

**UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA
SEDE CUENCA**

CARRERA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA

Trabajo de titulación previo a la obtención del título de
INGENIERO ELÉCTRICO

**Proyecto Técnico Investigativo:
“Comparación de Topologías QZSI de generación
fotovoltaica residencial ”**

Autores:
César Iván Coronel Zamora
Juan Carlos Pesantez Salinas

Tutor:
Ing. José Manuel Aller Castro PhD

Cuenca - Ecuador

2018

CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR

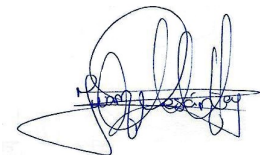
Nosotros César Iván Coronel Zamora con documento de identificación N° 0302266267 y Juan Carlos Pesantez Salinas con documento de identificación N° 0104805411, manifestamos nuestra voluntad y cedemos a la Universidad Politécnica Salesiana la titularidad sobre los derechos patrimoniales en virtud de que somos los autores del trabajo de titulación: “Comparación de Topologías QZSI de generación fotovoltaica Residencial”, mismo que ha sido desarrollado para optar por el título de: Ingeniero Eléctrico, en la Universidad Politécnica Salesiana, quedando la Universidad facultada para ejercer plenamente los derechos cedidos anteriormente.

En aplicación a lo determinado en la Ley de Propiedad Intelectual, en nuestra condición de autores nos reservamos los derechos morales de la obra antes citada. En concordancia, suscribimos este documento en el momento que hacemos la entrega del trabajo final en formato impreso y digital a la Biblioteca de la Universidad Politécnica Salesiana.

Cuenca, enero de 2018



César Iván Coronel Zamora.
CI: 0302266267



Juan Carlos Pesantez Salinas.
CI: 0104805411

CERTIFICACIÓN

Yo declaro que bajo mi tutoría fue desarrollado el trabajo de titulación: “Comparación de Topologías QZSI de generación fotovoltaica Residencial” realizado por: César Iván Coronel Zamora y Juan Carlos Pesantez Salinas, obteniendo el Proyecto Técnico Investigativo, que cumple con todos los requisitos estipulados por la Universidad Politécnica Salesiana.

Cuenca, enero de 2018

A handwritten signature in blue ink, appearing to be 'José Manuel Aller Castro', written in a cursive style.

Ing. José Manuel Aller Castro PhD.

CI: 0151561800

DECLARATORIA DE RESPONSABILIDAD

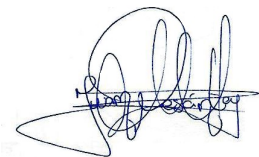
Nosotros César Iván Coronel Zamora con documento de identificación N° 0302266267 y Juan Carlos Pesantez Salinas con documento de identificación N° 0104805411, autores del presente trabajo de titulación “Comparación de Topologías QZSI de generación fotovoltaica Residencial” certificamos que el total del contenido de este Proyecto Técnico Investigativo es de nuestra exclusiva responsabilidad y autoría.

Cuenca, enero de 2018



César Iván Coronel Zamora.

CI: 0302266267



Juan Carlos Pesantez Salinas.

CI: 0104805411

Cuenca, enero de 2018

DEDICATORIA

Quiero dedicar este trabajo principalmente a mis padres César y Ena, por ser el pilar fundamental en mi vida, por su sabiduría, consejos y apoyo incondicional a lo largo de mi carrera universitaria, a mis hermanos Freddy y Soledad que siempre son mi mano derecha en todas las metas que me planteo.

A mi Abuelita y tía Sonia, que con su apoyo y consejos se convirtieron en personas muy especiales en mi vida.

A mis primos Geovany y Marcia quienes con sus consejos y respaldo colaboraron para la consolidación de esta meta cumplida. Quiero dedicar este trabajo también a mis familiares y amigos que me apoyaron en muchos momentos de mi carrera.

César Iván Coronel Zamora

Cuenca, enero de 2018

DEDICATORIA

Dedico este trabajo a mi hijo Thiago Andrés por ser una fuente de motivación e inspiración. A mis padres Mario y Raquel por su apoyo incondicional durante esta etapa de mi vida y convertirse en un pilar fundamental para lograr este objetivo en mi vida. A mis compañeros, amigos y docentes que me apoyaron en el transcurso de esta carrera.

Juan Carlos Pesantez Salinas

Cuenca, enero de 2018

AGRADECIMIENTOS

Agradecemos en primer lugar a Dios y a nuestros padres que fueron el pilar fundamental en el transcurso de nuestra carrera, en segundo lugar a nuestros compañeros que nos brindaron su amistad a lo largo de nuestra vida universitaria.

A nuestro director del trabajo de titulación Dr. José Manuel Aller Castro, por su apoyo incondicional y amistad brindada a lo largo de la elaboración de este trabajo, quien con sus conocimientos y experiencia nos supo guiar de la mejor manera para concluir exitosamente el final de nuestra carrera.

Al Dr. Julio Viola por su apoyo y colaboración en el desarrollo de este trabajo investigativo.

Al Ing. Mgs. Marco Carpio Director de la Carrera de Ingeniería Eléctrica, por colaborar con nuestro desarrollo académico y profesional.

César Iván Coronel Zamora.

Juan Carlos Pesantez Salinas.

RESUMEN

El presente trabajo investigativo tiene el propósito de comparar topologías QZ-SI monofásicas para generación fotovoltaica residencial, realizando una evaluación técnica-económica de las mismas, en las cuales se analizan parámetros como rizados, controlabilidad, modulación, rendimiento, costos, y características eléctricas de cada uno de los elementos; todo esto conjuntamente con un diagnóstico de la robustez del equipo. Para esto, se utilizarán dos programas de simulación que son Labview y Multisim, utilizando co-simulación, lo que permitirá comparar las diferentes topologías con modelos reales de los elementos. Esto con la finalidad de verificar el esquema que presente mejores prestaciones, con una perspectiva futura de implementación en un sistema de generación fotovoltaica residencial, con el menor costo y la máxima calidad técnica.

ABSTRACT

The present research work has the purpose of comparing single-phase QZSI topologies for residential photovoltaic generation, making a technical-economic evaluation, in which parameters such as ripples, controllability, modulation, performance, costs, and electrical characteristics of each one will be analyzed. For this, two simulation softwares are used (Labview and Multisim), including co-simulation, which will help to compare the different topologies with real element's model, in order to verify the scheme with a better performance, and a future perspective of implementation in a residential photovoltaic generation system, reducing cost and increasing the technical quality.

PREFACIO

En el presente trabajo investigativo se exponen los resultados de las comparaciones realizadas mediante simulaciones utilizando Labview y Multisim, mediante la modalidad de co-simulación. Primero se realizó una selección de las topologías del inversor QZSI utilizadas en la realización del proyecto, para posteriormente pasar a diseñar cada una de ellas. Terminado el diseño, la simulación se la realizó en Simulink por ser un programa que permite modelar el inversor con componentes idealizados, lo cual facilita la comprensión y simulación de las topologías. Posteriormente se procedió a realizar una co-simulación implementando el control en Labview y el circuito eléctrico en Multisim, partiendo de los modelos realizados en Simulink. Finalmente se realizó una comparación de todos los parámetros tanto técnicos como económicos que posee cada topología, para llegar a una conclusión de cual es la más indicada para una instalación fotovoltaica residencial.

