

Desarrollo de un conmutador de potencia para aplicaciones en hogares inteligentes

Julián Hernando Pérez Delgado, Néstor Ascención Peña Ortiz

Proyecto de grado para optar al título de: Ingeniero Electricista

Director

Jaime Guillermo Barrero Pérez

Magíster Ingeniero Electricista

Codirector

Luis Fernando Rueda Vásquez

Magíster Ingeniero Electricista

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ingenierías Físico - Mecánicas

Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones

Bucaramanga

2017

Agradecimientos

A la memoria de mi abuela hermosa Rosa Gamboa, siempre presente, siempre atenta. Que en vida dedico tantas oraciones y tuvo tantas atenciones. Que hoy desde el cielo sigue apoyándome.

Infinitas gracias.

Julián Hernando Pérez Delgado

A quien más que a mis padres Ludy Delgado y Hernando Pérez, por tantos días de trabajo, constante preocupación y apoyo incondicional, tanta fe puesta en Dios y en mí para cumplir esta meta que también es compartida con ellos y por ellos. Mi tía Stella Delgado que con su amor de madre siempre ha depositado su confianza en mí y me ha visto como su hijo. Mi hermana Laura

Pérez siempre acompañándome a cumplir mis metas con todo el cariño de este mundo. Mis amigos de vida y compañeros de universidad que he conocido durante todo este recorrido. Brindándome su ayuda, acompañándome en la angustia y celebrando los triunfos logrados con tanto sacrificio. Gracias por toda esa buena energía.

Y, por último, pero no menos importante a mí. Fueron años de lucha, paciencia, resistencia y perseverancia; para que hoy en día pueda disfrutar de la dicha de una meta cumplida.

Julián Hernando Pérez Delgado

A mi madre María Mercedes Ortiz, por ser las columnas de mi templo, por enseñarme con su amor y con su ejemplo.

A mi padre José Efraín Peña Reyes, por enseñarme a trabajar, a ser honesto y a pensar en los demás.

Sencillamente sin ellos nada de esto hubiese sido posible. Gracias por darme la educación, la moral, la paciencia y la maravillosa oportunidad de asistir a esta prestigiosa universidad.

A mi hermana Alba Lucero, por ser calor y abrigo, por estar siempre conmigo, y por la suerte y el regalo de tener a mis sobrinos: Aleks y Camilo, motivos para seguir luchando.

A mi tío Jesús Alexis, quien me inspiró de niño y me acerco al saber y la ciencia.

A Yesika, por darme luz y permanecer incondicional a mi lado, aguantarme y ayudarme a ser mejor persona. (o o)

A mi cuñado Alex, siempre una mano extendida para ayudar.

A mis Abuelas Dioselina Ortiz Mora y Luisa Ortiz Mora, por siempre en mi corazón. Y a todos los demás en mi gran familia.

A los Magister Jaime Barrero Pérez y Luis Fernando Rueda, quienes depositaron su confianza en nosotros y nos apoyaron en este proyecto.

Especial dedicación a mis amigos y otras personas, que han hecho parte de este camino.

Ferney, Julián, Edwar, Oswaldo, Yazmin, Maye, Yenny, Diego, Ángela, Profe Herminia, Starly, en fin son muchos los que apoyaron este camino desde mi niñez y a muchos les debo parte de esto.

Nestor A. Peña Ortiz

Contenido

	Pág.
Introducción	15
1. Diseño de la investigación	16
1.1 Formulación y declaración del problema.....	16
1.2 Motivación y justificación	17
1.3 Objetivos	18
1.3.1 Objetivo general.....	18
1.3.2 Objetivos Específicos.....	18
1.4 Alcance	19
1.5 Marco Teórico.....	20
1.5.1 Smart Grid.....	20
TRIAC (Triodo de Conrriente Alterna)	21
1.5.3 MOSFET (Metal Oxide Semicondcutor Field Effect Transistor).....	23
1.5.4 Interruptor Inteligente de Potencia (IPS)	25
2. Simulación de un interruptor inteligente de potencia	26
2.1 Topología del enrrotador de potencia	26
2.1.1 Estructura IPS de seis puertos.....	27
2.1.2 Módulos para un IPS de seis puertos	28
2.1.3 Conmutación Puerto A Puerto	29

2.1.3.1 IPS de seis puertos (tres módulos en funcionamiento)	30
2.1.3.2 IPS de tres puertos, funcionamiento por módulos	31
2.2 Simulación	32
2.2.1 Simulaciones en PSIM.....	33
2.2.1 Simulaciones en OrCAD Lite	40
3. Selección de componentes electrónicos.....	42
4. Diseño e implementación.....	46
4.1 Diseño Eagle light versión de un IPS.....	47
5. Validación.....	50
5.1 Montaje real de un IPS.....	51
5.2 Pruebas en un entorno real	51
5.3 Comparación de resultados	56
5.3 Ficha técnica de un IPS de seis puertos	58
6. Conclusiones.....	58
7. Recomendaciones	61
Referencias.....	62

Lista de Figuras

	Pág.
Figura 1. Comportamiento de la demanda de energía eléctrica en los últimos 10 años (XM FILIAL DE ISA).....	16
Figura 2. Composición de la Demanda de Energía Eléctrica por sector 2003 - 2014 (página web XM).....	17
Figura 3. Diagrama general de un TRIAC (GERARDO).....	22
Figura 4. Curvas características del TRIAC	22
Figura 5. Característica estática del transistor MOSFET (POTENCIA)	24
Figura 6. Conexión MOSFET emisor común (DISPOSITIVOS ELECTÓNICA DE POTENCIA)	24
Figura 7. Esquema de una red inteligente con actividad d los IPS (Song, 2010).....	25
Figura 8. Ecuación, cálculo de TRIACs por cantidad de puertos.....	26
Figura 9. Topología de red de un IPS (Song, 2010)	27
Figura 10. Esquema de un IPS con seis puertos y quince TRIACs	28
Figura 11. Módulos diseñados para uso individual o complementario	29
Figura 12. IPS 6 puertos, primer escenario.....	31
Figura 13. IPS de tres puertos, primer escenario	31
Figura 14. Método de activación de TRIACs "C-Block"	34
Figura 15. Modelo de carga a través de su impedancia	34

Figura 16. Orden descendente la tensión de la fuente 1, la tensión en la carga 2 y la corriente en la carga 2, la conmutación o activación se realiza en 0,005 segundos, pero la entrada de energía solo se da en la detección del primer cruce por cero ubicado después de un punto del punto de conmutación en 0,008 segundos aproximadamente.....	35
Figura 17. Se muestra que la activación se realiza en 0,012 segundos, aun así, la energía solo entra a la carga 2 a los 0,016 segundos, tiempo en el que se presenta el segundo cruce por cero. EL orden descendente es: la tensión de la fuente 2, la tensión en la carga 1 y la corriente en la carga 1	36
Figura 18. Tensión y corriente conexión de fuente 1 y 2 a carga 3 a través de la configuración .	37
Figura 19. Se muestra toda la acción de conmutación a través de su graficas de corriente con el fin de observar la respuesta de los detectores de cruce por cero y también de la conmutación deseada. A través de la configuración del IPS desde las dos fuentes y la respuesta en cada carga.	37
Figura 20. Simulación psim con MOSFET, fuente 1 y 2 a la carga 3	38
Figura 21. Simulación psim con MOSFET, fuente 1 a la carga 2	38
Figura 22. Simulación psim con MOSFET, fuente 2 a la carga 1	39
Figura 23. Simulación psim con MOSFET, todas las corrientes de Ilustración 20, 21, 22	39
Figura 24. Escenario 1, fuente 1 a carga 2.....	40
Figura 25. Escenario 2, fuente 2 a carga 1	41
Figura 26. Escenario 3, fuente 1 y 2 a carga 1	41
Figura 27. Esquemático de un TRIAC.....	42
Figura 28. Esquema de opto- acoplador en circuito de disparo.....	43
Figura 29. Flujo conceptual de un IPS.....	44

Figura 30. Esquema circuital de un interruptor	47
Figura 31. Capa inferior del Módulo 1	49
Figura 32. Capa superior del Módulo 1	49
Figura 33. Tensión en la fuente de energía eléctrica	52
Figura 34. Tensión de prueba en una carga resistiva módulo 1 del IPS	52
Figura 35. Tensión de prueba carga inductivo módulo 1 del IPS	53
Figura 36. Tensión de prueba carga resistiva e inductiva módulo 1 del IPS	53
Figura 37. Comparación entre la fuente y una luminaria como carga para un IPS de seis puertos.....	54
Figura 38. Comparación entre la fuente y una luminaria junto con un ventilador como carga para un IPS de seis puertos	54
Figura 39. Comparación entre la fuente y un ventilador como carga para un IPS de seis puertos.....	55
Figura 40. Comparación entre la fuente, una luminaria, un ventilador y un celular cargando como carga para un IPS de seis puertos.....	55
Figura 41. Entrada de la señal de tensión a la carga.	56
Figura 42. Entrada de la señal de tensión a la carga	57

Lista de Tablas

	Pág.
Tabla 1. Puertos en actividad, IPS 6 puertos primer escenario.....	30
Tabla 2. Puertos en actividad, IPS de tres puertos primer escenario	32
Tabla 3. Carga a simular	32
Tabla 4. Información TRIAC.....	45
Tabla 5. Información Opto acoplador.....	45
Tabla 6. Resistencias circuito de disparo.....	45
Tabla 7. Resistencia superficial circuito de disparo.....	45
Tabla 8. Condensador del circuito de disparo.....	46
Tabla 9. Elementos que componen el Módulo 1.....	48
Tabla 10. Elementos que componen el Módulo 3.....	50
Tabla 11. Elementos para montaje en el laboratorio.....	51
Tabla 12. Instrumentos de medición en el laboratorio.....	51
Tabla 13. Ficha Técnica del IPS de seis puertos.....	58

Lista de Apéndices*

APÉNDICE A - CONFIGURACIONES DE UN IPS SEIS Y TRES PUERTOS

APÉNDICE B - ESQUEMAS DE IPS EN PSIM y OrCAD Lite

APÉNDICE C - ESQUEMAS DE EAGLE IPS DE 6 PUERTOS

APÉNDICE D - MÓDULOS Y MONTAJE

* Ver documentos adjuntos en el CD-ROM

Resumen

TÍTULO: DESARROLLO DE UN CONMUTADOR DE POTENCIA PARA APLICACIONES EN HOGARES INTELIGENTES*.

AUTORES: NESTOR A. PEÑA ORTIZ
JULIÁN HERNANDO PÉREZ DELGADO**

PALABRAS CLAVES: Interruptor inteligente de potencia (IPS), fuentes de energía convencional y no convencional, Smart Grid, Sistema Nacional Interconectado, hogares inteligentes, alternistor, TRIAC, conmutación, *psim*, *OrCAD Lite*.

DESCRIPCIÓN

El proyecto tiene como finalidad entregar un prototipo de un interruptor inteligente de potencia (IPS) que permita integrar energías convencionales y no convencionales en un hogar. Este hogar aprovechará un medio inteligente (Smart Home) con disponibilidad de energías renovables y su importancia se evidenciará en que el usuario el usuario podrá disminuir el consumo o dependencia de energía eléctrica del Sistema Nacional Interconectado, promoviendo el uso racional y optimizado de la energía eléctrica. El proyecto consta de:

1. Simulación del prototipo de un IPS por medio de las herramientas computacionales ORCAD y PSIM. Supervisa su funcionamiento y describe el proceso para poder definir ¿Qué elementos electrónicos comerciales son los apropiados? de tal manera que cuando se ejecutó el modelo físico sus parámetros fueran acorde a los escenarios planteados para su uso. De igual manera determinando los límites de tensión y corriente para el funcionamiento del mismo.
2. Ejecución del dispositivo y pruebas preliminares. En esta etapa del proyecto, la creación del dispositivo se realizó diseñando las tarjetas de circuitos impresos (PCB) una vez más usando un software, en este caso EAGLE. Optimizando la estructura, beneficiando la funcionalidad y acceso al IPS (espacios, refrigeración, acceso a las conexiones y a la manipulación de las mismas). Posteriormente las pruebas preliminares verificaron que el modelo es funcional; inspeccionando la correcta conexión de las rutas y que todos los elementos estén en perfecto estado.
3. Pruebas y parámetros. Los ensayos realizados en la parte de simulación fueron base para el análisis del comportamiento del IPS en sus pruebas físicas, en donde los escenarios planteados son proyectados en pruebas de laboratorio. De igual forma se realizó una ficha técnica para que el usuario visualice los límites de tensión y corriente, configuración interna y externa, así como la adecuada conexión y disposición del prototipo.

* Proyecto de g

** Facultad de Ingenierías fisicomecánicas. Escuela de Ingeniería Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones
Director Jaime Guillermo Barrero Pérez

Abstract

TITLE: DEVELOPMENT OF A POWER SWITCH FOR INTELLIGENT HOME APPLICATIONS *.

AUTHORS: NESTOR A. PEÑA ORTIZ
JULIÁN HERNANDO PÉREZ DELGADO**

KEYWORDS: Intelligent power switch (IPS), conventional and non-conventional power sources, Smart Grid, National Interconnected System, intelligent homes, alternator, TRIAC, switching, psim, OrCAD Lite.

DESCRIPTION

The project aims to deliver a prototype of an intelligent power switch (IPS) that allows integrating conventional and unconventional energy into a home. This home will take advantage of a Smart Home with availability of renewable energy and its importance will be evident in the user can reduce the consumption or dependence of electrical energy of the National Interconnected System, promoting the rational and optimized use of electric energy . The project consists of:

1. Simulation of the prototype of an IPS by means of the computational tools ORCAD and PSIM. It monitors its operation and describes the process to be able to define What commercial electronic elements are appropriate? In such a way that when the physical model was executed its parameters were in agreement with the scenarios proposed for its use. Likewise determining the limits of voltage and current for the operation of the same.
2. Execution of the device and preliminary tests. At this stage of the project, the creation of the device was done by designing printed circuit boards (PCBs) again using software, in this case EAGLE. Optimizing the structure, benefiting the functionality and access to the IPS (spaces, refrigeration, access to the connections and the manipulation of the same ones). Subsequent preliminary tests verified that the model is functional; Inspecting the correct connection of the routes and that all the elements are in perfect condition.
3. Tests and parameters. The tests performed in the simulation part were basis for the analysis of the behavior of the IPS in its physical tests, where the scenarios are projected in laboratory tests. In the same way, a technical file was made for the user to visualize the limits of voltage and current, internal and external configuration, as well as the proper connection and layout of the prototype.

