseño del banco de pruebas se seleccionaron diversos componentes los cuales deben de cumplir las funciones necesarias para el circuito de pruebas de SCR se describen como sigue:

El transformador elevador se ha especificado con una relación de transformación de 1 a 3.93 para obtener a la salida 707.1 V rectificadas, con este voltaje de referencia se seleccionará el resto de los componentes. Las dimensiones del transformador son tal que se considera conexiones separadas de los circuitos de control. Las dimensiones aproximadas son de 30x20 cms y 10kg de peso.

IR2213, controlador para MOSFET de alto voltaje y alta velocidad, hace uso de referencia independiente para el transistor conectado a la fuente de alto voltaje HO y el transistor conectado a la tierra LO. Puede controlar referencias de voltajes hasta 1.2 Kv. Con sus entradas de control HIN, LIN, SD y salidas de control a MOSFETs HO y LO, con corriente máxima en las salidas de hasta 2 A [4].

IXFH12N100F, transistor MOSFET el cual ha sido seleccionado principalmente por el voltaje y corriente que puede controlar 1.2 kv y 12 A de corriente, el voltaje está dentro del rango apropiado versus el que suministra la fuente rectificada y la corriente de este dispositivo es la suficiente para lograr sobrepasar la corriente de sostenimiento para el SCR bajo prueba [5].

GBPC1210, puente de diodos de una fase soporta hasta 1000 V y 12 A suficientes para trabajar en el ambiente de la fuente de poder y la corriente que demandara la prueba de sostenimiento del SCR [6].

36DY332F450DD2A, capacitor construido en aluminio con capacidad de 3300uF y 450v, conectaremos dos en serie para poder controlar los 707.1 V rectificadas de la fuente [7].

HFBR-1414MZ, transmisor tipo led con longitud de onda de 820nm este se ha seleccionado para lograr el disparo óptico hasta 40mW de potencia suficiente para la compuerta del SCR [8].

DMB-4774-CB, es la tablilla donde insertaremos los componentes de control, por lo que utilizaremos dos de ellas, una para el ensamble de la fuente de poder (puente de diodos y capacitores), la segunda se conectarán los componentes de controladores y transistores MOSFET.

MSTB, terminales de conexión para cableados.

La *tabla 4* muestra los componentes para el diseño del banco de pruebas,

*Tabla 4, lista de componentes*

1	Transformador	<i>Descripción: Transformador elevador 127/500 VCA, 2.5Kva</i>
2	IR2213PBF	<i>Descripción: MOSFET DRIVER, HIGH/LOW-SIDE, DIP-14; Driver Configuration:High</i>
3	IXFH12N100F	<i>Descripción: TRANSISTOR, MOSFET, THROUGH HOLE; Transistor Polarity:N Channel</i>
4	GBPC1210	<i>Descripción: BRIDGE RECTIFIER, SINGLE PHASE, 12A, 1KV, QC</i>
5	36DY332F450DD2A	<i>Descripción: CAP, ALU ELEC, 3300UF, 450V, SCREW; Capacitance:3300µF</i>

6	HFBR-1414MZ	Descripción: FIBER OPTIC TRANSMITTER, 160MBD; Wavelength Typ:820nm
7	DMB-4774-CB	Descripción: PCB, PROTOTYPE, 1.6MM, DIN RAIL MOUNT BOX;
8	MSTB 2,5/ 6-ST	Descripción: TERMINAL BLOCK, STANDARD, 6WAY, 24-12AWG; Pitch Spacing:5mm
9	MSTBVA 2,5/ 6-G-5	Descripción: TERMINAL BLOCK, HEADER, 6POS, TH; Gender:Header; Pitch
10	MSTBVA 2,5/ 3-G-5	Descripción: TERMINAL BLOCK, HEADER, 3POS, TH; Gender:Header; Pitch
11	MSTBT 2,5/3-ST	Descripción: TERMINAL BLOCK, PLUGGABLE, 3POS, 12AWG; Pitch Spacing:5mm

### 3.2 Costos del proyecto.

La cotización se logró con empresas nacionales, algunos de los componentes son de origen internacional *tabla 5*.