Índice general

INTRODUCCIÓN	1
1. CAPÍTULO 1: Problema de Estudio y Objetivos	2
1.1. Problema de Estudio	2
1.2. Grupo Objetivo	2
1.3. Objetivos	3
1.3.1. Objetivo General	3
1.3.2. Objetivos Específicos	3
1.4. Metodología Aplicada	3
2. CAPÍTULO 2: Fundamentos Teóricos	4
2.1. Energía Solar Fotovoltaica	4
2.2. Sistema Fotovoltaico	4
2.2.1. Generador Fotovoltaico	4
2.2.2. Regulador	4
2.2.3. Batería	4
2.2.4. Inversor	5
2.3. Clasificación de los Sistemas Fotovoltaicos	5
2.4. Topologías de Inversores Conectados a la Red.	5
2.4.1. Inversor según la Fuente de Energía	6
2.4.2. Inversor conectado a la Red según la configuración de los paneles solares	6
2.4.3. Inversores Según el Número de Fases	7
2.5. Inversor QZBI	8
2.5.1. Funcionamiento	9
2.5.2. Topologías de Inversores QZBI	10
2.6. Control de Inversores	13
2.6.1. Modulación PWM basada en portadora	13
2.7. Simulación	14
2.7.1. Simulink	14
2.7.2. Multisim	15
2.7.3. Labview	16
2.7.4. Psim	16
3. CAPÍTULO 3: Diseño, Simulación y Análisis de Resultados	17
3.1. Diseño del Inversor QZSI	17
3.2. Diseño del Inversor QSBI	22
3.3. Diseño del Inversor SL - QZSI	26
3.4. Diseño del Inversor QZSI - SL	29

3.5.	Análisis de Resultados	32
3.5.1.	Rizado	32
3.5.2.	Rango de Intercambio (Ganancia)	41
3.5.3.	Modulación y Control	42
3.5.4.	Eficiencia	42
3.5.5.	Tolerancia a Fallas	42
3.5.6.	Análisis Económico	42
3.5.7.	Análisis General	43
4.	CAPÍTULO 4: Conclusiones y Recomendaciones	44
4.1.	Conclusiones	44
4.2.	Recomendaciones	45
A.	Anexos	46
A.1.	Anexo 1: Simulaciones Régimen Permanente QZSI	46
A.2.	Anexo 2: Simulaciones Régimen Permanente QSBI	47
A.3.	Anexo 3: Simulaciones Régimen Permanente SL-QZSI	48
A.4.	Anexo 4: Simulaciones Régimen Permanente QZSI - SL	49
A.5.	Anexo 5: Circuito del Control de los Inversores	50
	Bibliografía	51

Índice de figuras

2.1. Inversor Central [1].	7
2.2. Inversor Cadena [1].	7
2.3. Inversor Multicadena [1].	8
2.4. Puente Inversor [2].	8
2.5. Inversor QZSI [3].	9
2.6. Circuito equivalente del inversor QZSI- Modo no disparo [4].	10
2.7. Circuito equivalente del inversor QZSI- Modo disparo [4].	10
2.8. Topología QZSI [5].	11
2.9. Topología QSBI [3].	11
2.10. Topología SL-QZSI [6].	12
2.11. Topología QZSI (MCAC-ZSI) [7].	12
2.12. Topología trans-QZSI [8].	13
2.13. Control SPWM	14
2.14. Interfaz de Simulación en Simulink	15
2.15. Interfaz de Simulación en Multisim	15
2.16. Interfaz de Simulación en Labview	16
3.1. Inversor QZSI	17
3.2. Simulación inversor QZSI	19
3.3. Inversor QSBI	22
3.4. Simulación inversor QSBI	24
3.5. Inversor QZSI-SL	26
3.6. Simulación Inversor SL-QZSI	27
3.7. Inversor QZSI	29
3.8. Simulación Inversor QZSI- SL	30
3.9. Rizado en el Inductor L1y L2	33
3.10. Rizado en el Capacitor C1	33
3.11. Rizado en el Capacitor C2	34
3.12. Rizado en el Inductor L1	35
3.13. Rizado en el Capacitor C1	35
3.14. Rizado en el Inductor L1, L2, L3	36
3.15. Rizado en el Capacitor C1	37
3.16. Rizado en el Capacitor C2	37
3.17. Rizado en el Inductor L1	39
3.18. Rizado en el Capacitor C1	39
3.19. Rizado en el Capacitor C2	40
A.1. Simulaciones Régimen Permanente QZSI	46
A.2. Simulaciones Régimen Permanente QSBI	47
A.3. Simulaciones Régimen Permanente SL - QZSI	48
A.4. Simulaciones Régimen Permanente QZSI - SL	49

A.5. Circuito del Control de los Inversores	50
---	----

Índice de cuadros

3.1. Valores de Diseño del Inversor QZSI	19
3.2. Simulación QZSI	20
3.3. Tolerancia QZSI	20
3.4. Eficiencia QZSI	21
3.5. Costos QZSI	21
3.6. Valores de Diseño del Inversor QSBI	23
3.7. Simulación QSBI	24
3.8. Tolerancia QSBI	25
3.9. Eficiencia QSBI	25
3.10. Costos QSBI	25
3.11. Valores de Diseño del Inversor SL-QSBI	27
3.12. Simulación SL-QSBI	27
3.13. Tolerancia SL-QSBI	28
3.14. Eficiencia SL-QSBI	28
3.15. Costos SL-QSBI	29
3.16. Valores de Diseño del Inversor QSBI-SL	30
3.17. Simulación QSBI-SL	31
3.18. Tolerancia QSBI-SL	31
3.19. Eficiencia QSBI-SL	32
3.20. Costos QSBI-SL	32
3.21. Factor de Rizado QZSI	34
3.22. Factor de Rizado QSBI	36
3.23. Factor de Rizado SL-QZSI	38
3.24. Factor de Rizado QZSI-SL	40
3.25. Rango de Intercambio QZSI	41
3.26. Rango de Intercambio QSBI	41
3.27. Rango de Intercambio SL - QZSI	41
3.28. Rango de Intercambio QZSI - SL	42
3.29. Análisis General	43

INTRODUCCIÓN

El constante crecimiento de la demanda eléctrica ha ocasionado que se utilicen nuevas alternativas de generación eléctrica tales como la fotovoltaica, que en la última década ha ganado acogida debido a que es una energía limpia y rentable en el tiempo [9]. La generación de energía fotovoltaica consiste en la conversión de energía solar en energía eléctrica, esto mediante el efecto fotovoltaico que se genera en los paneles solares por la radiación directa. Para generar energía eléctrica de corriente alterna se utilizan inversores, los cuales se han ido desarrollando en diferentes esquemas [10]. Con el paso del tiempo se han logrado crear inversores como el QZSI que permiten realizar la inversión de corriente mediante un menor número de componentes pasivos, dando así una alternativa de inversor más económica, y que genera las mismas prestaciones de los convertidores convencionales [11].

Es por lo indicado anteriormente que en el presente proyecto se realiza una comparación de diferentes topologías QZSI con la finalidad de determinar cuál es la mejor opción para un sistema fotovoltaico residencial.