* Project of grade

** Faculty of Mechanical Engineering and Physical . School of Electrical Engineering , Electronics and Telecommunications Jaime Guillermo Barrero Pérez

Introducción

Dado el avance legislativo en Colombia, entre otros, la Ley 1715, “POR MEDIO DE LA CUAL SE REGULA LA INTEGRACIÓN DE LAS ENERGÍAS RENOVABLES NO CONVENCIONALES AL SISTEMA ENERGÉTICO NACIONAL” (Energética), en donde se promueve el uso energías renovables y se hace una primera regulación de estos flujos de potencia; se propone el desarrollo de un prototipo que permita esta coexistencia, además que le permita al usuario administrar su consumo energético. Es aquí donde el Interruptor Inteligente de Potencia (IPS). Cuyo objetivo principal es permitir la conmutación apropiada entre el Sistema Interconectado Nacional (SIN) y Fuentes no Convencionales de Energía (FNCE), puede ser un elemento clave para hacer realidad esta integración.

Para el diseño de un IPS se empieza por seleccionar las herramientas computacionales que nos permitieran el estudio del comportamiento y la configuración circuital del dispositivo. Para simular se implementaron *OrCAD Lite* y *psim*; usando varios elementos de circuito, se plantearon situaciones en las cuales se conmuta potencia entre varios puertos, y se evaluó su comportamiento. Por medio de otro software *EAGLE light versión* se hace el diseño del circuito impreso (PCB) en el cual estará plasmado el conmutador físico y así realizar las pruebas de funcionamiento en un entorno controlado, para la ejecución y control de las pruebas se usa un computador de placa simple (*raspberry pi*) con el cual se direccionó la activación del prototipo para enrutar la corriente de acuerdo a las capacidades establecidas por los elementos electrónicos seleccionados.

1. Diseño de la investigación

1.1 Formulación y declaración del problema

La demanda energética en Colombia presenta cierto crecimiento importante cada año en los usuarios regulados del SIN, lo cual evidencia que el sector residencial aumenta su demanda de forma significativa. Por medio de revisión estadística, y de acuerdo con los informes sobre la gestión de energía publicados por la empresa XM, se reporta que en Colombia en el año 2014 se presentó un pico significativo de incremento de consumo de energía eléctrica comparado con los últimos 10 años (4.4%), y un consumo de 63,571 GWh correspondientes al incremento del 5.0% de la demanda de energía del mercado regulado (ver figura 1). (XM FILIAL DE ISA) Esta demanda ha sido suplida en su gran mayoría por la generación hidroeléctrica y térmica del país (Unidad de Planeación Minero Energética , 2014) lo cual nos lleva a tomar en consideración los impactos ambientales negativos y sus posibles soluciones, usando las fuentes de energía no convencionales como método para moderar la demanda energética hacia el SIN.

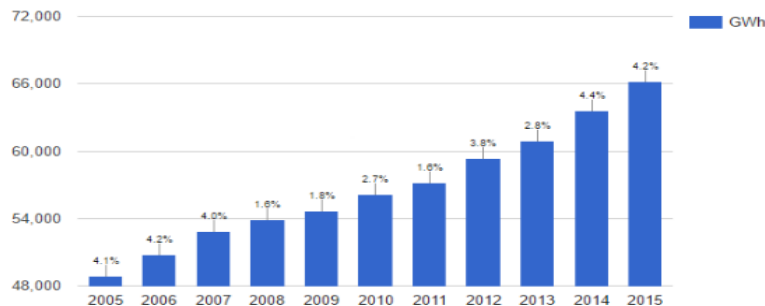
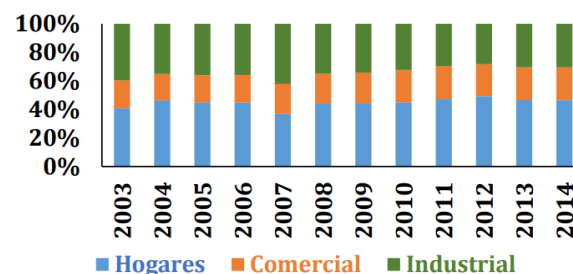


Figura 1. Comportamiento de la demanda de energía eléctrica en los últimos 10 años (XM FILIAL DE ISA)

De acuerdo con lo anterior, se propone integrar estas formas de generación de un modo técnico y preciso que proporcione al usuario la facilidad de establecer un consumo de acuerdo con sus prioridades; sin efectos negativos en la calidad del servicio si alguno de los métodos de generación alternativos falla o simplemente no está disponible.

1.2 Motivación y justificación

De acuerdo con el informe “PROYECCIÓN DE LA DEMANDA DE ENERGÍA ELÉCTRICA Y POTENCIA MÁXIMA EN COLOMBIA”; la mayor parte del consumo de energía durante la última década se originó en los hogares (Ilustración 2). El consumo residencial paso de representar el 41% del consumo total de energía en el 2003, a ser el 46% en 2014 (Demanda, 2015) . Esto y teniendo en cuenta la legislación mencionada fijan la atención en estas soluciones y señalan el camino para integrar las FNCE, del cual se desprende el enfoque principal del IPS.



Fuente: XM – Cálculos UPME

Figura 2. Composición de la Demanda de Energía Eléctrica por sector 2003 - 2014 (página web XM)

El desarrollo de nuevas tecnologías en aplicaciones relacionadas con las instalaciones residenciales como la domótica, el uso de energía solar, etc. Incentiva el estudio del problema que

nace a partir de ¿Cómo se pueden administrar estas energías alternativas? y de cuyos resultados se pueda obtener como beneficio el ahorro energético y desarrollo de los hogares inteligentes. (Ryo Takahashi, 2013)

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo general. Implementar un IPS de seis puertos que permita intercambiar la conexión entre diversas fuentes de energía y los circuitos ramales del hogar inteligente.

1.3.2 Objetivos Específicos. El cumplimiento del objetivo general del trabajo de grado comprende:

- Simular el funcionamiento del conmutador de potencia por medio de las herramientas de simulación *OrCAD Lite* y *psim*.
- Seleccionar los componentes electrónicos necesarios para la implementación del conmutador de potencia, de acuerdo con la oferta tecnológica del mercado y la eficiencia de los mismos.
- Implementar un IPS de seis puertos a partir de los componentes seleccionados y los requerimientos técnicos de operación identificados en la simulación.
- Validar el funcionamiento del conmutador de potencia comparando las pruebas experimentales con los resultados obtenidos en simulación.

1.4 Alcance

El propósito de este trabajo de grado es obtener como producto final la etapa de potencia de un IPS. Para esto, se realizará una etapa de simulación por medio de las herramientas *software OrCAD Lite* y *psim*. En estas simulaciones se usarán diferentes elementos electrónicos que cumplen la función de conmutación, de los resultados se observará el comportamiento eléctrico en el circuito (valores máximos y eficaces de tensión y corriente, respuesta transitoria, velocidad de conmutación, etc.) se hará una preselección de componentes. A continuación, se revisará a nivel comercial si las características de fabricación de estos componentes se adaptan a los objetivos del proyecto teniendo en cuenta el tamaño, los niveles de tensión, temperatura de trabajo, elementos adicionales requeridos para la protección durante la conmutación y finalmente el costo de los mismos.

Después de seleccionados los componentes, se procederá con el diseño del circuito impreso del prototipo por medio de la herramienta *software EAGLE light versión*. Posteriormente, se realizará el ensamblaje de los componentes y se procederá con la validación experimental. Para esto, las pruebas serán llevadas a cabo en un entorno real controlado en el que se usarán como fuentes de energía: la red comercial y un sistema de potencia ininterrumpida (UPS); y como cargas: electrodomésticos de uso cotidiano como, por ejemplo: luminarias, ventiladores, cargadores, monitores, televisores, etc.

Finalmente, se especificará el esquema del circuito interno del conmutador, garantizando una interpretación comprensible de las conexiones y su funcionamiento, así como las especificaciones de fabricación que por efecto de los elementos usados van a regir en el conmutador de potencia.

1.5 Marco Teórico

Los componentes usados en los convertidores, entre otros, tales como conmutadores simples (Relés), Mosfet (Semiconductores de Efecto de Campo), TRIAC (Triodo para corriente alterna), SCR (Rectificador controlado de silicio), transistores bipolares de compuerta aislada e *IGBT* (*insular Gate Bipolar Transistor*), presentan inconvenientes en el momento de hacer un dispositivo de conmutación robusta que permita, por ejemplo, conectar diferentes fuentes de energía con circuitos ramales específicos, entre estas fallas se resaltan los efectos transitorios, problemas de temperatura y dificultades de activación que requieren soluciones que aumentan los costos y el tamaño de estos dispositivos, incluso muchos de ellos ya diseñados carecen de aplicación en la industria. A continuación, se presentan los aspectos teóricos necesarios para contextualizar el tema principal.

1.5.1 Smart Grid. La red inteligente o *Smart Grid* es la estructura de una red eléctrica, junto con una comunicación bidireccional que garantiza una mayor fiabilidad del sistema para generación a pequeña y gran escala, así como la transmisión, distribución y almacenamiento de la misma. Incluye software y hardware para aplicaciones de optimización dinámica, integrada e interoperable de las maniobras del sistema eléctrico, el mantenimiento, distribución, interconexión generación y la integración, además, de la retroalimentación y los controles a nivel del consumidor del sistema eléctrico, el mantenimiento y la planificación del sistema que la constituye.

Particularmente en los países densamente poblados, el aumento de contribución de energía a través de FCNE conducirá a una combinación de la producción de energía con otras actividades, tales como viviendas o negocios. (Slootweg)

Como estos últimos requieren electricidad, es probable que existan rejillas de media tensión (MT) y baja tensión (BT) disponibles, y debido a la pequeña escala de unidades de generadores de energía renovable, que se pueden conectar a estas rejillas en lugar de a las redes de alta tensión, se forma un esquema de generación distribuida (conexión a rejillas alimentadas también por energías no convencionales). Por consiguiente, el paradigma de que la electricidad fluye solo desde el SIN a los usuarios regulados comienza a desmoronarse (Slootweg). Con altas concentraciones de generación distribuida (generación no convencional) y en situaciones de baja carga, la electricidad puede fluir fácilmente 'hacia el SIN', con esto hacemos referencia a inyectar energía opuesta a su dirección 'tradicional'. Este concepto final es el que prima en la creación de nuevos dispositivos que contribuyan a este flujo bidireccional entre el SIN a los usuarios regulados.

TRIAC (Triodo de Corriente Alterna) En la electrónica de potencia el TRIAC es un elemento que se usa para controlar el flujo de corriente promedio a una carga, con la particularidad de que conduce en ambos sentidos y puede ser bloqueado por inversión de la tensión o al disminuir la corriente por debajo del valor de mantenimiento. (GERARDO)

El TRIAC se comporta como un interruptor dejando que la corriente fluya en ambas direcciones dependiendo de la polaridad de la tensión. El TRIAC actúa como dos rectificadores controlados de silicio (SCR) en paralelo (GERARDO). El TRIAC posee dos ánodos denominados (MT1 y MT2) y una compuerta G ver figura.

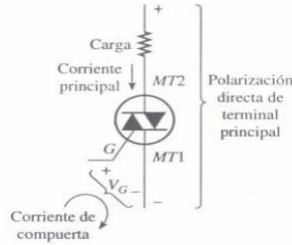


Figura 3. Diagrama general de un TRIAC (GERARDO)

Si se polariza al TRIAC con una tensión positiva en MT2 respecto de MT1 con el terminal G al aire, y aumentamos el valor de esta polarización, se obtendrá una curva característica, tal como se muestra Ilustración 6.

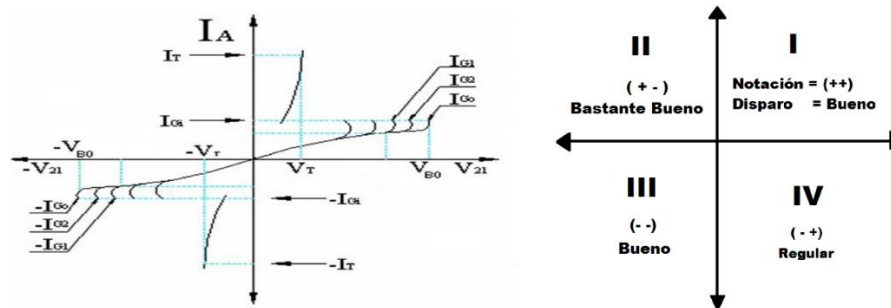


Figura 4. Curvas características del TRIAC

Si el terminal G se conecta a una fuente de tensión respecto de MT1, vemos que el momento del cebado del TRIAC se adelanta respecto al anterior. Lo excepcional del TRIAC es que esté cebado se produce independientemente de sentido de la tensión aplicada a la puerta. Tomando como referencia el terminal MT1 y en función del sentido de las polarizaciones de los circuitos principales y de arranque, cabe hablar de los cuatro cuadrantes de disparo del TRIAC, tal como se ve en la Gráfica. Del análisis de la Ilustración 4 se deduce que hay tres posibles modos de aplicar el impulso de disparo de un TRIAC:

- Disparo por impulsos siempre positivos (cuadrantes I y IV). Es la forma más cómoda si se dispone de una fuente de señal de disparo suficientemente potente, ya que presenta el inconveniente de la menor sensibilidad al cebado del elemento en el cuadrante IV. (DOCUMENTACIÓN)

- Disparo por impulsos siempre negativos (cuadrantes II y III). Presenta el inconveniente de la mayor intensidad de cebado requerida en el cuadrante II.

- Disparo por impulsos alternativamente positivos y negativos (cuadrantes I y III).

Por lo visto anteriormente, se trabaja preferentemente con la misma polaridad para la tensión MT1 - MT2 (VII) que para la tensión G-MT1 (VG), o bien, si sólo es posible disponer de impulsos de control de una única polaridad, con impulsos siempre negativos. (DOCUMENTACIÓN)

1.5.3 MOSFET (Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor) Son transistores controlados por tensión. Existen dos tipos básicos de MOSFET, los de canal n y los de canal p. Tenemos fundamentalmente tres zonas de trabajo bien diferenciadas (POTENCIA):

- Corte: La tensión entre la puerta y la fuente es más pequeña que una determinada tensión umbral (V_T), con lo que el dispositivo se comporta como un interruptor abierto.