**¡Error! Vínculo no válido.**

## 4 Simulación

### 4.1 Interfase LABVIEW y lógica

La *figura 30* muestra la interfase grafica para el control y monitoreo del circuito, consiste en el monitoreo del voltaje de polarización del SCR “presencia de voltaje” indicando que la fuente VCD está en operación, este voltaje nos da el permiso para poder dar click en el botón “SCR inicia prueba” el cual activa una salida de voltaje para la compuerta del SCR haciéndolo conducir se activa el indicador “SCR encendido” esto con la polarización directa, si por el SCR circula la suficiente corriente para cumplir el límite de la corriente de sostenimiento, por lo tanto al oprimir nuevamente el botón de inicia prueba para retirar el pulso de la compuerta de disparo del SCR, este deberá de mantener la conducción y el indicador de “SCR en sostenimiento” deberá de encender, en caso de no cumplir

la corriente de sostenimiento ambos indicadores encendido y sostenimiento se desactivan.

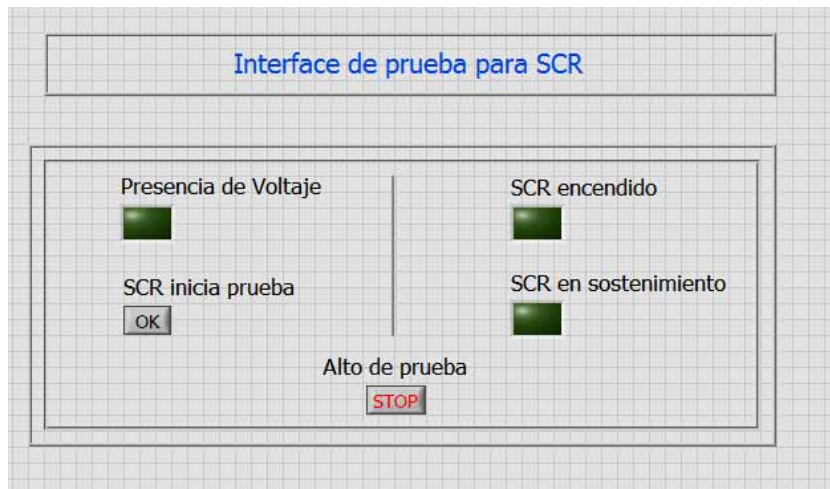


Figura 30. Interfase grafica

La *figura 31* muestra la lógica de interfase LABVIEW MAKERHUB LINX que utiliza la interfase gráfica, la cual utiliza funciones de MAKERHUB LINX e inicia abriendo el puerto serial USB, abre la función digital leer canal el cual se refiere al monitoreo de la fuente de voltaje VCD (1) permisivo para poder iniciar la prueba de SCR, posterior la función digital escribir (2) para mandar el pulso de control (3) a la compuerta del SCR para hacerlo conducir en caso de tener polarización directa, continua una función analógica de lectura y censa la corriente de sostenimiento en el SCR (4), si esta es suficiente (8) por tanto al retirar el pulso en la compuerta (3) el SCR mantendrá la conducción (6)(7). Finalmente, un botón de paro de prueba que puede operarse en cualquier instante de la prueba para detener el ciclo.