Se procedió a diseñar las diferentes topologías, determinando de esta manera los valores de los componentes pasivos y el control utilizado.

Para realizar la comparación se utilizaron tres programas de simulación de circuitos electrónicos que son Simulink, Multisim y Labview. En el primero se realizó una simulación de las topologías para comprobar su funcionamiento, y en los dos últimos se desarrolló una cosimulación para obtener resultados muy próximos a la realidad debido a que estos programas permiten representar modelos de componentes reales.

Se presentan resultados mediante cuadros comparativos que permitan determinar la mejor opción para generación fotovoltaica residencial.

1. CAPÍTULO 1: Problema de Estudio y Objetivos

1.1. Problema de Estudio

Las aplicaciones de la electrónica de potencia en el campo residencial son cada vez más necesarias debido a la reducción de los costos y a la rentabilidad de los mismos, es por esto que se ha desarrollado una gran variedad de dispositivos electrónicos de potencia, especialmente inversores, que se presentan en diferentes topologías.

Uno de los inversores utilizados para sistemas de generación fotovoltaica residencial es el inversor Z, que permite tener dos etapas de conversión en un solo dispositivo, adaptando la etapa de inversión a la entrada de puente con la etapa de conversión en la salida de corriente alterna. Este esquema se ve limitado debido a su incapacidad de acoplar un banco de baterías al equipo, motivo por el cual nace la necesidad de crear un inversor que permita acoplar un acumulador de energía, por lo que se desarrolla el inversor QZSI con sus diferentes topologías y con iguales prestaciones, solo que con la ventaja de permitir conectar una batería en el sistema [12].

Actualmente existen algunas topologías QZSI presentadas por diferentes autores, los mismos que defienden sus esquemas resaltando la importancia de cada una. Es por esto que en el presente proyecto se propone realizar la comparación de varias topologías, con la finalidad de obtener mediante simulaciones sus comportamientos, y poder evaluar de forma eficiente desde el punto de vista técnico, económico y de confiabilidad, para determinar el modelo más adecuado para la generación fotovoltaica residencial [13].

1.2. Grupo Objetivo

Los resultados de la investigación permitirán determinar de entre las topologías QZSI, la mejor opción para ser utilizada en un sistema de generación fotovoltaica, al mismo tiempo dará información técnica, económica y de confiabilidad a diseñadores de estos sistemas, para que sean implementadas con las garantías del proyecto investigativo. Todo esto podrá ser utilizado para desarrollar equipos económicos y eficientes que permitan que los ciudadanos ecuatorianos utilicen estas tecnologías limpias en sus hogares.

1.3. Objetivos

1.3.1. Objetivo General

Comparar diferentes topologías QZSI con la finalidad de determinar las mejores soluciones para generación fotovoltaica residencial.

1.3.2. Objetivos Específicos

1. Realizar el estudio y simulación de las diferentes topologías QZSI publicadas en la literatura reciente.
2. Diseñar los controladores para las principales topologías QZSI.
3. Evaluar técnicamente parámetros tales como rizado, rango de intercambio, modulación y control.
4. Evaluar el rendimiento y el costo de las diferentes soluciones.
5. Evaluar la confiabilidad del equipo ante fallas.
6. Determinar la mejor topología para un sistema de generación fotovoltaica.

1.4. Metodología Aplicada

Teniendo en cuenta que se deberá cumplir todos los objetivos planteados en el presente proyecto, se utilizará la siguiente metodología.

Se empleará una metodología bibliográfico-documental utilizada para poder evaluar el funcionamiento y los costos de las diferentes topologías QZSI, la misma será enfocada especialmente en la búsqueda y adquisición de antecedentes de proyectos e investigaciones relacionadas a las topologías de este tipo de inversor, la cual proporcionará la información de partida para el avance o innovación en el desarrollo del tema.

La metodología aplicada en la investigación tiene como punto de partida el uso de una combinación de herramientas de modelación numérica, adecuada para la posterior simulación de las topologías QZSI que van a ser comparadas, de manera que se pueda realizar el respectivo análisis de sus limitaciones y características principales.

También se utilizará un método analítico-sistémico que permitirá modelar las topologías QZSI mediante la determinación de sus componentes, así como las relaciones entre ellos. Dichas relaciones podrán determinar la estructura de las topologías y su dinámica, partiendo de modelos antes estudiados por diferentes autores. Dentro de este análisis se tiene que realizar una evaluación técnica-económica de diferentes parámetros antes mencionados, conjuntamente con un estudio de confiabilidad del equipo el cual se enfocará en la tolerancia a fallas.

2. CAPÍTULO 2: Fundamentos Teóricos

2.1. Energía Solar Fotovoltaica

La energía solar fotovoltaica es una energía renovable y amigable con el medio ambiente, que se basa en la conversión de la radiación solar en electricidad, mediante el efecto fotovoltaico. Este proceso de transformación se realiza mediante células fotovoltaicas que generan energía eléctrica en el momento que incide la radiación solar. El conjunto de celdas fotovoltaicas conforman el panel solar, el que se encarga de entregar una salida de voltaje continuo.

Generalmente el material utilizado para la fabricación de las células fotovoltaicas es el silicio, debido a que posee propiedades semiconductoras apropiadas para la conversión de energía luminosa en electricidad [14, 15].

2.2. Sistema Fotovoltaico

El sistema fotovoltaico es el conjunto de elementos mediante los cuales la energía solar es convertida en energía eléctrica, un sistema fotovoltaico está formado por el generador fotovoltaico, el regulador, el inversor, la batería y la carga o consumo.

2.2.1. Generador Fotovoltaico

El generador fotovoltaico está compuesto por un conjunto de paneles solares que según su arreglo en serie o paralelo darán una salida de tensión y corriente. Estos módulos están formados por celdas fotovoltaicas encargadas de producir la conversión de energía solar en energía eléctrica, mediante un proceso fotoeléctrico [14].

2.2.2. Regulador

El regulador es el encargado de controlar la carga de la batería, manteniendo un equilibrio en los períodos en los que hay diferentes valores de generación de energía [14].

2.2.3. Batería

Es una fuente de almacenamiento de energía que permite aprovechar el exceso de producción de energía en horas en las que el consumo es mínimo, para posteriormente utilizarlo en periodos de tiempo en que la producción se reduce considerablemente [14].

2.2.4. Inversor

El inversor es un dispositivo electrónico que permite convertir la corriente continua en corriente alterna. Vale destacar que tiene mucha importancia en los sistemas fotovoltaicos debido a que los paneles fotovoltaicos producen corriente continua y las cargas domiciliarias típicas operan con corriente alterna. Existen topologías circuitales tanto para sistemas fotovoltaicos autónomos, como para aquellos que están conectados a la red [16, 1].

Según el número de fases se presentan inversores tanto trifásicos como monofásicos, siendo los últimos los utilizados en la generación fotovoltaica residencial. También se encuentran en diferentes valores tanto de voltaje como de potencia, debido a la amplia gama de necesidades que se presentan en el mercado.

Los inversores cumplen normalmente las siguientes funciones:

- Inversión DC/AC
- Modulación de la Onda Alterna de Salida
- Regulación del Valor Eficaz de la Tensión de Salida [1].

2.3. Clasificación de los Sistemas Fotovoltaicos

Dentro de los sistemas fotovoltaicos podemos encontrar dos tipos:

- Sistema Fotovoltaico Autónomo
- Sistema Fotovoltaico Conectado a la Red [17, 14].