- Óhmica: Si la tensión entre la puerta y la fuente (o surtidor) es suficientemente grande y la tensión entre el drenador y la fuente es pequeña, el transistor se comporta como un interruptor cerrado, modelado por una resistencia, denominada RON.

- Saturación: Si el transistor está cerrado, pero soporta una tensión drenador-surtidor elevada, éste se comporta como una fuente de corriente constante, controlada por la tensión entre la puerta y el surtidor. La disipación de potencia en este caso puede ser elevada dado que el producto tensión-corriente es alto.

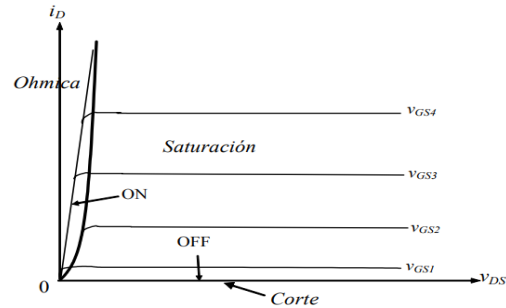


Figura 5. Característica estática del transistor MOSFET (POTENCIA)

Nos interesa que un MOSFET trabaje en corte o en óhmica (interruptor abierto o cerrado). Para el criterio de diseño del IPS propuesto en este trabajo de grado se tuvo en cuenta la configuración antiparalelo emisor común (EC). Presentado en la lustración.

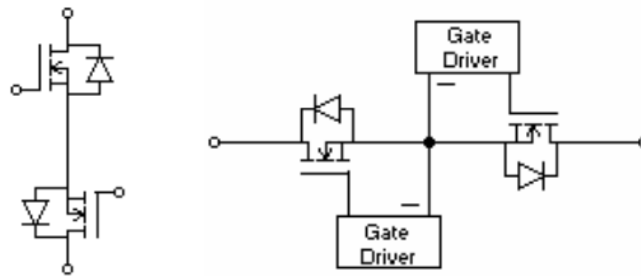


Figura 6. Conexión MOSFET emisor común (DISPOSITIVOS ELECTÓNICA DE POTENCIA)

Para esta estructura las pérdidas por conducción son menores debido a que la corriente es ahora conducida por sólo dos dispositivos. Este arreglo permite controlar independientemente la dirección de la corriente en el interruptor bidireccional. Algunos de los inconvenientes de trabajar con ellos se presentan a continuación. (CONVERTIDOR MATRICIAL)

- Una desventaja es que para cada celda de conmutación se requiere una fuente aislada para los drivers de disparo.

- Los Mosfet tienen el problema de ser muy sensibles a las descargas electrostáticas y requieren un embalaje especial.
- Es relativamente difícil su protección.
- Los Mosfet son más caros que sus equivalentes bipolares.
- La resistencia estática entre el Drenador-Surtidor, es más grande, lo que provoca mayores pérdidas de potencia cuando trabaja en Conmutación.

1.5.4 Interruptor Inteligente de Potencia (IPS) El conmutador de potencia (IPS) es un dispositivo que enruta la energía de puerto a puerto, los componentes del IPS están interconectados para permitir este cambio en el flujo de energía. Así como múltiples puertos pueden ser conectados entre sí para proporcionar energía entre ellos, los interruptores controlan las conexiones entre las líneas y permiten o impiden su conducción (Ilustración 7). Se pueden usar varios equipos de IPS conectados y configurarlos en conexión cascada. También se pueden obtener varias configuraciones como: de proveedores múltiples a un solo consumidor, proveedor único a múltiples consumidores, y la conexión en paralelo.

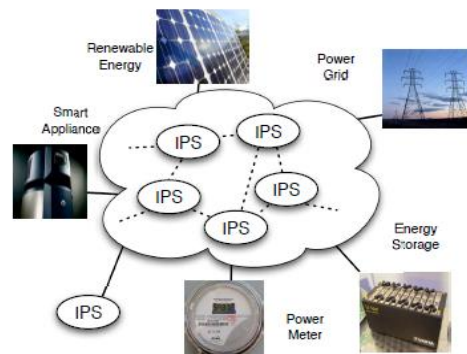


Figura 7. Esquema de una red inteligente con actividad de los IPS (Song, 2010)

Este dispositivo de direccionamiento de potencia por medio de conmutaciones estará gobernado por un control programado o automático, el usuario enviará los comandos necesarios para hacer la conmutación. (Song, 2010)

2. Simulación de un interruptor inteligente de potencia

2.1 Topología del enrutador de potencia

El diseño consta de relacionar el número de interruptores y puertos de conexión (tanto de entradas como salidas) de acuerdo con un sencillo cálculo, como se representa en la siguiente formula (Song, 2010):

$$N_s = \frac{N_p \times (N_p - 1)}{2}$$

Figura 8. Ecuación, cálculo de TRIACs por cantidad de puertos

Donde:

N_s: número de interruptores

N_p: número de puertos

Para la propuesta del trabajo de grado se obtiene.

$$N_s = \frac{6 * (6 - 1)}{2} = 15 \text{ Triacs}$$

En concordancia con lo establecido en el prototipo se requieren quince interruptores para poder conmutar seis puertos en múltiples combinaciones.

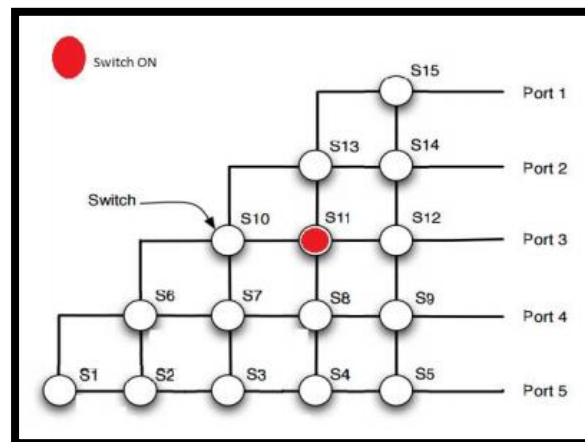


Figura 9. Topología de red de un IPS (Song, 2010)

2.1.1 Estructura IPS de seis puertos El esquema general de la Ilustración 10 demuestra los enlaces puerto a puerto con un total de quince interruptores o TRIACs. Cada interruptor es representado por una caja. Esta caja contiene el TRIAC y su circuito de activación. Cada puerto tiene a disposición un canal de comunicación para los puertos restantes, sin importar su naturaleza ya sea fuente de energía o carga por alimentar. Mínimo deberá haber conectada una fuente de energía para obtener la corriente circulante que pueda viajar a través de estos canales y llegar a las cargas o puertos. Así como un número variado de posibles escenarios de conexión.

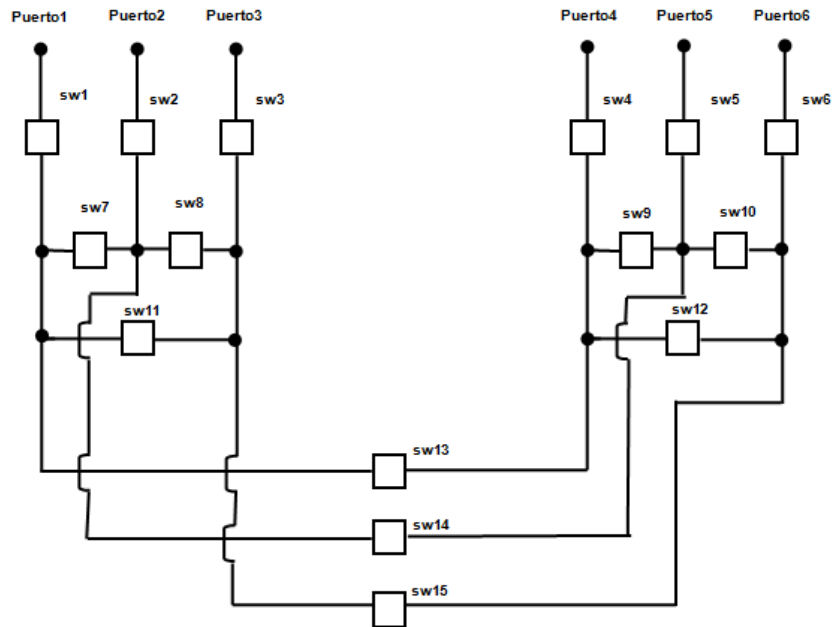


Figura 10. Esquema de un IPS con seis puertos y quince TRIACs

Al ser un número considerable de interruptores de potencia se plantea hacer este conmutador de potencia flexible. Es decir, que a pesar de formar un IPS de seis puertos se pueda descomponer en módulos. Fragmentando este IPS en tres módulos con características propias que no intervienen con el funcionamiento del prototipo final. Dos secciones (módulos) idénticos cada uno con tres puertos, y una tercera sección de enlace. Por medio del módulo de enlace se puedan interconectar y así conformar finalmente el prototipo de seis puertos ya mencionado (configuraciones que se explicarán más adelante en el documento). Ofreciendo la menor cantidad de maniobras de conmutación entre puertos (la menor cantidad de TRIACs por camino de corriente).

2.1.2 Módulos para un IPS de seis puertos En la Ilustración 11 se fragmenta el IPS de seis puertos, en tres secciones. El módulo uno y dos de la figura serán idénticos, con esto se hace referencia a la misma cantidad de puertos y de TRIACs interconectados. Así, de esta forma el uso

de un solo modulo será totalmente funcional. Pasará a ser un IPS de tres puertos. El objetivo de este planteamiento es hacer el dispositivo lo más compacto y dúctil posible. Si se llegara a presentar alguna falla o daño en algún elemento podrá aislarse mientras se realizan las correcciones respectivas; sin afectar la funcionalidad del resto del dispositivo. No sería necesaria la desconexión total de los circuitos relacionados. El tercer modulo (módulo de enlace), corresponde a tres TRIACs con una línea de salida y entrada cada uno. Como su nombre lo dice se encarga establecer conexión entre los dos módulos principales y precisar el dispositivo completo (IPS de seis puertos).

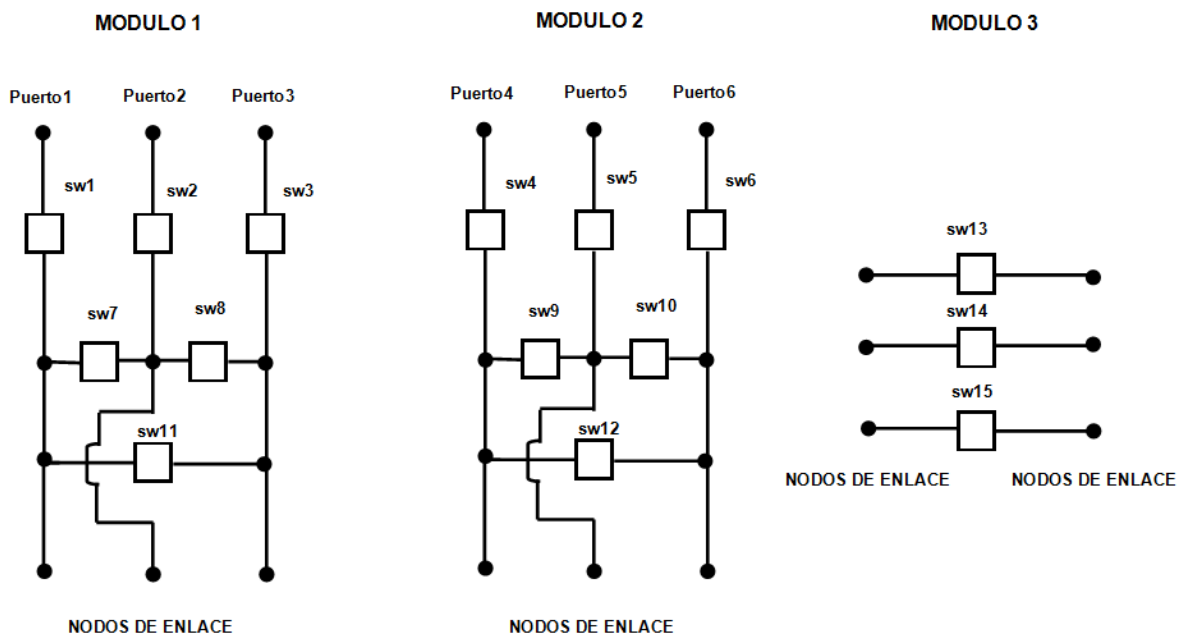


Figura 11. Módulos diseñados para uso individual o complementario

2.1.3 Conmutación Puerto A Puerto Al ser un dispositivo con varios puertos y con la libertad de conectar tantas fuentes de la misma naturaleza como circuitos demandantes, las secuencias de conmutación son diversas.

Se hará la aclaración sobre la conexión o interrupción del paso de corriente tanto para el IPS de seis puertos y el módulo de tres puertos. Cada escenario de conmutación tiene datos propios que serán presentados de la siguiente forma.

- **Funcionamiento de los puertos:** Tabla donde se relaciona que puerto es fuente de energía eléctrica y cual es una carga.
- **Esquema del IPS:** Una imagen de la conexión que hace referencia a los módulos que se encuentren interactuando y en funcionamiento.
- **TRIACs activos:** Una convención dentro del esquema del IPS. Por medio de colores se identifica cada circuito activo y la cantidad de interruptores (TRIACs) que se está en conducción.

2.1.3.1 IPS de seis puertos (tres módulos en funcionamiento)

Tabla 1.