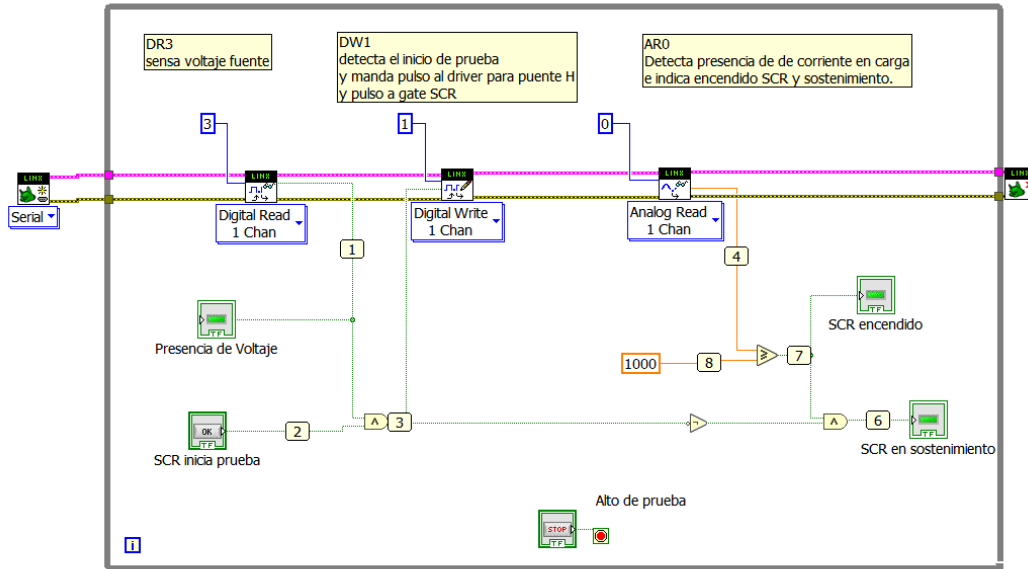


Figura 31 Lógica de interfase

La *tabla 6* presenta la lógica de operación desde otra perspectiva. Si el comparador de corriente (COMP) mantiene la lógica en VERDADES (1 lógico) y mantiene la conducción nos indicará que el SCR está en buenas condiciones.

Tabla 5. Lógica de operación

	punto logico	AND		NOT		COMP		AND	
VCD presente	(1)	1/0	(3)						
boton inicia prueba	(2)	1/0							
pulso SCR y driver	(3)			1/0	(3)		1/0		
medicion corriente	(4)					analogico	(7)		(6)
n/a	(5)								
SCR en sostenimiento	(6)								
SCR en conduccion	(7)							1/0	
comparador de corriente	(8)					analogico			

La *figura 32* muestra el diagrama de flujo expone claramente la secuencia de la prueba al SCR.