2.3.0.1. Sistema Fotovoltaico Autónomo

La finalidad de estos sistemas es suministrar energía eléctrica a cargas que no estén conectadas a la red, fundamentando su funcionamiento en la acumulación de energía en baterías, para períodos de tiempo en el cual el consumo es mayor a la generación [14, 17].

2.3.0.2. Sistema Fotovoltaico Conectados a la Red

El objetivo principal de estos sistemas es aumentar anualmente la cantidad de energía eléctrica entregada a la red y tienen dos campos de aplicación que están en auge, el primero es su implementación en edificios o viviendas y la segunda es la creación de centrales fotovoltaicas de generación eléctrica [17, 14].

2.4. Topologías de Inversores Conectados a la Red.

Los inversores que se utilicen en sistemas conectados a la red deberían tener un bajo costo, peso y tamaño, conjuntamente con una alta eficiencia y fiabilidad. Es por esto

que se han desarrollado numerosas investigaciones en este campo y a pesar de que las mismas han ayudado a reducir los costos en un 50 % en las últimas dos décadas, los precios aún son elevados.

2.4.1. Inversor según la Fuente de Energía

2.4.1.1. Inversor alimentado por Tensión

Este inversor lleva su nombre porque tiene una entrada de tensión constante [18].

2.4.1.2. Inversor alimentado por Corriente

Estos inversores tienen una fuente de corriente constante en su bus. El inversor tratado en el presente trabajo es un ejemplo de ese tipo.[18].

2.4.1.3. Convertidor enlazado con CC Variable

Es un inversor que tiene como señal de entrada una fuente de voltaje controlable [18].

2.4.2. Inversor conectado a la Red según la configuración de los paneles solares

2.4.2.1. Inversor Central

Los inversores centrales o centralizados son utilizados cuando se tiene un gran número de módulos fotovoltaicos y están conectados a la red. Esta topología ayuda a tener una alta eficiencia y un costo reducido. Además el alto voltaje generado por los diferentes módulos evita el uso de un transformador disminuyendo, en consecuencia, los costos. Por este motivo es muy utilizado en las aplicaciones que requieren sistemas fotovoltaicos de media y gran potencia, pero tienen ciertas desventajas, como pérdidas por desajuste entre módulos o cadenas y pérdidas por oscurecimiento, es decir cuando no incide directamente la radiación solar en los módulos [1, 16].

2.4.2.2. Inversor Cadena

Esta topología es utilizada en lugares donde los módulos no pueden ser instalados con la misma orientación debido a la indisponibilidad de espacio, por lo que se propone instalar un inversor por cada cadena de módulos que tenga, como se observa en la figura 2.2. Esto implica tener mayores costos, debido a que necesitaría un inversor por cada cadena, pero su control mejora de manera significativa. [1, 16].

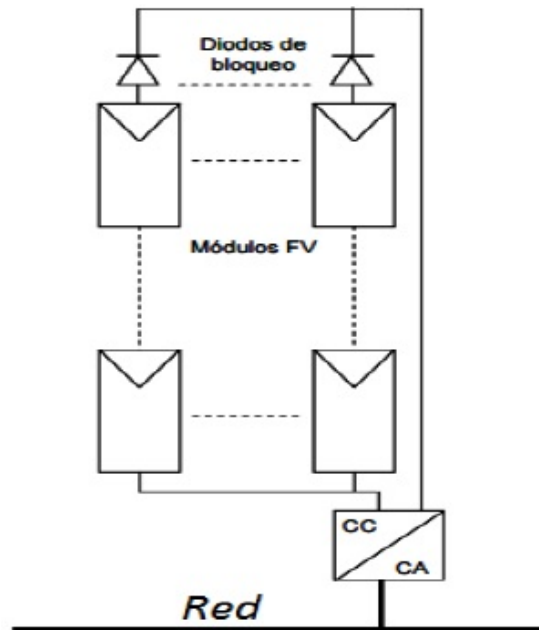


Figura 2.1.: Inversor Central [1].

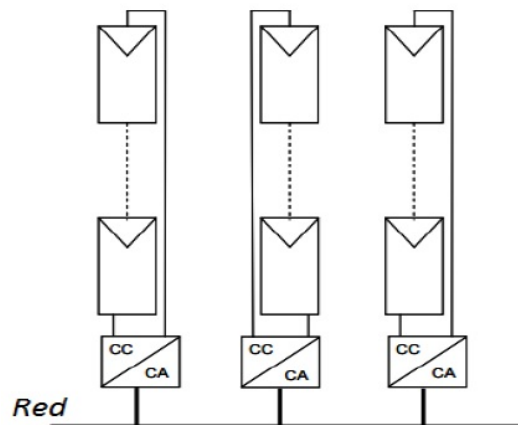


Figura 2.2.: Inversor Cadena [1].

2.4.2.3. Inversor Multicadena

El inversor multicadena es una modificación del inversor descentralizado o cadena, está constituido por dos o más ramas con sus respectivos convertidores, que se conectan a un inversor central como se muestra en la figura 2.3, y lógicamente esta topología permite tener una mayor potencia en comparación con el inversor cadena, pero al tener varios inversores los costos se elevan y la eficiencia disminuye [1, 16].

2.4.3. Inversores Según el Número de Fases

2.4.3.1. Inversor Trifásico

Este inversor dispone de tres fases en la salida con corriente alterna, para alimentar cualquier carga de tipo trifásico.

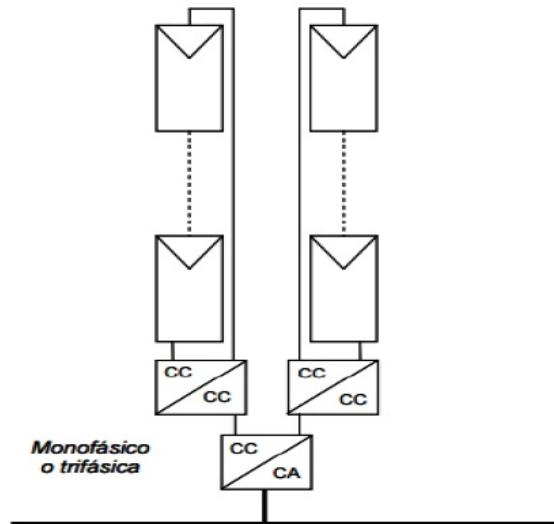


Figura 2.3.: Inversor Multicadena [1].

2.4.3.2. Inversor Monofásico

La topología del inversor monofásico tiene una sola fase de corriente alterna a la salida del inversor, la cual permitirá alimentar diferentes tipos de cargas que sean monofásicas, es por esto que es el más utilizado para sistemas fotovoltaicos aislados, debido a que en estos sistemas la mayor cantidad de cargas son monofásicas. Esta configuración comúnmente presenta en su salida una topología de control de los conmutadores en forma de puente completo, debido a que su configuración permite una mayor salida de voltaje y un control más eficiente [2].