Puertos en actividad, IPS 6 puertos primer escenario

Puertos	Fuente	Carga
1	X	
2	X	
3	X	
4		X
5		X
6		X

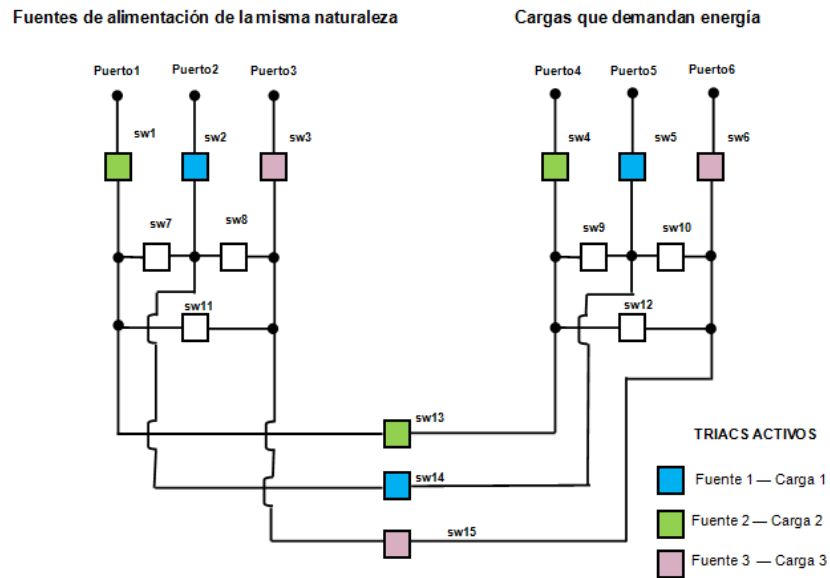


Figura 12. IPS 6 puertos, primer escenario

2.1.3.2 IPS de tres puertos, funcionamiento por módulos

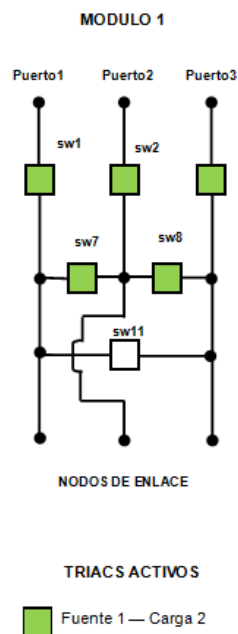


Figura 13. IPS de tres puertos, primer escenario

Tabla 2.

Puertos en actividad, IPS de tres puertos primer escenario

<i>Puertos</i>	<i>Fuente</i>	<i>Carga</i>
1		X
2	X	
3		X

Nota: El funcionamiento de Módulo 2 puede desarrollarse de igual forma que el Módulo 1. El Módulo de enlace solo es útil a la hora de formar el IPS de seis puertos, no puede realizar activaciones entre el mismo si no se encuentra interconectado con los demás módulos.

Para ampliar esta información en el **Apéndice A** se encuentran diagramas complementarios en donde se desarrollan otros ejemplos de conexión, demostrando la versatilidad del prototipo.

2.2 Simulación

Para poder acercarnos empíricamente a las posibles especificaciones de TRIAC de acuerdo con las posibles cargas que se pueden encontrar en un hogar, se decidió elegir para efectos de simulación, una de las que mayor consumo representan actualmente en los hogares, la lavadora, por estar compuesta de un motor monofásico asíncrono es una de las cargas que ocasionan mayor consumo debido a sus demandas de energía en arranque y de cambio en el sentido de giro.

Tabla 3.

Carga a simular

Modelo carga RL: Lavadora	
Factor de potencia	0.85
Tensión	120/208 Voltios
Frecuencia	60 Hz
Potencia	430 W
Velocidad	850 rpm

Para poder realizar una conmutación segura, es decir con la menor posibilidad de daño por efectos transitorios o aumentos no deseados de tensión o corriente, la maniobra de conmutación se debe realizar en los cruces por cero (ver **Apéndice B**) de la señal de entrada en Corriente Alterna (CA); asumiendo que el usuario posee cargas comunes a 120/208V CA. Para esto realizó el diseño de dos circuitos de detección de cruce por cero de acuerdo con los elementos que posee cada software de simulación los cuales se muestran en el **Apéndice B**.

Nota: Cabe resaltar que por el destino de aplicación del IPS se toma como cierto que los aparatos serán por defecto de conexión monofásica las formas de onda que se conectaran a cada puerto deben ser iguales en sus valores de tensión y frecuencia y no deben presentar desfases angulares entre ellas.

2.2.1 Simulaciones en PSIM Para la simulación en *psim* realizamos la conexión la cual se amplía en el **Apéndice B**.

El control para la conmutación se realizó a través de la herramienta “C-Block” la cual se compone de una o varias entradas y salidas las cuales se pueden activar mediante órdenes en lenguaje básico de programación C, permitiendo separar los disparos por tiempos, o condiciones de otras salidas (Ilustración 14).

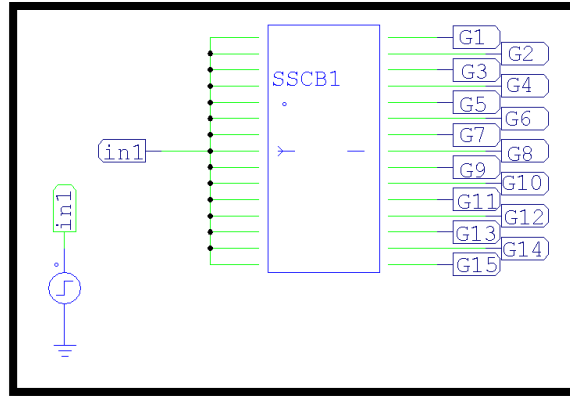


Figura 14. Método de activación de TRIACs "C-Block"

Carga para simular (Ilustración 15) de acuerdo con los criterios seleccionados en la sección 3.2.

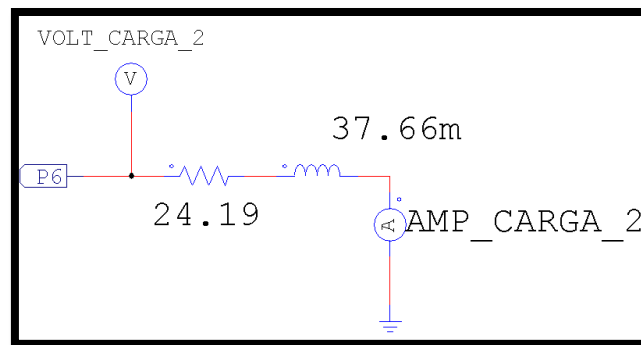


Figura 15. Modelo de carga a través de su impedancia

Resultados

- Escenario 1: En se conectaron la fuente número 1, a la carga 2 como se muestra Para este caso la activación se realiza en los interruptores G11, G6 y G15 (ver **Apéndice**), se realizan mediciones de tensión entre la entrada a la carga a tierra y de corriente a través de la carga, así mismo se mide simultáneamente la tensión en la fuente con el fin de verificar la activación del TRIAC en el cruce por cero previsto por el circuito. Los multímetros están identificados con un

círculo y la letra “V” y los amperímetros con la letra A. La maniobra 1 se completa, con una tensión de carga de 120 Voltios, y una corriente de 4,33 Amperios a través de todo el circuito.

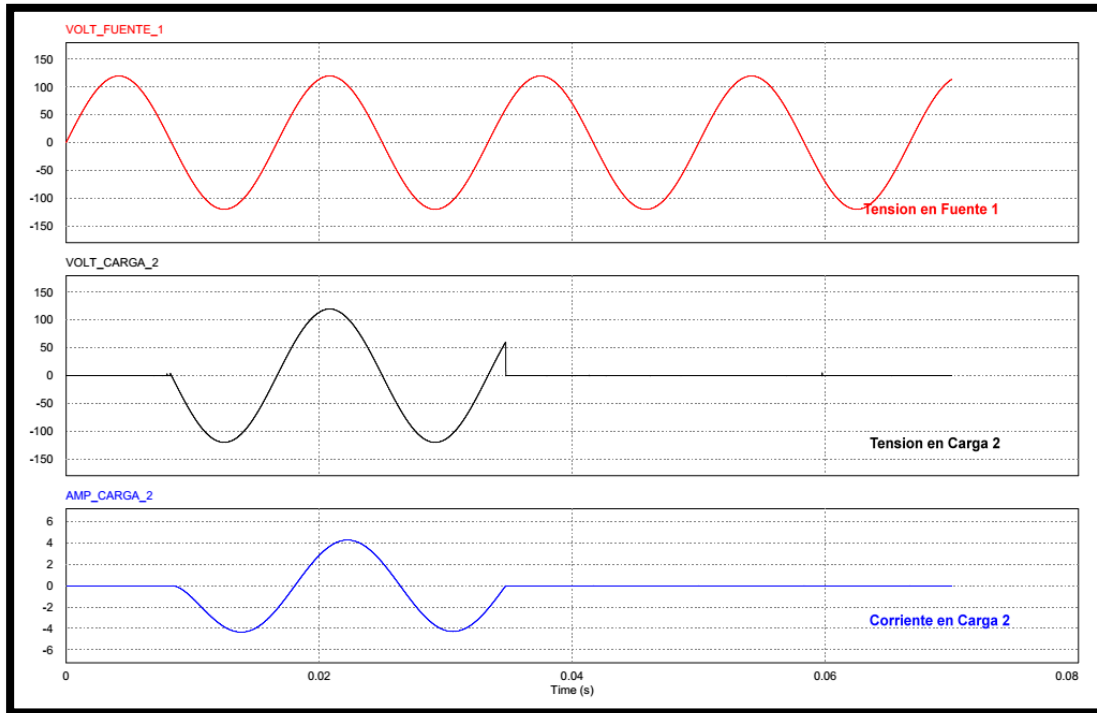


Figura 16. Orden descendente la tensión de la fuente 1, la tensión en la carga 2 y la corriente en la carga 2, la conmutación o activación se realiza en 0,005 segundos, pero la entrada de energía solo se da en la detección del primer cruce por cero ubicado después de un punto del punto de conmutación en 0,008 segundos aproximadamente

- Escenario 2: A continuación, se accionan los interruptores G12, G8 y G14 permitiendo la conexión entre la carga 1 y la fuente 2, de nuevo. La maniobra 2 se completa, con una tensión de carga de 120 Voltios, y una corriente de 4,33 Amperios a través de todo el circuito.

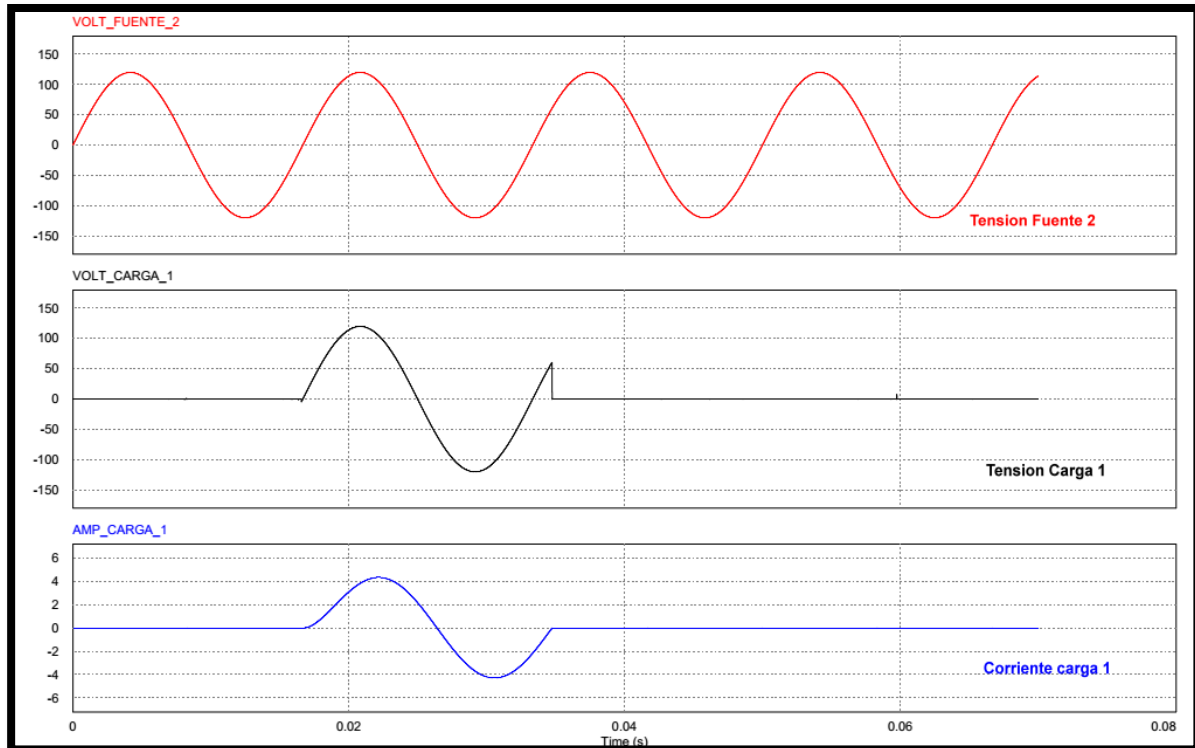


Figura 17. Se muestra que la activación se realiza en 0,012 segundos, aun así, la energía solo entra a la carga 2 a los 0,016 segundos, tiempo en el que se presenta el segundo cruce por cero. EL orden descendente es: la tensión de la fuente 2, la tensión en la carga 1 y la corriente en la carga 1

- Escenario 3: Integración de dos fuentes a un mismo circuito ramal, es así que en esta conmutación las fuentes 1 y 2 se conectaran a la carga 3 para esto se accionaran los interruptores G2, G3, G5, G8, G10, G11, G12. La activacion de interruptor se dio en 0,038. Aun así no es sino hasta 0,0416 que se energiza la carga numero 3.