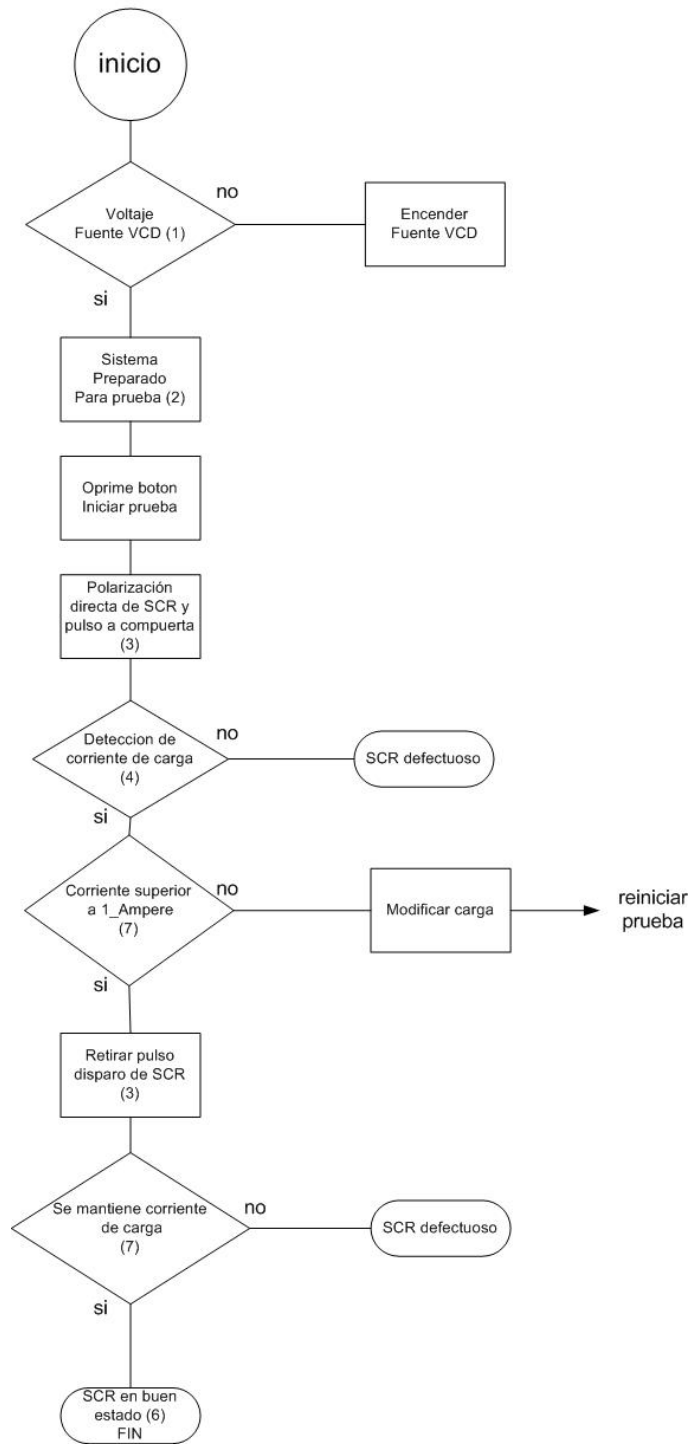


Figura 32. Diagrama de flujo lógico de prueba SCR

## 4.2 Simulación PSPICE

Se ha utilizado PSPICE Cadence versión 17.2-2016 full trial student y 17.4 full trial student, ambas versiones fueron demos con toda la capacidad de simulación sin restricciones.

## 4.3 Simulación conducción DBP

El siguiente circuito de la *figura 33* presenta la parte de prueba con el SCR (DBP dispositivo bajo prueba), como prueba dejamos permanentemente el pulso de disparo en la compuerta del SCR, por tanto, tendremos el corte de SCR con la inversión de corriente. Para este caso de simulación utilizamos un scr T627121574DN robusto con capacidad de 150 A y 1200 V.

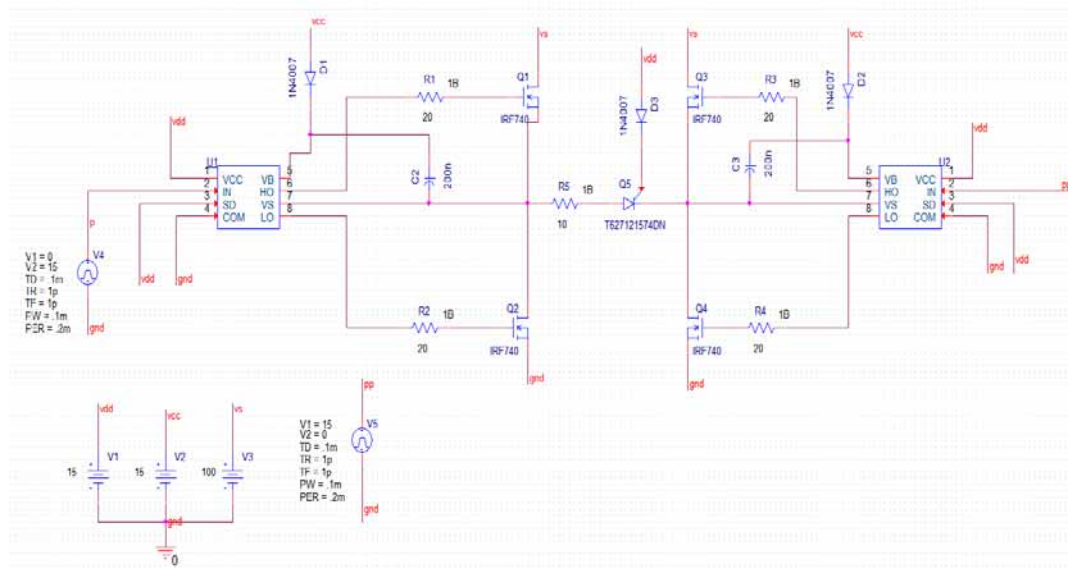


Figura 33. Circuito con SCR (dispositivo bajo prueba)

La *figura 34* presenta las señales de pulso de disparo SCR sostenido, voltaje directo e inverso en SCR y corriente de SCR. El pulso de disparo es constante en SCR, se observa el corte y conducción del DBP con la inversión del voltaje de polarización en SCR.