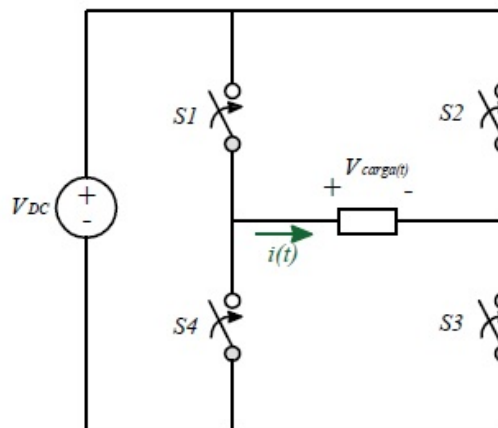


Figura 2.4.: Puente Inversor [2].

2.5. Inversor QZBI

El acoplamiento entre la red y los paneles fotovoltaicos se realizan mediante un convertidor DC-DC (convertidor elevador) y un convertidor DC-AC (Inversor). Esta

configuración tiene como desventaja que el uso de los dos convertidores en cascada disminuye la eficiencia total del sistema debido a que la energía producida por los paneles fotovoltaicos es procesada repetitivamente. La principal ventaja de la topología ZSI es que elimina la necesidad del convertidor DC-DC de entrada, y en su lugar utiliza una red de impedancia basada en elementos pasivos para acoplar la fuente de alimentación con el circuito principal de conmutación. Esto permite controlar tanto el voltaje del enlace de DC como el voltaje de AC de salida solo con los interruptores del puente inversor [12].

La principal ventaja del convertidor QZSI sobre el ZSI es la posibilidad de acoplar una batería o un banco de baterías permitiendo el almacenamiento de energía, además de disminuir el costo del equipo debido a la reducción de elementos. Mediante el QZSI se ahorra una etapa y a su vez se obtiene una mejor inmunidad a los ruidos en comparación con otras topologías [11].

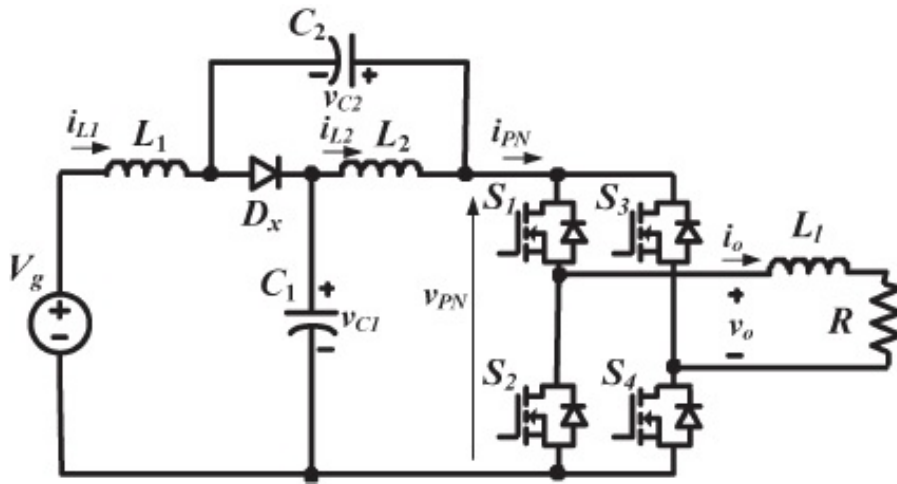


Figura 2.5.: Inversor QZSI [3].

2.5.1. Funcionamiento

El funcionamiento del inversor QZSI se fundamenta en dos estados de operación, el primero denominado modo de disparo y el otro modo de no disparo. En el primer escenario se tiene un funcionamiento normal del inversor, y el segundo es cuando se producen los disparos que provocan un cortocircuito en los elementos pasivos del inversor que provocan la elevación del voltaje [4].

En el modo de no disparo el puente inversor se comporta como una fuente de voltaje, como se observa en la figura 2.6.

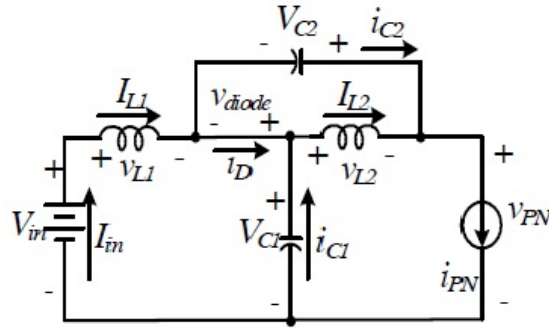


Figura 2.6.: Circuito equivalente del inversor QZSI- Modo no disparo [4].

El modo de disparo se produce cuando un conmutador de por lo menos una fase conduce, en este modo el V_{PN} es cero, pero la corriente es igual a la suma de todas las corrientes del inversor como se muestra en la figura 2.7, ocasionando un cortocircuito en la fuente, que es controlado por el filtro LC y los diodos, evitando de esta manera la avería de los elementos del circuito y aumentando el voltaje de salida del inversor.

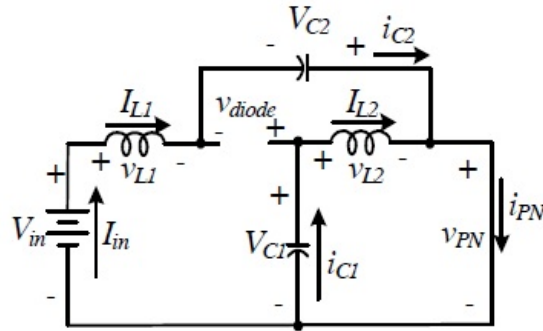


Figura 2.7.: Circuito equivalente del inversor QZSI- Modo disparo [4].

2.5.2. Topologías de Inversores QZBI

2.5.2.1. Inversor QZSI

El inversor QZSI tiene dos capacitores, dos inductores y un diodo, que son los encargados de producir cortocircuitos controlados que permitirán elevar la corriente y tensión del inversor. Esta topología fue la que se propuso inicialmente como una modificación del inversor ZSI, y debido a sus ventajas, tanto en eficiencia como en confiabilidad, ha llevado a estudiar modificaciones en su estructura.

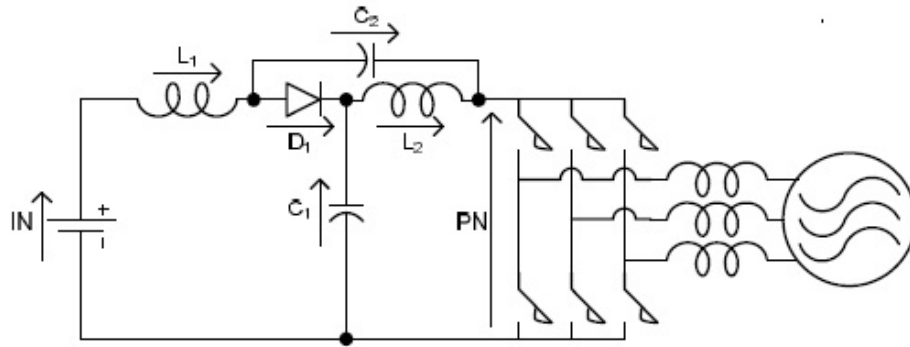


Figura 2.8.: Topología QZSI [5].

2.5.2.2. Inversor QSBI

El inversor QSBI es una modificación del inversor QZSI, ya que está compuesto de menor cantidad de componentes pasivos, debido a que adiciona un conmutador mas, pero mantiene el mismo principio de funcionamiento, ofreciendo de esta manera mayor confiabilidad, controlabilidad y eficiencia en comparación con el inversor QZSI [3].