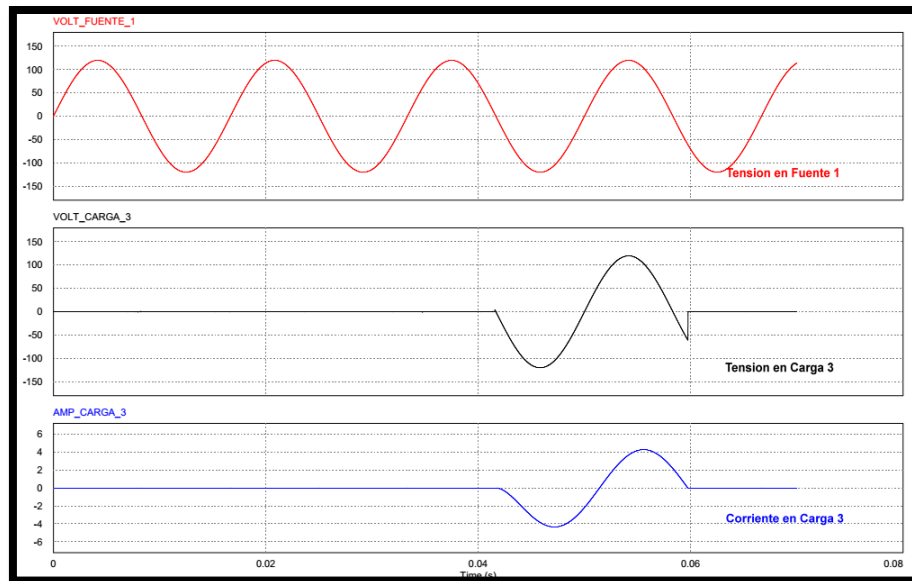


Figura 18. Tensión y corriente conexión de fuente 1 y 2 a carga 3 a través de la configuración

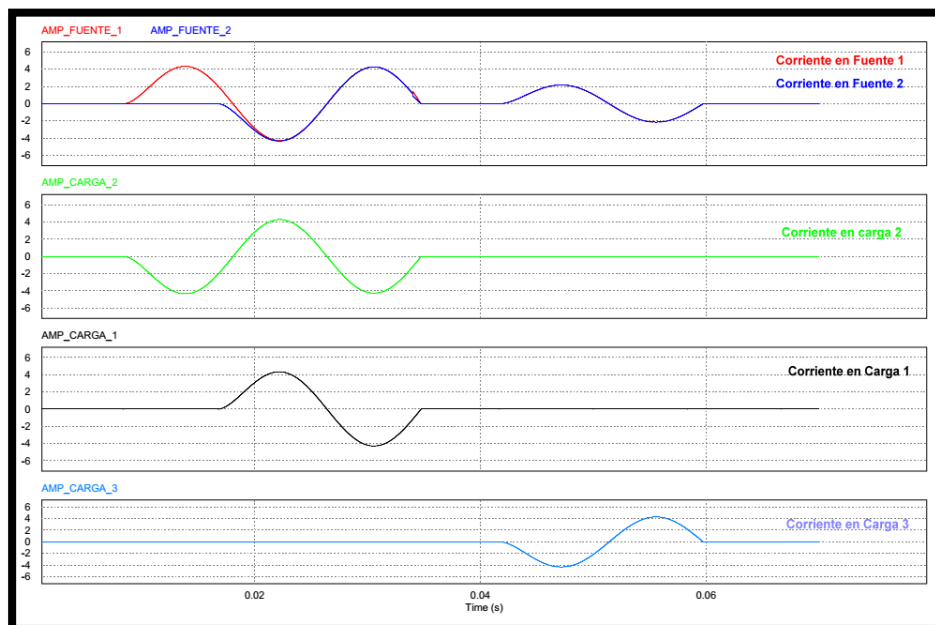


Figura 19. Se muestra toda la acción de conmutación a través de su graficas de corriente con el fin de observar la respuesta de los detectores de cruce por cero y también de la conmutación deseada. A través de la configuración del IPS desde las dos fuentes y la respuesta en cada carga.

Usando el elemento MOSFET para la simulación se conservó el orden de conmutación los tiempos determinados con el fin de poder compararlos.

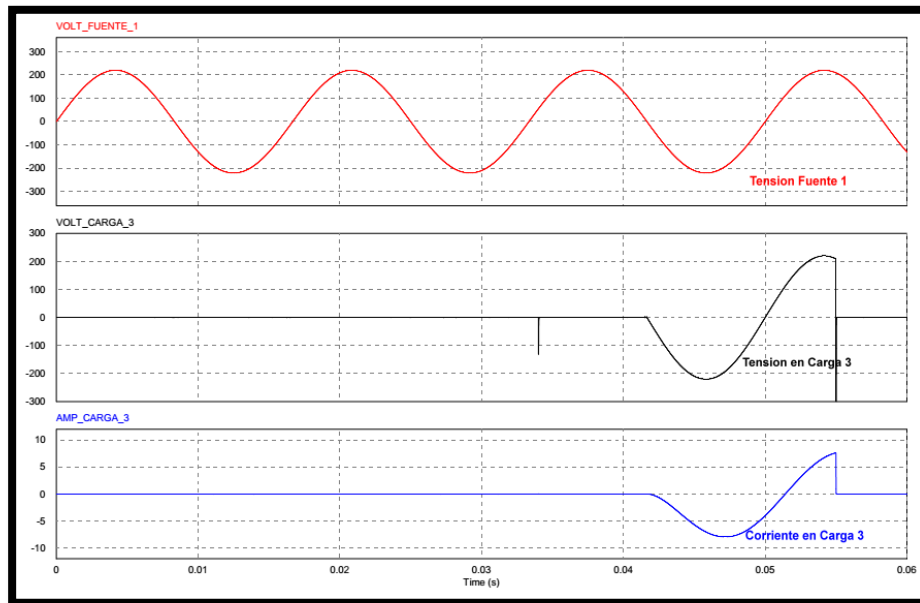


Figura 20. Simulación psim con MOSFET, fuente 1 y 2 a la carga 3

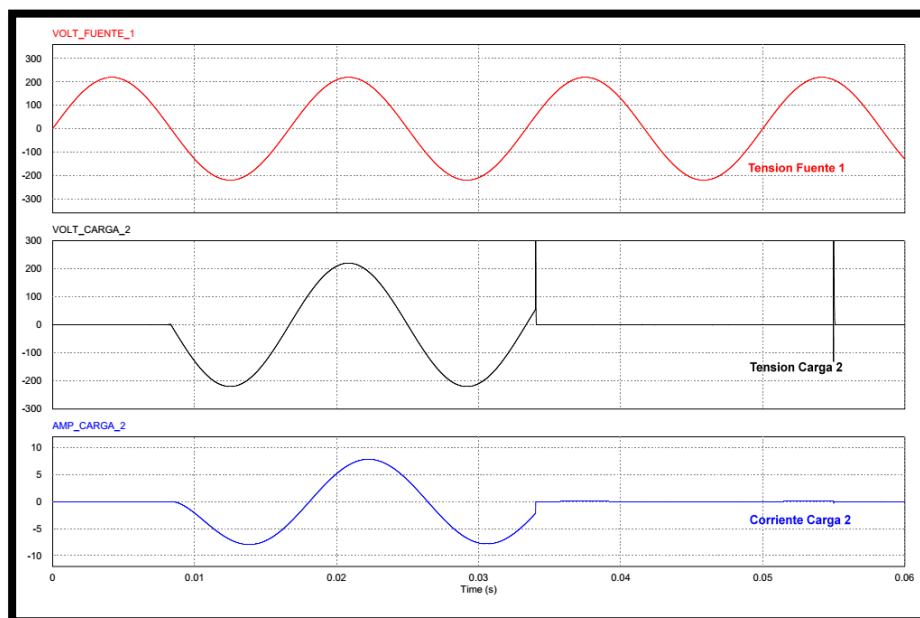


Figura 21. Simulación psim con MOSFET, fuente 1 a la carga 2

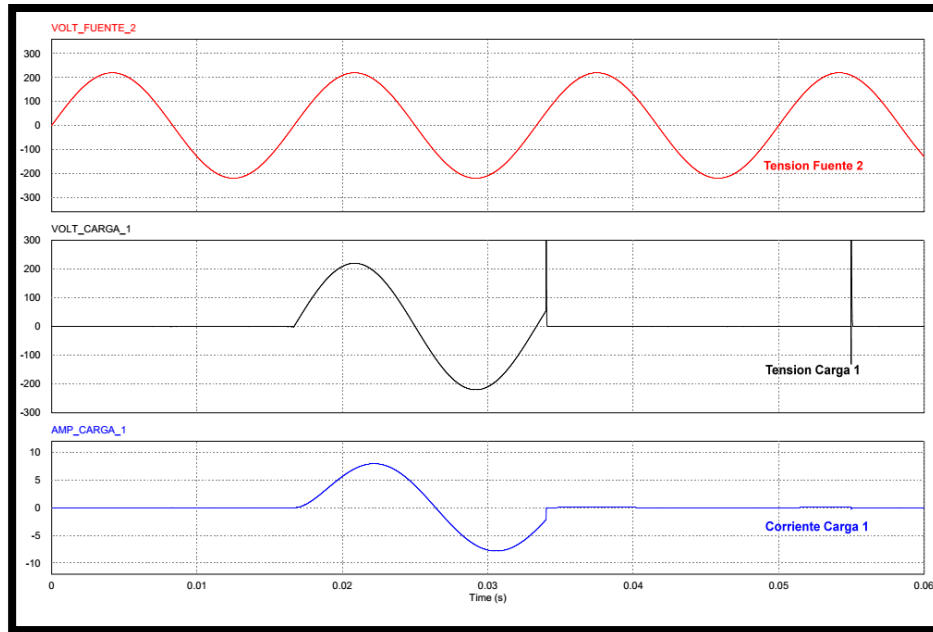


Figura 22. Simulación psim con MOSFET, fuente 2 a la carga 1

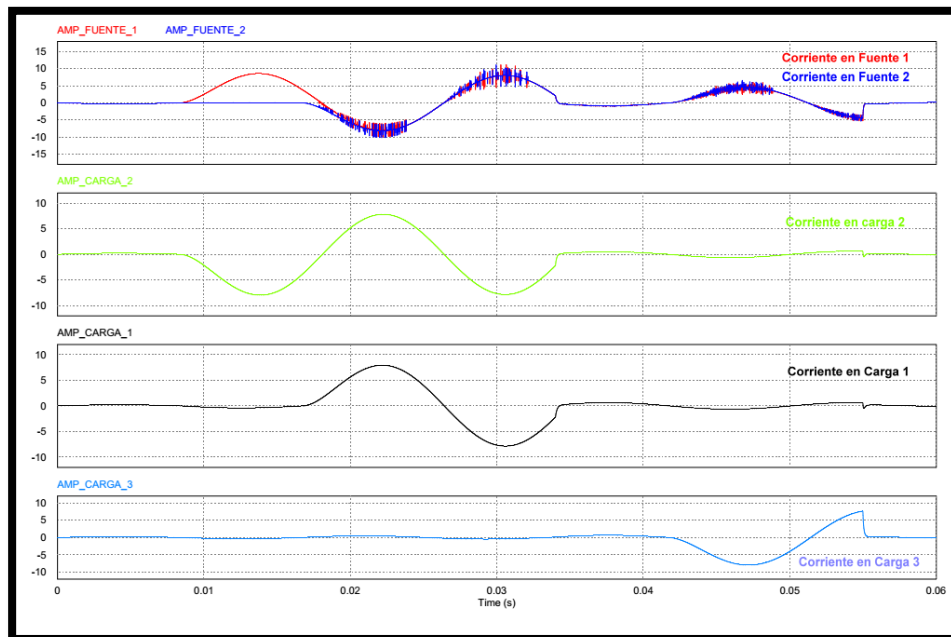


Figura 23. Simulación psim con MOSFET, todas las corrientes de Ilustración 20, 21, 22

2.2.1 Simulaciones en OrCAD Lite *OrCAD Lite* es una herramienta de simulación de circuitos eléctricos en la cual se puede tener una mejor aproximación a condiciones reales de operación de los sistemas diseñados. En el **Apéndice B** se observa el esquema de conexión del dispositivo para el simulador *OrCAD Lite*.

Como circuito de interruptor se exporto el TRIAC Q8025L6 desde la página de *LittleFuse* en formato CAD, y se adicionaron las propiedades desde la hoja de datos del mismo fabricante.

Con el objetivo de poder comparar los resultados se hizo cada una de las maniobras realizadas en el software *psim*. A continuación, se presentan los resultados de los escenarios simulados (Ilustración 24, 25, 26).

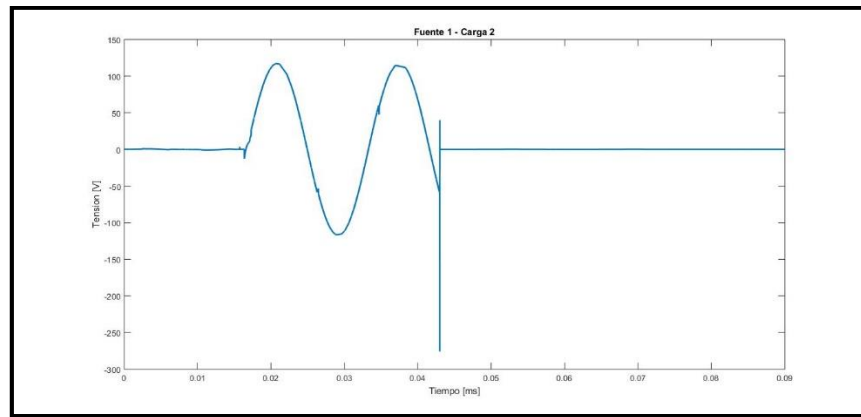


Figura 24. Escenario 1, fuente 1 a carga 2

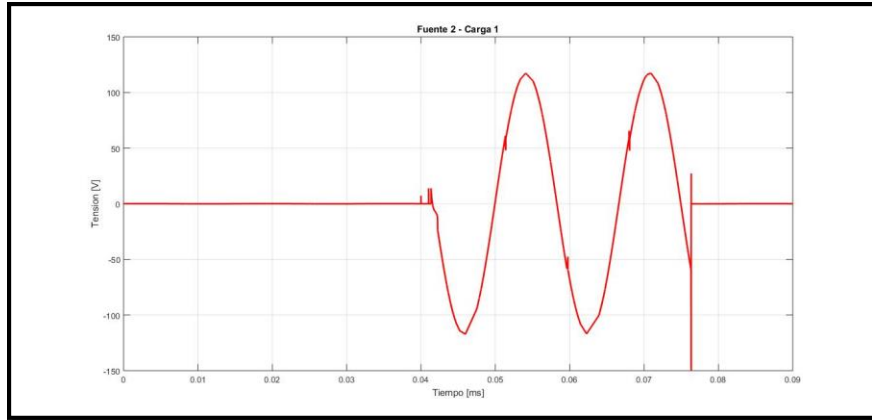


Figura 25. Escenario 2, fuente 2 a carga 1

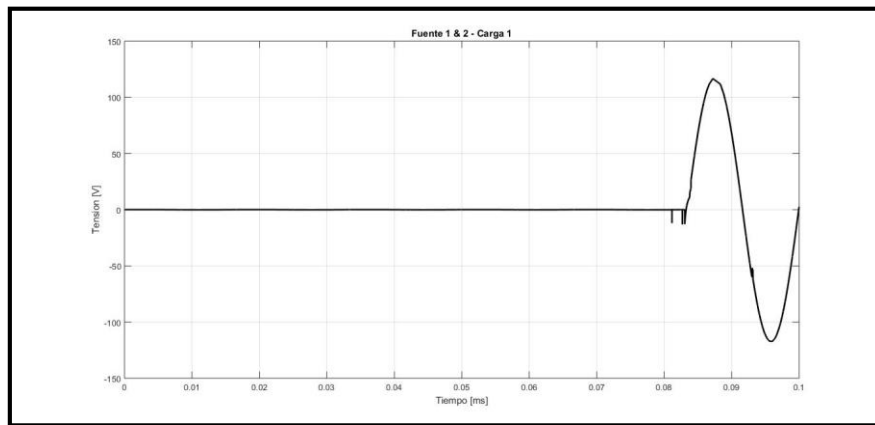


Figura 26. Escenario 3, fuente 1 y 2 a carga 1

Nota: Los escenarios planteados en la sección 4, son independientes de los escenarios presentador en la sección 3, en donde se explicó la topología de red del IPS de seis puertos y de tres puertos.