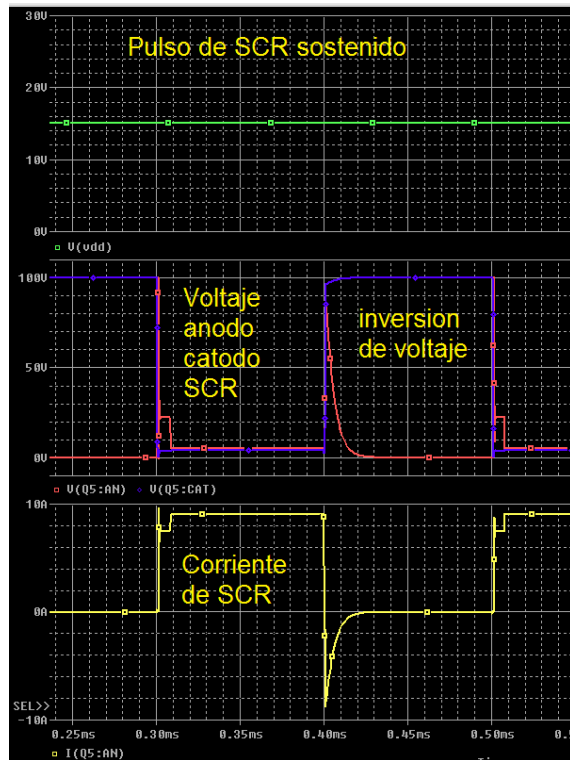


Figura 34. Pulso de compuerta sostenido y corriente de SCR

#### 4.4 Simulación sostenimiento DBP

Para esta prueba y continuando con el circuito anterior vamos a modificar el pulso de control del puente H, así también el pulso de control de compuerta con el propósito de lograr el sostenimiento de conducción del SCR. El circuito se muestra en la *figura 35*.