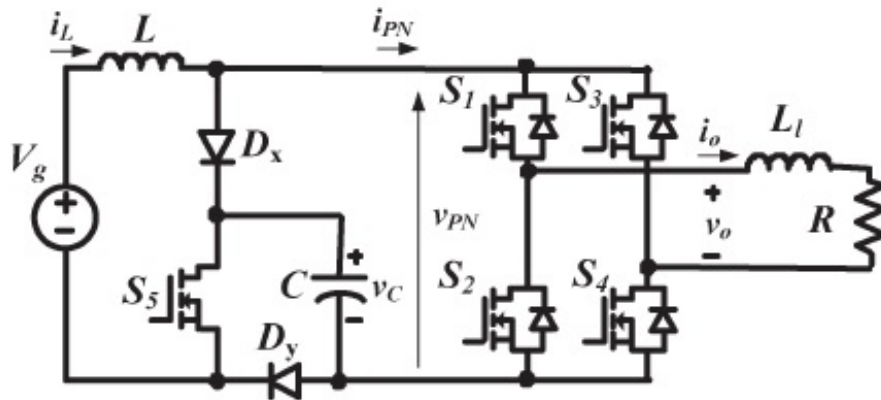


Figura 2.9.: Topología QSBI [3].

2.5.2.3. Inversor SL-QZSI

En la figura 2.10, se muestra la topología SL-QZSI, donde un inductor en la topología QZSI ha sido reemplazado por una malla SL (inductor conmutado). La nueva topología ofrece una mayor capacidad de aumento de voltaje del inversor del lado de la carga, lo que produce una alta capacidad de inversión de la tensión y un valor de potencia alto, teniendo además un amplio rango de ganancia [11][19].

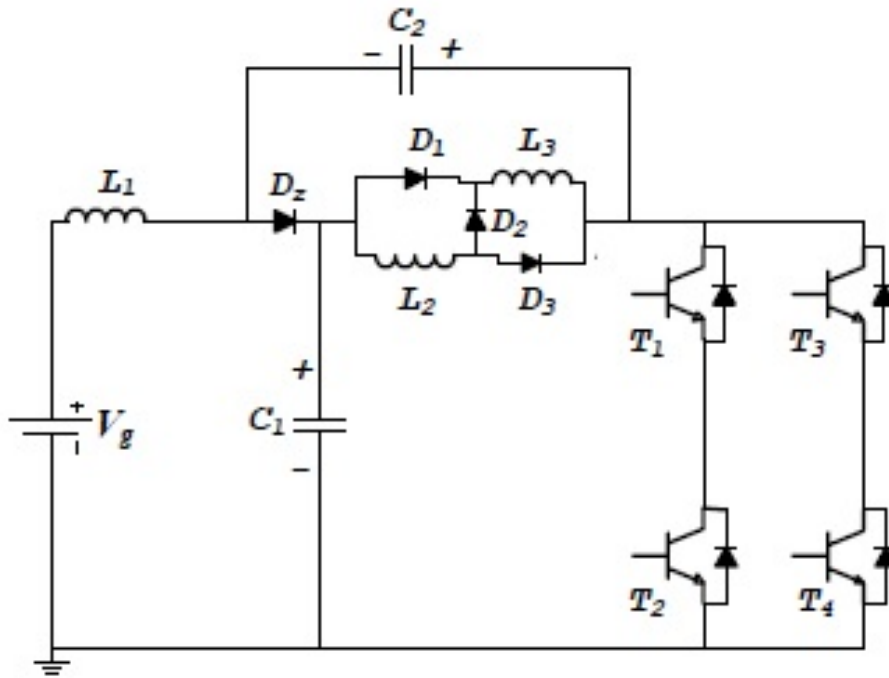


Figura 2.10.: Topología SL-QZSI [6].

2.5.2.4. Inversor QZSI (MCAC-ZSI)

En la figura 2.11 se presenta una topología QZSI, a la cual se le añade un diodo D_2 , un inductor L_3 y un condensador C_3 al QZSI con corriente de entrada continua. Esta topología propone mejorar la ganancia de corriente y voltaje a la salida del puente. [13]

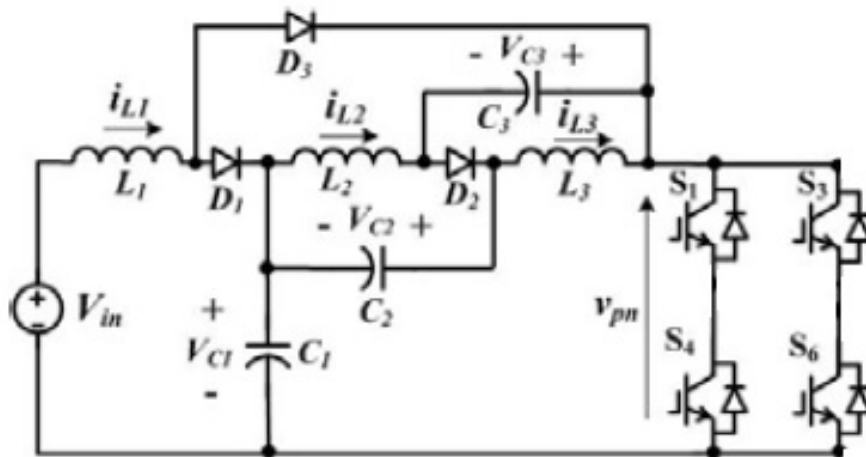


Figura 2.11.: Topología QZSI (MCAC-ZSI) [7].

2.5.2.5. Inversor trans-QZSI

En la figura 2.12 se muestra una topología trans-QZSI, con una corriente de entrada continua y una capacidad de inversión de impulso elevada. Consta de un inductor (L_3), un transformador, dos condensadores (C_1 y C_2) y un diodo (D). Las principales características son que la corriente de entrada es continua y un flujo de tensiones de corriente menor en los devanados del transformador y diodo de entrada [13].

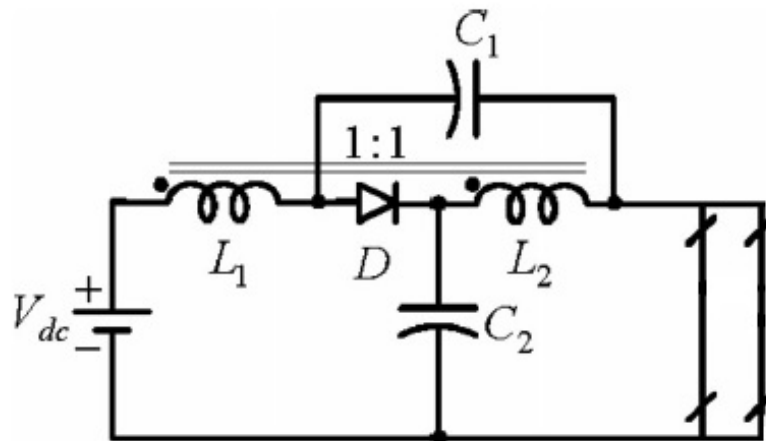


Figura 2.12.: Topología trans-QZSI [8].