3. Selección de componentes electrónicos

Con base a la simulación, costos de compra y tamaño, se tomó la decisión de trabajar con TRIAC con una característica de tensión 800 voltios y 25 amperios, estos van a manejar 120 Voltios RMS, máximo 8,5 amperios por rama. En el plan de desarrollo sobre el diseño del prototipo se contempló utilizar los MOSFET en una configuración emisor común. Sin embargo, comparando las características eléctricas de conmutación y practicidad de los elementos se encontró una gran desventaja. En el TRIAC solo es necesario la participación de una fuente aislada de disparo. El MOSFET requiere dos de estas fuentes para accionarse y ocupa el doble de espacio físico para poder cumplir con el criterio de bidireccionalidad; aspecto por el cual no se consideró viable un IPS con MOSFETs.

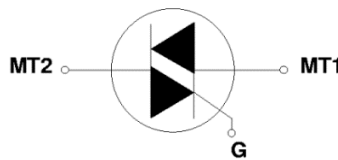


Figura 27. Esquemático de un TRIAC

Este interruptor de potencia debe ser accionado por una fuente externa de disparo. Para nuestro diseño en particular se seleccionó un Opto acoplador. Este elemento tiene una configuración favorable y es la de ayudar a que el montaje aisle su control de disparo y el circuito de potencia. Protegiéndolo de posibles corrientes de fuga que puedan perjudicar la durabilidad del conmutador.

Ya que su control se realiza a través de un haz de luz que activa el paso de corriente hacia el Gate del TRIAC.

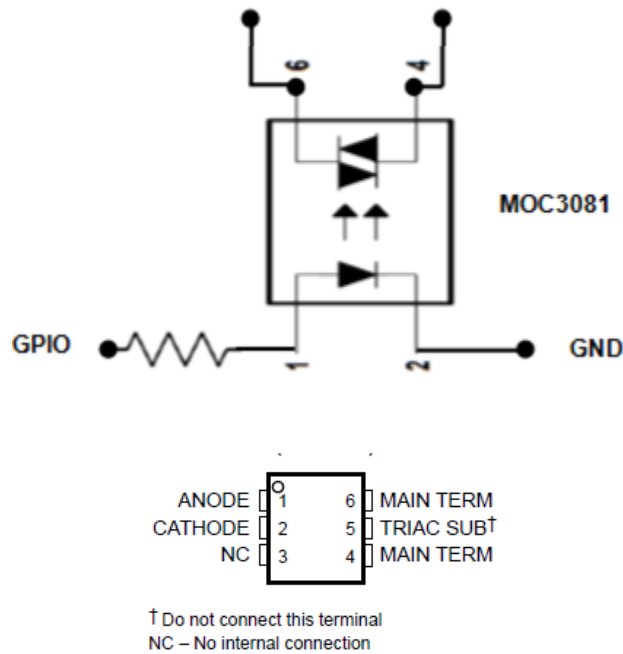


Figura 28. Esquema de opto- acoplador en circuito de disparo.

Adicionalmente en la oferta comercial pudimos encontrar un componente optoacoplador MOC 3081 el cual contaba con la propiedad de cruce por cero pre-configurada desde su fabricación. Facilitando la configuración del diseño con el reemplazo del circuito de cruce por cero planteado en las simulaciones, y nos permitió reducir en tamaño el diseño del prototipo. Los elementos que manejan menores corrientes el esquema de un IPS integran el control de disparo, el cual efectúa el cierre de los TRIACs a la orden de usuario. Este circuito de disparo se compone de dos fases. La primera fase es totalmente de control, se encarga de inyectar un diferencial de tensión en los puertos '1' y '2' (Ilustración 28) que pertenecen al MOC. Esta señal se envía a través de una tarjeta electrónica programable (Raspberry *pi*) que envía una señal de tensión DC de 3.3 Voltios a la

compuerta 1 de MOC y de esta forma se permite el paso de una corriente reducida por los puertos ‘4’ y ‘6’ (Ilustración 28) que son los encargados de activar el Gate del TRIAC proporcionándoles la corriente de conmutación (IGT) permitiendo la conducción o la interrupción de la corriente que espera por circular entre los terminales ‘MT1’ y ‘MT2’ del TRIAC.

La tarjeta electrónica recibe la orden de conmutación a través de Wi-Fi desde un ordenador portátil en donde previamente se sistematizo el orden de disparos en lenguaje de programación *Python*, allí se establece la secuencia en que se quieren accionar los interruptores de potencia. Este código de programación fue proporcionado por nuestro codirector Mg. Luis Fernando Rueda (Vásquez, 2017).

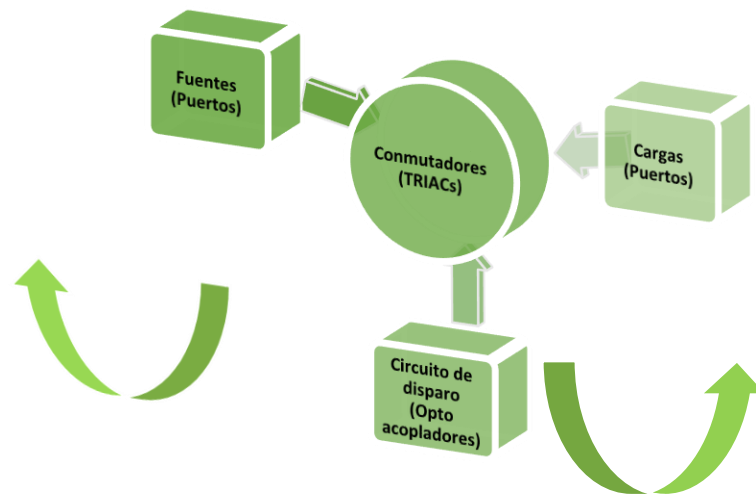


Figura 29. Flujo conceptual de un IPS

A continuación, se especifican elementos que fueron seleccionados para realizar el montaje del IPS. Se enlistan juntos con sus características más importantes.

Tabla 4.

Información TRIAC


 *TO-220	TRIAC	
	Referencia	Q8025L6
Tensión de soportabilidad [Voltios]	80	
Corriente de soportabilidad [Amperes]	25	
Corriente de gatillo [mili Amperes]	80	
Tensión de gatillo [Voltios]	2.5	
Empaquetado	TO 220	

Tabla 5.

Información Opto acoplador


	Opto acoplador	
	Referencia	MOC2081
Tensión de soportabilidad [Voltios]	400	
Corriente de soportabilidad [Amperes]	1.2	
Corriente de gatillo [mili Amperes]	3	
Tensión de gatillo [Voltios]	500	

Tabla 6.

Resistencias circuito de disparo



Resistencias		
	Ohms	330
	Watts	1
	Ohms	150
	Watts	1

Tabla 7.

Resistencia superficial circuito de disparo


Resistencia superficial		
	Ohms	220
	Empaquetado	1206
	Watts	1/4

Tabla 8.

Condensador del circuito de disparo

Condensador	
μF	1
Referencia	104

4. Diseño e implementación

El circuito de interruptor planteado a partir de las simulaciones y de los elementos determinados y encontrados en la oferta comercial, se estableció como ya se mencionó anteriormente, con una sección de control aislada eléctricamente del circuito de potencia a través del MOC, al otro lado se usa el TRIAC seleccionado, adicionalmente y para evitar una señal de activación falsa del interruptor ocasionada por ruido electromagnético, se coloca un filtro RC conectado a la compuerta Gate del TRIAC.(Ilustración 30). Este filtro

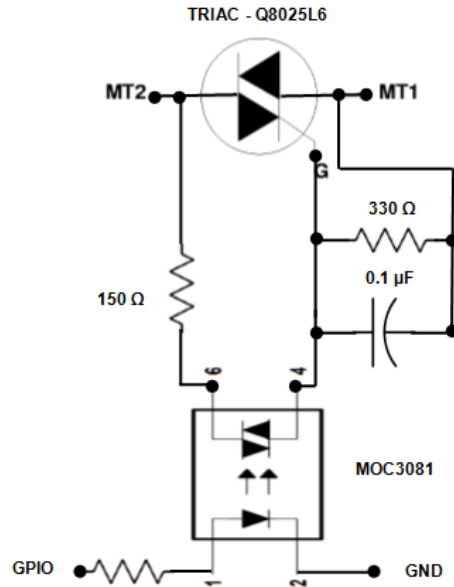


Figura 30. Esquema circuital de un interruptor

Se determinó agregar todos los componentes en una *protoboard* con la configuración diseñada, se realizó una pequeña prueba de conmutación teniendo como fuente el generador de señales del laboratorio evitando así que pasaran corrientes de valores considerables que pudieran causar algún tipo de daño. En un principio, el primer módulo que se implementó contaba con 3 tres puertos (**ver Apéndice D**) de esta forma podríamos tener las primeras aplicaciones con algo similar a lo propuesto en las simulaciones.

4.1 Diseño Eagle light versión de uN IPS

El prototipo se desarrolló por medio de software *EAGLE light versión*. Cada módulo cuenta con su propio diseño. En el **Apéndice C** se encuentran detalladamente los diseños de los módulos del IPS.

Observaciones:

- El módulo 1 fue seleccionado como la entrada para los pulsos que accionan los Opto acopladores que se encargan de permitir la conducción de los TRIAC. Los demás bloques del IPS solo reciben estas señales de control por una sección más pequeña del cableado, con esto se hace énfasis en el transporte por medio de separadores Apilable Header para Raspberry.
- El módulo tres, será entonces denominado “Módulo de enlace”. Por esta razón no tiene puertos directos relacionados con carga o fuente. Solo borneras que ayudan a recibir las corrientes y transmitir las al siguiente bloque.
- El diseño del módulo 2 varía únicamente en el suministro de control para el accionamiento de los TRIACs. Como ya se mencionó el recibe las señales desde que ingresan por el módulo 1.

Tabla 9.

Elementos que componen el Módulo 1

Módulo 1 y 2	
Componentes	Cantidades
TRIACs Q8025L6	6
Opto acopladores MOC3081	6
Resistencias superficiales 220 Ω	6
Resistencias 330 Ω	6
Resistencias 150 Ω	6
Condensadores 1 μ F	6
Borneras para puertos de Potencia	3
Borneras para transición de Módulo	1
Bornera para Opto acopladores	5
Separadores Hembra Apilable Header para Raspberry 40 pines	1
Separadores Macho Apilable Header para Raspberry 20 pines	1

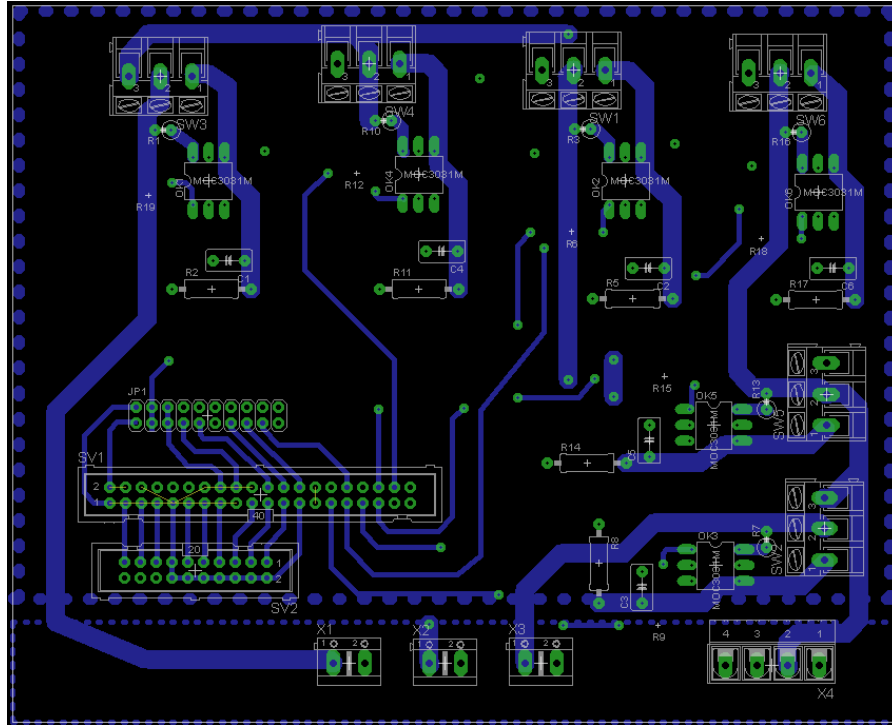


Figura 31. Capa inferior del Módulo 1

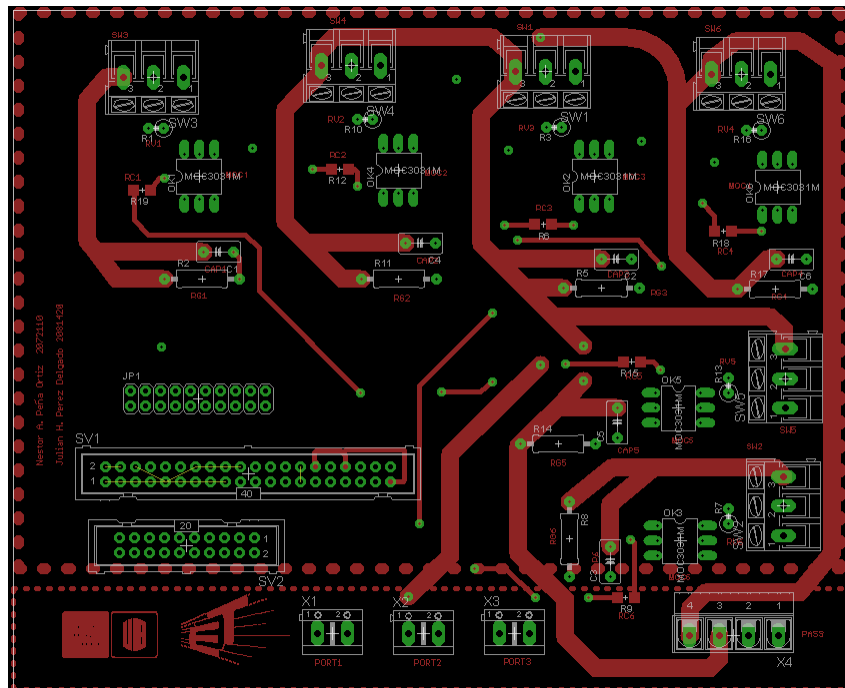


Figura 32. Capa superior del Módulo 1

Tabla 10.