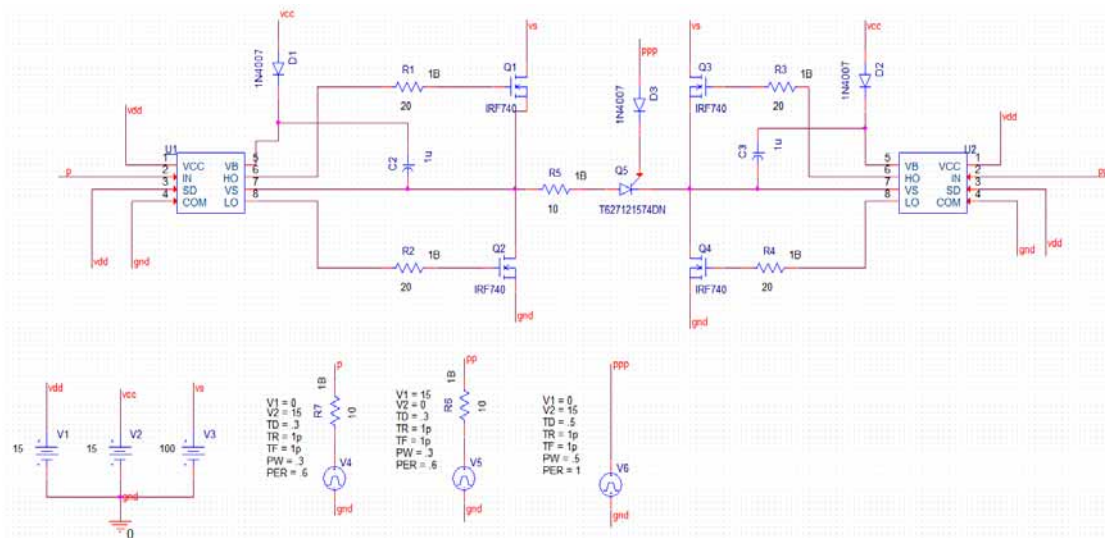


Figura 255. Control de pulso en compuerta SCR

Las señales resultantes se presenta en la *figura 36*, donde se resalta los tiempos donde se logra el sostenimiento de conducción del SCR, como muestra la figura antes y después del segundo 1 ya se contaba con el pulso de compuerta y existía polarización directa en el SCR por lo que se da la conducción, posteriormente al segundo 1 el pulso de compuerta cae a cero pero el SCR mantiene la conducción y aun se entrega potencia hasta que la polarización de SCR se invierte en 1.2 segundos dejando de conducir el SCR. El inicio de los pulsos de compuerta coincide precisamente para un estado de polarización directa del SCR.

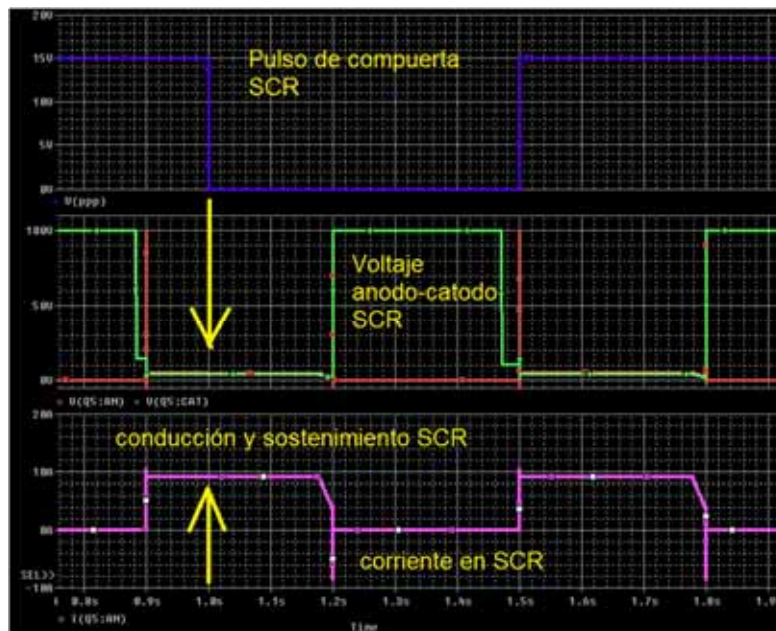


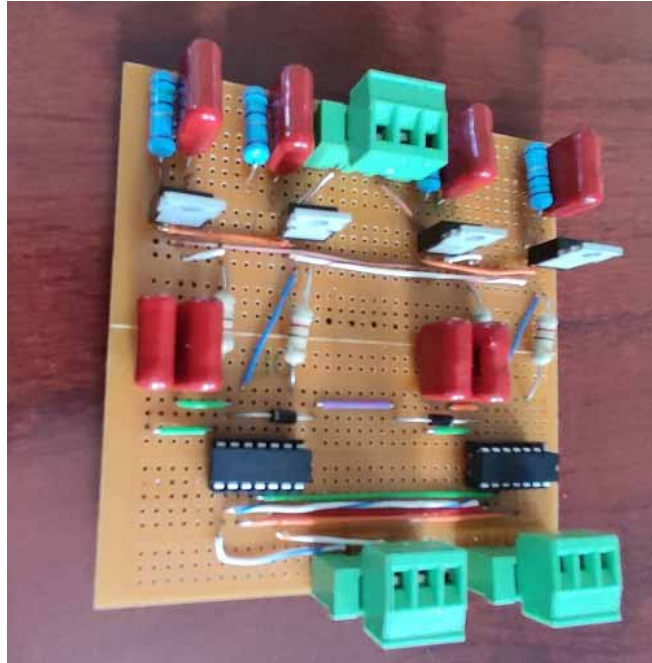
Figura 36. Señales de SCR en conducción y sostenimiento

#### 4.5 Simulación polarización inversa

Para esta simulación ajustamos los tiempos del disparo de compuerta del SCR y se hace incidir para un estado de polarización inversa justo en 0.8 segundos, la *figura 36* muestra la corriente inversa de aproximadamente 10A en el SCR.