2.6. Control de Inversores

Para el control de inversores generalmente se utiliza la técnica de control de ancho de pulsos denominada PWM, la misma que con el paso de los años y el avance de la tecnología ha tenido varias modificaciones, entre las cuales se mencionan las siguientes:

1. Modulación PWM basada en portadora [20].
2. Modulación PWM con inyección de señales de secuencia cero [20].
3. Modulación PWM discontinua [20].
4. Métodos DPWM híbridos [20].
5. Modulación PWM de vectores espaciales [20].

En la siguiente sección se explica el control por modulación PWM basada en portadora o llamado control SPWM, debido a que es la técnica utilizada en la elaboración de la tesis.

2.6.1. Modulación PWM basada en portadora

El control SPWM es una modulación de ancho de pulsos sinusoidal, que consiste en comparar dos señales, una de referencia o moduladora y otra portadora, generalmente la señal de referencia es una onda sinusoidal y la portadora es una señal

triangular, esta comparación produce cruces entre las dos señales que dan los flancos de subida y bajada para los pulsos que son de anchura variable, los mismos que serán reproducidos en la parte de potencia por los dispositivos de conmutación, para dar una forma de onda sinusoidal en la carga [21], [22], [20].

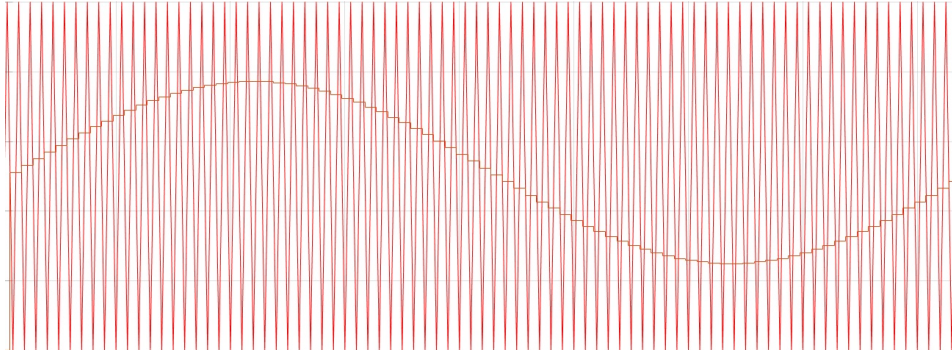


Figura 2.13.: Control SPWM

2.7. Simulación

Los programas de simulación son muy utilizados como herramientas de apoyo a la investigación debido a que permiten modelar el funcionamiento de un sistema para determinar su comportamiento. Entre las principales ventajas que presentan estas herramientas de simulación están:

- El diseño se realiza en menor tiempo, debido a que permite modelar el evento, circuito, sistema, etc, para evitar implementarlo físicamente con errores.
- Permite disminuir costos al evitar inversiones innecesarias con una buena simulación.
- Obtener un análisis detallado del sistema, para posibles variaciones que impliquen mejoras
- Experimentación de diferentes eventos o situaciones, para posibles desarrollos en investigación
- Determinación de posibles problemas

En ingeniería eléctrica, las herramientas de simulación circuital más utilizadas son las siguientes:

- Simulink
- Labview
- Multisim
- Psim

2.7.1. Simulink

Simulink es un entorno de simulación mediante diagramas de bloque que permite ver el comportamiento de sistemas basándose en modelos. Además, es una herramienta

informática con un gran campo de aplicación en la investigación de la ingeniería eléctrica porque permite modelar de forma gráfica una gran variedad de elementos eléctricos y describir su comportamiento en determinado circuito o sistema [23].

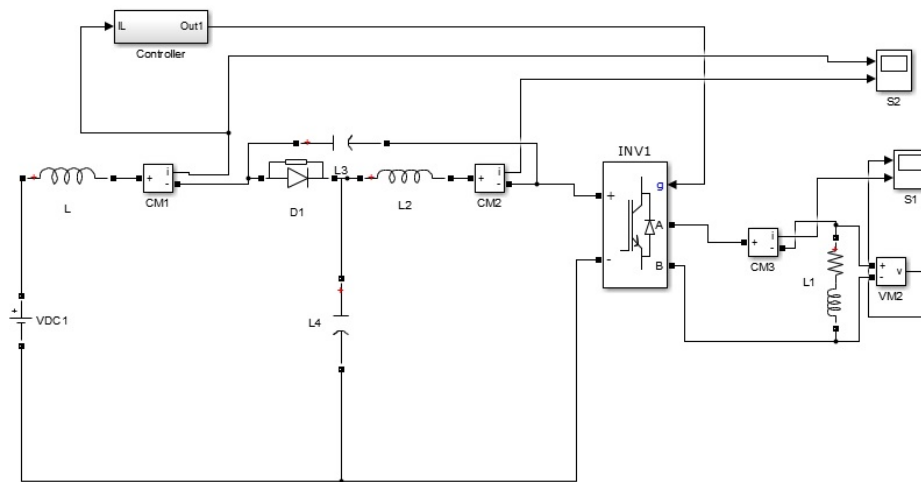


Figura 2.14.: Interfaz de Simulación en Simulink

2.7.2. Multisim

Multisim es un software de simulación que permite incorporar modelos de dispositivos eléctricos y electrónicos para simular cualquier circuito, caracterizado porque los resultados de simulación analizan el comportamiento real de los elementos, la principal desventaja es que no permite realizar controles complejos [24].

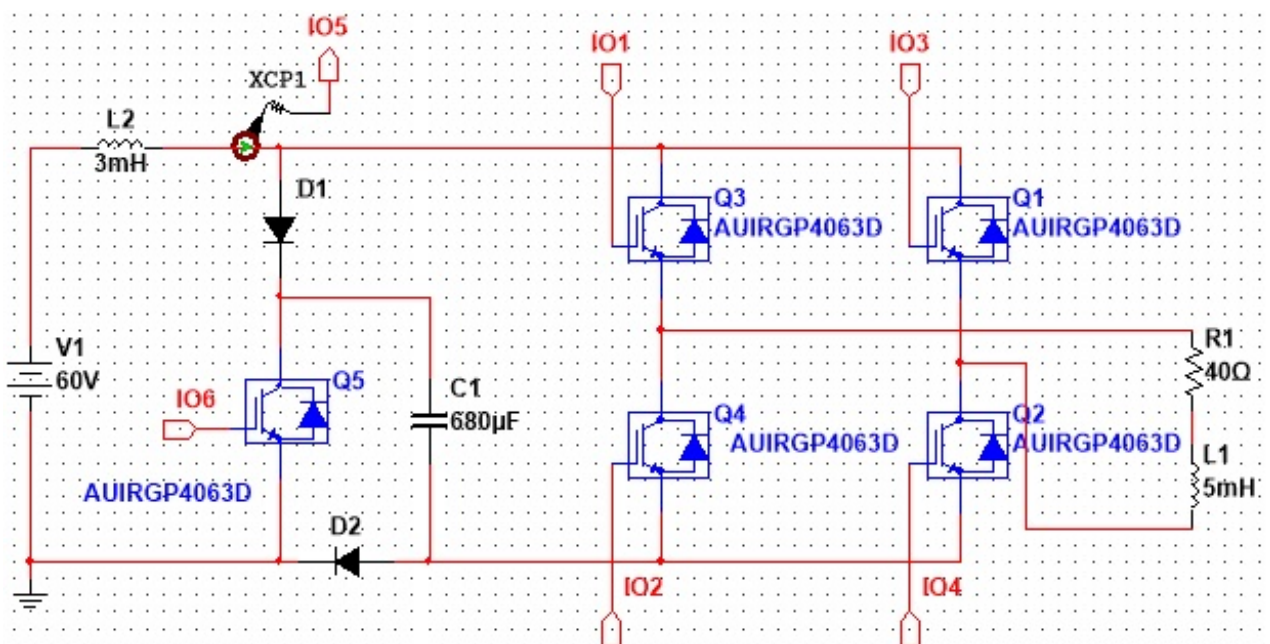


Figura 2.15.: Interfaz de Simulación en Multisim

2.7.3. Labview

Labview es un entorno de simulación gráfico, diseñado para entornos industriales con la finalidad de crear programas de pruebas y control. Dentro de la Electrónica de Potencia es una software muy importante, debido a que permite realizar co-simulación con Multisim, obteniendo resultados de simulación cercanos a la realidad [25].