Elementos que componen el Módulo 3

Módulo 3	
Componentes	Cantidades
TRIACs Q8025L6	3
Opto acopladores MOC3081	3
Resistencias superficiales 220 Ω	3
Resistencias 330 Ω	3
Resistencias 150 Ω	3
Condensadores 1μF	3
Borneras para transición de Módulo	2
Bornera para Opto acopladores	3
Separadores Macho Apilable Header para Raspberry 20 pines	1

5. Validación

La conexión que se realiza en IPS, dispone de varios elementos que permiten trabajar en un entorno controlado cuyas condiciones de operación se acerquen en características a lo que sería un circuito ramal en el hogar, además, las pruebas de operación deben contar con elementos que brinden seguridad no solo a los componentes del IPS sino también al equipo de proyecto.

5.1 Montaje real de un IPS

Tabla 11.

Elementos para montaje en el laboratorio

Elementos del montaje para prueba	Característica
Cable AWG	#12
Protección termo - magnética	Schneider Electric de 20 Amperios
Caja de distribución (Gabinete)	Equipado con rieles metálicos y tapa de material plástico
Módulos de conexión	Enclavamiento tipo riel
Módulos de conexión con porta fusible	Enclavamiento tipo riel
Fusible de tipo encapsulado	6 Amperios
Toma corriente	Monofásicos
Porta lámpara plásticos	Para bombilla de 100 Vatios
Bornera de aleación en acero	Para conexión cableada y enclavamiento atornillado
Bombillo incandescente	100 Vatios
Ventilador de mesa	50 Vatios/ 60 Hz/ 125 Voltios
Raspberry	Tarjeta programable

Tabla 12.

Instrumentos de medición en el laboratorio

Equipos
Multímetro
Pinza amperimétrica
Osciloscopio

5.2 Pruebas en un entorno real

Se hicieron mediciones de tensión y se tomaron datos en los principales puntos de la conexión del IPS. Es decir, en la carga, en la fuente de tensión y en el interruptor. El objetivo fue el de observar si existía alguna anomalía o se tenía una lectura inadecuada de tensión y así detectar posibles fallos

en diseño, o daños indirectos a las pruebas del prototipo. A continuación, en las Ilustraciones se presentan los datos obtenidos en el montaje real de prueba.

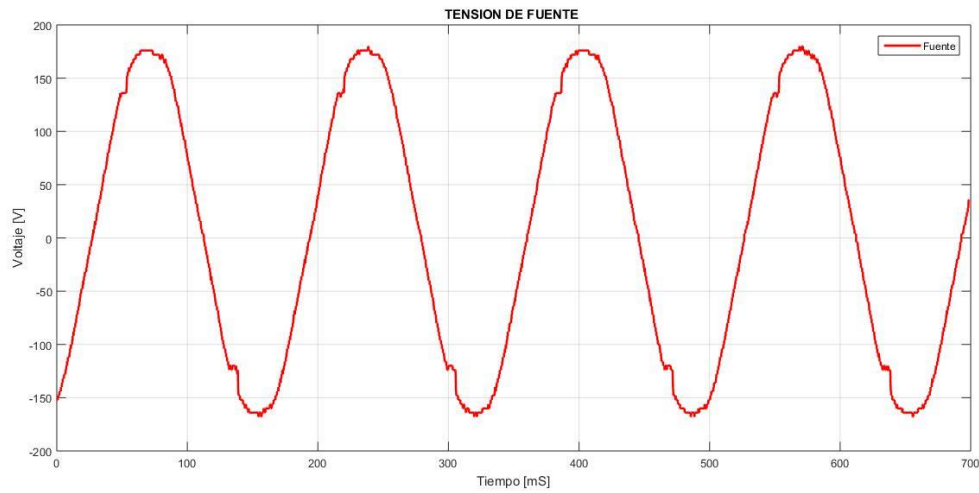


Figura 33. Tensión en la fuente de energía eléctrica

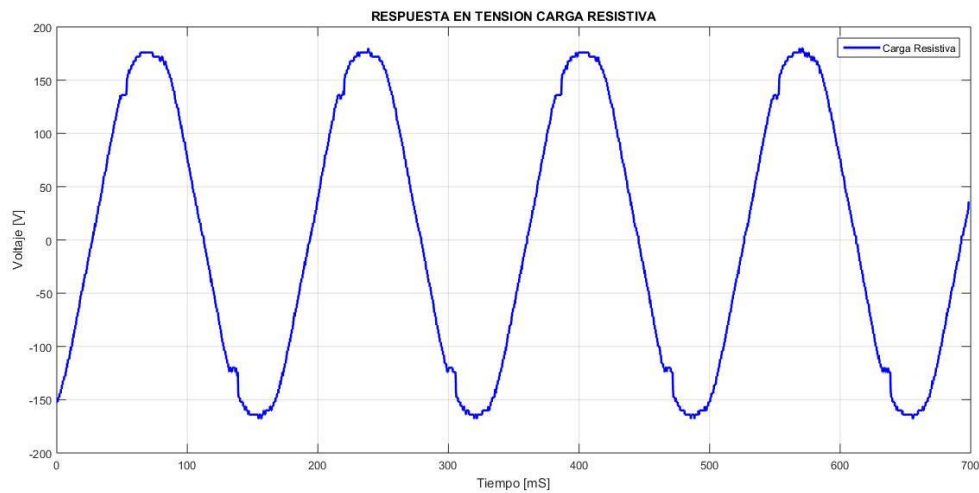


Figura 34. Tensión de prueba en una carga resistiva módulo 1 del IPS

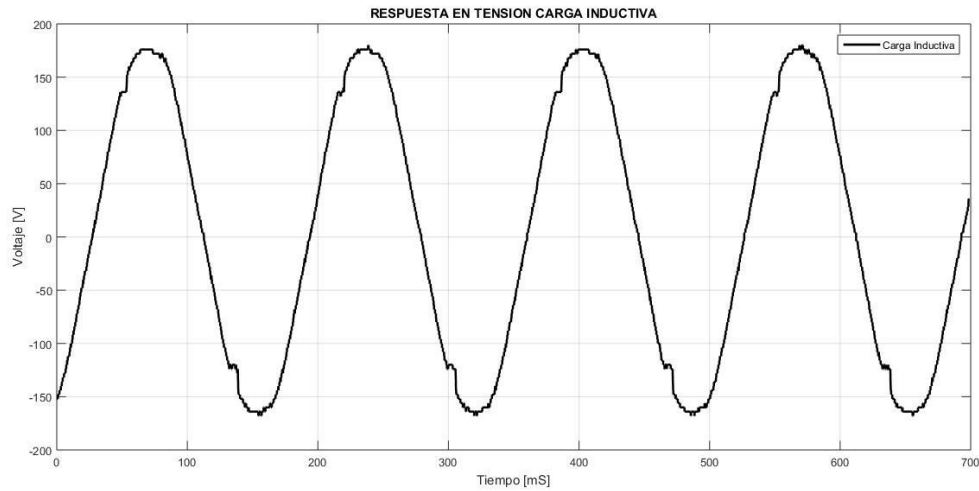


Figura 35. Tensión de prueba carga inductivo módulo 1 del IPS

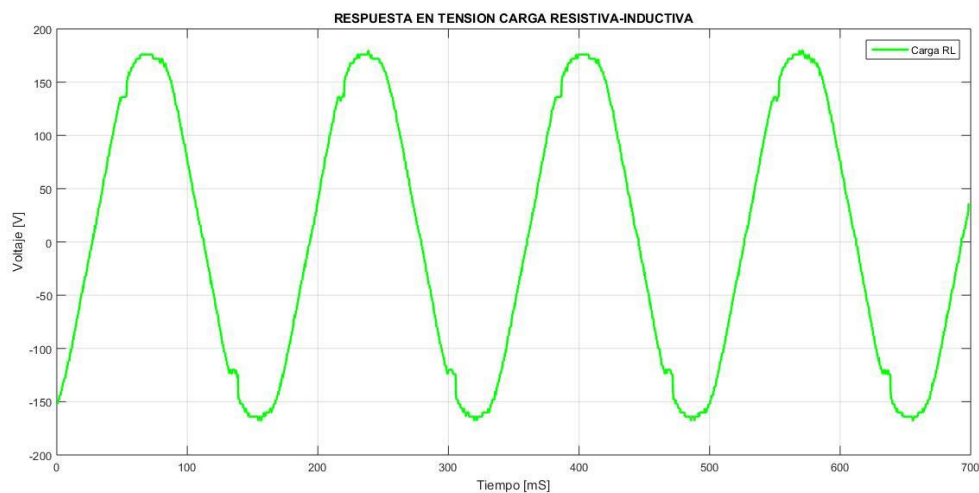


Figura 36. Tensión de prueba carga resistiva e inductiva módulo 1 del IPS

Se observa que la señal de tensión de salida en cada una de las cargas sigue en forma consistente a la señal de entrada, lo cual evidencia que por ahora no se tienen efectos adversos y se comprueba que el dispositivo funciona correctamente.

NOTA: Las gráficas que se muestran a continuación fueron desplazadas verticalmente de sus ejes con el fin de visualizar correctamente la respuesta de cada carga.

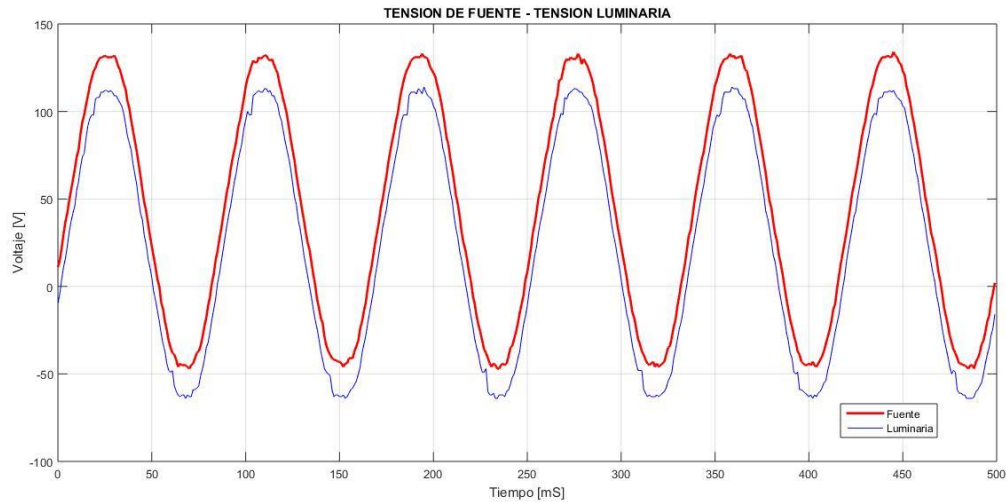


Figura 37. Comparación entre la fuente y una luminaria como carga para un IPS de seis puertos

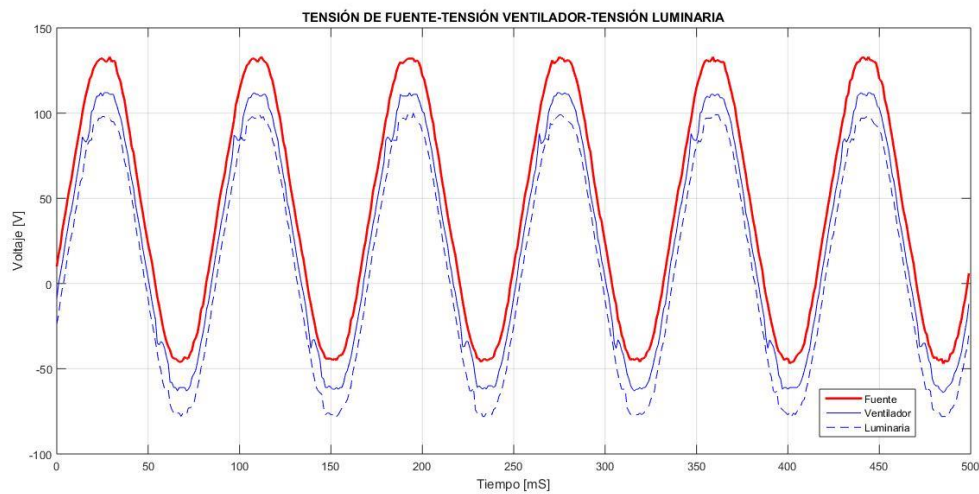


Figura 38. Comparación entre la fuente y una luminaria junto con un ventilador como carga para un IPS de seis puertos

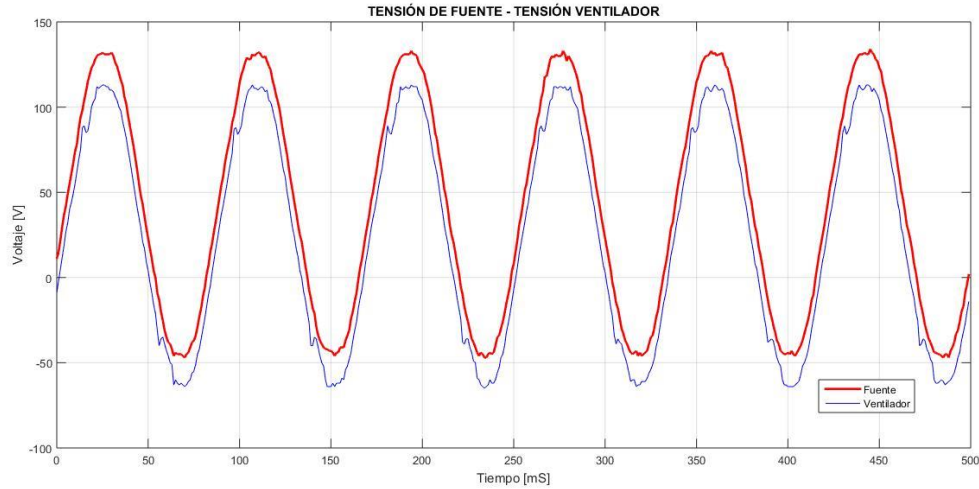


Figura 39. Comparación entre la fuente y un ventilador como carga para un IPS de seis puertos