Prototipo propuesto a implementar.

La *figura 37* presenta un bosquejo del circuito de control prototipo a implementar y posteriormente se validará el funcionamiento.



*Figura 37. Tablilla prototipo para prueba de SCR*

## 5 Conclusión

El uso de las nuevas tecnologías de software de simulación de circuitos electrónicos es sin duda una herramienta fundamental para el análisis de circuitos y ha sido de gran utilidad para este desarrollo, con la cual se ha logrado observar el comportamiento funcional de cada uno de los componentes que se han elegido para este desarrollo electrónico.

Es fundamental comprender la operación de cada uno de los componentes como los controladores con sus elementos externos como resistores y capacitores algunos de gran capacidad de voltaje para lograr la correcta operación del puente H MOSFET, así también el SCR como dispositivo principal para verificar los estados de corte, saturación y sostenimiento.

La simulación presentada nos orienta muy estrechamente a la selección de componentes necesarios para el propósito de este proyecto, se tuvo a elección una variedad amplia de dispositivos controladores y semiconductores, los cuales han sido de gran utilidad y elegimos los dispositivos de simulación más ideales acorde a las necesidades que se comentaron, con el propósito de presentar un circuito prototipo y proponer una posible solución para probar dispositivos SCR de alta potencia.

Finalmente, la simulación de los circuitos nos proporciona los datos necesarios para dirigir este desarrollo adaptando los componentes principalmente el SCR para los niveles de tensión y corriente necesarios y así obtener el resultado esperado para la prueba. Este desarrollo puede aplicar para probar una gran variedad de semiconductores SCRs disparados óptica o eléctricamente.

## 6 Referencias

- [1] K. Itoh, Y. Tsunoda, K. Akabane, H. Kashiwazaki y S. Horiuchi, «DEVELOPMENT OF LARGE-CAPACITY VBO-FREE LIGHT-TRIGGERED THYRISTORS AND THEIR APPLICATION TO SVC VALVES,» *PESC '91 Record 22nd Annual IEEE Power Electronics Specialists Conference*, nº ISBN 0-7803-0090491/n00-0453 1991IEEE, 1991.
- [2] Q. Li, P. Xing, X. Zhang, J. Wang y X. Li, «Study on Non-periodic Firing Test Technique for ETT Thyristor Valves,» *2008 International Conference on High Voltage Engineering and Application, Chongqing, China, November 9-13, 2008*, nº 978-1-4244-2810-6/08/ 2008 IEEE.
- [3] H. NAKAO, Y. AKAGOSHI, M. HATANO y H. MIYATA, «Test of a LTT Thyristor Valve for Next Generation 500kV HVDC Transmission system,» *IEEE*, nº ISBN 0-7803-5935-6/00 2000 IEEE.
- [4] *Infineon-IR2213-DataSheet-v01\_00-EN*.
- [5] IXYS, «HiPerFET Power MOSFETs, IXYS 12N100».
- [6] VISHAY, «Glass Passivated Single-Phase Bridge Rectifier GBPC12».
- [7] VISHAY, «Aluminum Capacitors +85 °C, Large Can 36DY».
- [8] Broadcom, «HFBR-14xxZ and HFBR-24xxZ Series».
- [9] R. International, «HV Floating MOS-Gate Driver ICs AN978».
- [10] H. STMicroelectronics, «HCF4011B, QUAD 2 INPUT NAND GATE».
- [11] B. W. Williams, *POWER ELECTRONICS. Devices, Drivers, Applications, and Passive Components*.
- [12] N. M. Thomas, «Design of Snubber Circuit for Thyristors Using Pspice,» *International Journal of Emerging Science and Engineering (IJESE)*, p. 4, 2013.
- [13] T. Co., «MOSFET Self-Turn-On Phenomenon,» 2018.