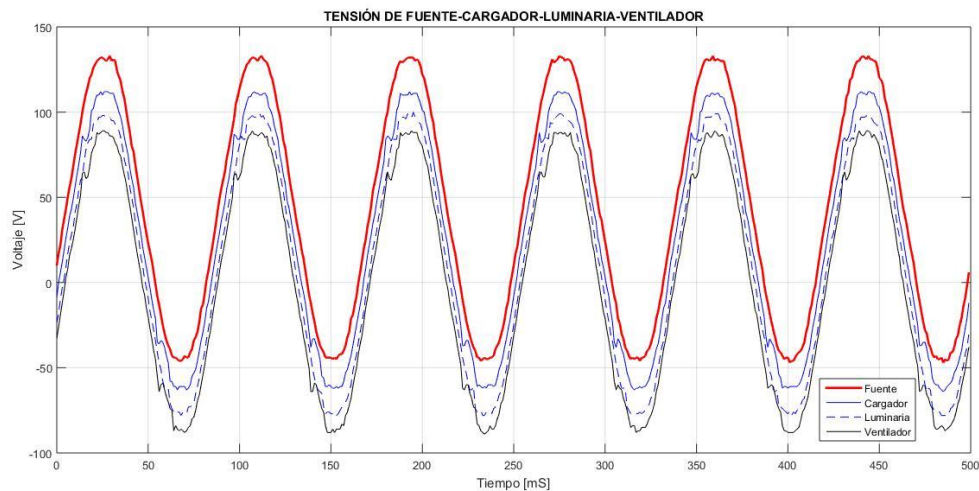


Figura 40. Comparación entre la fuente, una luminaria, un ventilador y un celular cargando como carga para un IPS de seis puertos

De estas ilustraciones se puede inferir que el IPS de seis puertos responde al diseño y al enrutamiento de corriente para el que fue proyectado siguiendo la fuente en tensión y frecuencia. Ajustando la corriente según la demanda sin sobrecargar o alcanzar un valor de corriente fuera de lo convencional. En el **Apéndice D** se encuentran imágenes sobre los módulos y el montaje realizado para la prueba corroborando el funcionamiento del dispositivo. Dentro de las pruebas

realizadas se tuvieron mediciones en valor eficaz de la caída de tensión en cada uno de los TRIACs, se pudo apreciar que entre mayor es la potencia demandada por la carga esta caída de tensión aumenta. Esta medida de tensión esta entre los 0,9 y 2,5 voltios. Dependiendo del número de interruptores usados. Por tanto, se usa una ruta de 5 triacs (ruta crítica) para estimar la regulación de tensión.

$$\%V = \frac{V_p - V_s}{V_p} \times 100$$

$$\%V = \frac{127 - 122}{127} \times 100 = 3,93 \%$$

5.3 Comparación de resultados

Dentro de los propósitos del proyecto se verifico el funcionamiento valido del mismo para la conexión de cargas de un hogar inteligente, con el fin de establecer la veracidad de los resultados, se hizo una revisión del comportamiento dispositivo mediante la comparación de resultados en las pruebas reales con los presentados anteriormente en las simulaciones establecidas.

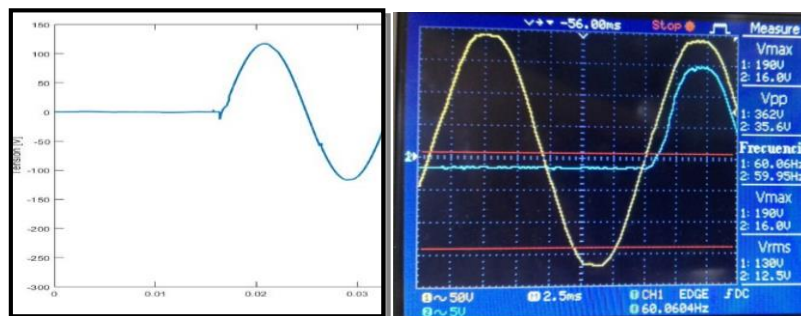


Figura 41. Entrada de la señal de tensión a la carga.

En la simulación, cuando una señal de tensión entra a la carga, se podía observar una pequeña reacción transitoria, sin embargo en la prueba experimental se ve claramente (señal azul), que esta señal parte de un valor de cero, sin ocasionar ningún defecto ni desviación por efectos transitorios, así mismo el cruce por cero planteado por el circuito adicional de la simulación, fue reemplazado con éxito por un elemento optoacoplador, es evidente que la conexión de la fuente se hace sin problemas a la carga.

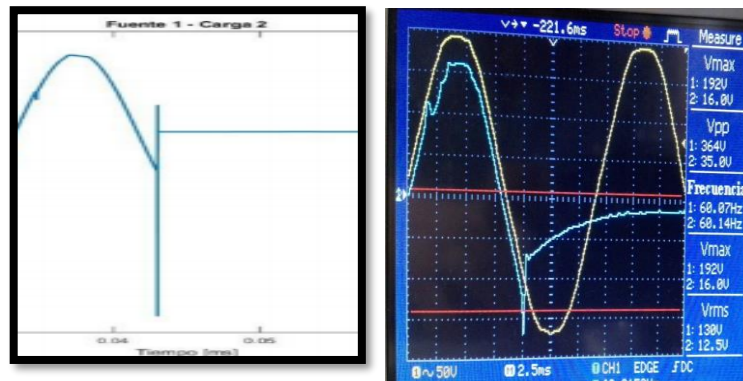



Figura 42. Entrada de la señal de tensión a la carga

En la desconexión de cargas el resultado gráfico de la simulación muestra un efecto transitorio de alto nivel, en una tensión común de 127 Volts se mostró un incremento, al momento de realizar la desconexión de las cargas, el cual llega casi a los 400 Volts, pico a pico (Vpp), el cual podría ser muy perjudicial si se presenta en una prueba real con un aparato eléctrico conectado. En la prueba experimental, la respuesta transitoria tuvo una característica de magnitud un poco más baja alrededor del 220 Volts, lo cual quiere decir que este fenómeno, tiene una probabilidad muy baja de ocasionar algún daño en la carga o en algún elemento del conmutador de potencia.

5.3 Ficha técnica de un IPS de seis puertos

Tabla 13.

Ficha Técnica del IPS de seis puertos

FICHATECNICA: CONMUTADOR DE POTENCIA DE SEIS PUERTOS			
	Tensión soportada en los terminales MT1 y MT2	VDRM	800 V
	Tensión de gatillo (Disparo)	VGT	2,5 VDC
	Corriente soportada en los terminales	IT	25 A
	Corriente de gatillo (Disparo)	IGT	80 mA
	Aislamiento Eléctrico (Triac)	TO220	2500 V
	Índice IP	IP	2-0
	Frecuencia	F	60 Hz
	Resistencia térmica en estado estable	R°c/W	2
	Modelo IPS	Versión	1
	Peso	Gr	300 Gr
	Máxima corriente por puerto	A	10
	Puertos de conexión	Cant	6
Observación: Dispositivo fabricado para el uso de estudio y pruebas, algunas partes se limitaron a la oferta comercial.			

6. Conclusiones

Como producto final de la investigación tenemos el Conmutador de potencia como dispositivo construido y funcional, el cual consta de seis puertos de conexión, capaz de integrar diferentes fuentes de energía e intercambiarlas a diferentes circuitos ramales. Durante el proceso de desarrollo del proyecto se simuló satisfactoriamente a través de *psim*. Esta primera simulación nos permitió tener una perspectiva amplia de las posibilidades que tiene el dispositivo como enrutador

de energía, permitió fijar la forma circuital de un interruptor y establecer la coordinación de estos con el fin de lograr las conmutaciones necesarias entre diferentes puertos que interconectan cargas y fuentes de energía eléctrica.

En cuanto a las demás simulaciones, en el software *OrCAD Lite*, se ejecutó la misma configuración de conmutación que en el software *psim*. Esta difiere en contenido, debido a que en este software se modificaron las características propias de cada elemento, orientándonos a establecer semejanza entre la oferta comercial de dispositivos electrónicos y los parámetros a integrar al conmutador. Durante la ejecución de la simulación se vio que en los puntos de desconexión de las cargas se presentan altas tensiones transitorias o picos no deseados, después de la revisión esquemática de los circuitos se estableció que la desconexión abrupta de una carga con consumo considerable generaba ese tipo de señal, esta es una reacción común debido a la naturaleza del interruptor y a las propiedades de efecto transitorio de los demás elementos.

Para la adquisición de los componentes electrónicos principales del enrutador de potencia, se identificaron a través de las simulaciones, algunos parámetros generales (capacidad amperimétrica, modo de activación, etc.), además de la disposición física a la hora de diseñar la PCB. En el caso de los MOSFET se encontró una oferta comercial compatible con los valores que requiere la fabricación. Sin embargo, fue el tamaño de un interruptor con este elemento lo que nos llevaba a tener aproximadamente el doble de las dimensiones logradas al usar un TRIAC. Adicional a esto en busca de tener la menor pérdida de potencia posible se advirtió que la resistencia estática entre el Drenador-Surtidor, es más grande, lo que provoca mayores pérdidas de potencia cuando trabaja en conmutación. Concatenando los análisis en TRIAC Q8025L6 y el optoacoplador MOC 3081 usados en el diseño.

Una vez identificada la estructura base del interruptor se procedió a realizar una prueba preliminar antes de ejecutar el diseño por módulos del IPS. con el fin de verificar la conexión general de un solo interruptor, seguido de un montaje de cinco interruptores para representar la etapa de potencia de un IPS de tres puertos. Se demostró que es posible implantar un IPS por módulos.

En el diseño establecido se crearon tres módulos, dos de ellos son idénticos en configuración y estructura de ruteo llamados módulo 1 y módulo 2 con tres puertos de conexión cada uno y actúan como terminales de conexión, se diseñó un tercer módulo cuya función es enlazar las conexiones desde los módulos terminales y por ende todos los puertos.

7. Recomendaciones

Se recomienda para una futura implementación asignar personal con amplia experiencia en el diseño de PCBs con el fin de evitar malas conexiones o conexiones inexistentes.

En futuros diseños basados en este tipo de conmutación se debe emplear el circuito de cruce por cero para evitar daños por corto circuito o sobre tensiones.

La inclusión de FNCE deben ser ajustadas en amplitud, frecuencia y naturaleza para poder interactuar con las cargas sin provocar alteraciones en el IPS. De esta forma el dispositivo será óptimo para enrutar corriente respetando la bidireccionalidad de los puertos.

Como recomendación a usuarios futuros los puertos correspondientes al módulo 1 podrán ser usados como fuentes y los puertos de módulo 2 usarse como cargas. Para tener mayor facilidad en el orden de conmutación. Sin embargo, cualquiera de estos seis puertos puede ser asignado como carga o fuente.

Buscando una máxima eficiencia se sugiere el menor uso de TRIACs por ruta para de esta forma evitar caídas de tensión significantes de acuerdo en los resultados vistos en el numeral 6.2 que puedan afectar la calidad de la energía eléctrica que llegará a las cargas.

Referencias

CONVERTIDOR MATRICIAL. (s.f.).

Demanda, S. d. (2015). PROYECCIÓN DE LA DEMANDA DE ENERGÍA ELÉCTRICA Y POTENCIA MÁXIMA EN COLOMBIA.

DISPOSITIVOS ELECTÓNICA DE POTENCIA. (s.f.).

DOCUMENTACIÓN, E. D. (s.f.). ANÁLISIS DE CIRCUITOS ELÉCTRONICOS PARA EL CONTROL DE POTENCIA. .

Energetica, U. d. (s.f.). Ley 1715.

ENERGÍA, M. D. (4 de Noviembre de 2015). Decreto número 2143. *Decreto 2143*. Colombia.

GERARDO, A. O. (s.f.). *INGENIERIA EN ROBOTICA INDUSTRIAL*.

POTENCIA, D. E. (s.f.). *CAPITULO 2*. Obtenido de [http://www.ancap.com.uy/docs_concursos/ARCHIVOS/2%20LLAMADOS%20FINALIZADOS/2013/REF%2040_2013%20%20%20T%C3%89CNICO%20AYUDANTE%20MANTENIMIENTO%20E%20INGENIER%20C3%8DA%20\(ELECTROELECTR%20C3%93NICO\)/MATERIAL%20DE%20ESTUDIO/CONOCIMIENTOS%20ESPEC%20C3%8DFICOS/DISPOS](http://www.ancap.com.uy/docs_concursos/ARCHIVOS/2%20LLAMADOS%20FINALIZADOS/2013/REF%2040_2013%20%20%20T%C3%89CNICO%20AYUDANTE%20MANTENIMIENTO%20E%20INGENIER%20C3%8DA%20(ELECTROELECTR%20C3%93NICO)/MATERIAL%20DE%20ESTUDIO/CONOCIMIENTOS%20ESPEC%20C3%8DFICOS/DISPOS)

Ryo Takahashi, Y. K. (2013). AC Power Local Network with Multiple Power Routers.

Slootweg, J. (s.f.). Smart grids - intelligence for sustainable electrical power systems.

Song, G. L.-Z. (2010). SmartGridLab: A Laboratory-Based Smart Grid Tested.

Unidad de Planeación Minero Energética . (2014). *Integración de las energías renovables no convencionales en Colombia*.

Unidad de Planeación Minero Energética. (2014). *Plan de generación referencia generación y transmisión 2015-2029*.

Vásquez, L. F. (2017). INTEGRACIÓN DEL CONMUTADOR INTELIGENTE DE POTENCIA Y LA SUBMEDICIÓN POR CIRCUITO EN LA RED DE ÁREA DOMESTICA DEL SISTEMA DE GESTIÓN DEL HOGAR INTELIGENTE. Colombia.

XM FILIAL DE ISA. (s.f.). *XM FILIAL DE ISA*. Obtenido de XM FILIAL DE ISA: <http://informesanuales.xm.com.co/2015/SitePages/operacion/3-1-Demanda-de-energia-nacional.aspx>

XM. (s.f.). *XM*. Obtenido de XM: <http://informesanuales.xm.com.co/2016/SitePages/operacion/2-6-Capacidad-efectiva-neta.aspx>