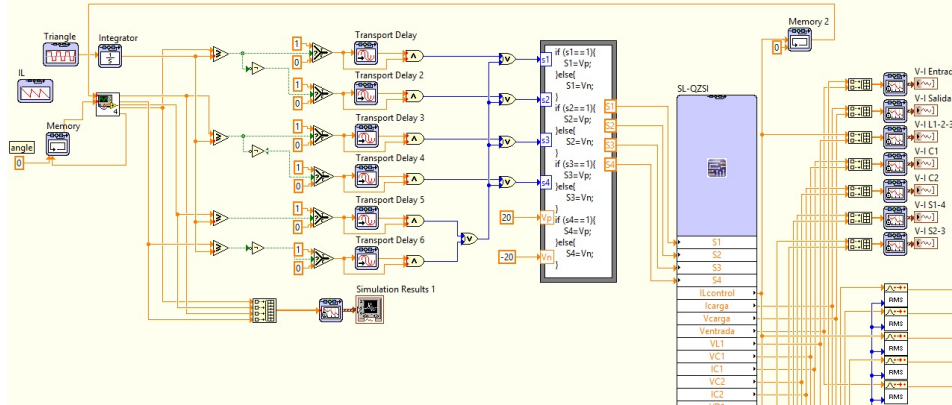


Figura 2.16.: Interfaz de Simulación en Labview

2.7.4. Psim

Psim es un software de simulación utilizado para circuitos eléctricos, y esta destinado principalmente a la simulación en el campo de la electrónica de potencia, control de motores y sistemas dinámicos [26].

3. CAPÍTULO 3: Diseño, Simulación y Análisis de Resultados

3.1. Diseño del Inversor QZSI

Para el diseño del inversor QZSI que se muestra en la figura 3.1 se tienen que hacer las siguientes suposiciones:

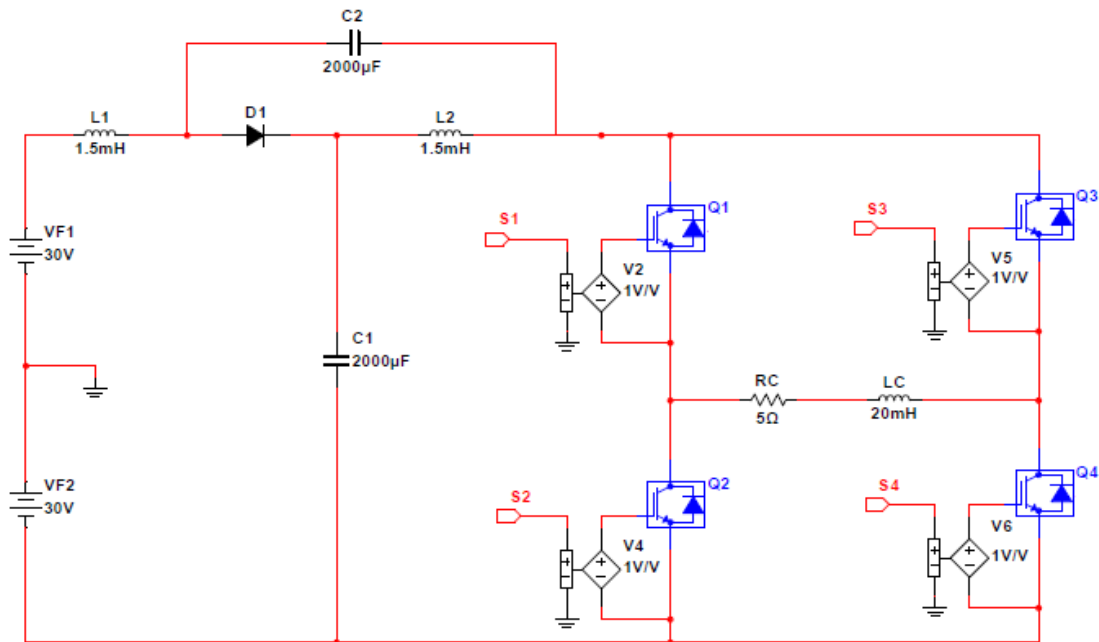


Figura 3.1.: Inversor QZSI .

- 1) El inversor está operando en un modo de conducción continua.
- 2) La resistencia parásita del inductor y la resistencia en serie equivalente del condensador se escriben como r_L y r_C , respectivamente.
- 3) Las resistencias en estado de encendido de los interruptores son iguales y están representadas por r_S .
- 4) Las resistencias en estado de encendido de los diodos son iguales y se expresan como r_D .
- 5) Todos los interruptores se encienden al mismo tiempo en el estado de disparo directo.
- 6) La frecuencia de conmutación es mucho mayor que la frecuencia de la tensión de salida de CA.

Analizando todo lo deducido, llegamos a las ecuaciones finales que se puede encontrar detalladas en [3].

$$i_{L1} = I_{L1} + \tilde{i}_{L1} = \frac{MI_m \cos \delta}{2(1-2D)} + \frac{(1-2D)MI_m \cos(2\varpi - \delta)}{2[4LC\varpi^2 - (1-2D)^2]} \quad (3.1)$$

$$i_{L2} = I_{L2} + \tilde{i}_{L2} = \frac{MI_m \cos \delta}{2(1-2D)} + \frac{(1-2D)MI_m \cos(2\varpi - \delta)}{2[4LC\varpi^2 - (1-2D)^2]} \quad (3.2)$$

$$v_{C1} = V_{C1} + \tilde{V}_{C1} = \frac{1}{1-2D}V_g + \frac{\varpi LMI_m \sin(2\varpi t - \delta)}{4LC\varpi^2 - (1-2D)^2} \quad (3.3)$$

$$v_{C2} = V_{C2} + \tilde{V}_{C2} = \frac{1}{1-2D}V_g + \frac{\varpi LMI_m \sin(2\varpi t - \delta)}{4LC\varpi^2 - (1-2D)^2} \quad (3.4)$$

$$v_{PN} = V_{PN} + \tilde{v}_{PN} = v_{C1} + V_{C2} = \frac{1}{1-2D}V_g + \frac{2\varpi LMI_m \sin(2\varpi t - \delta)}{4LC\varpi^2 - (1-2D)^2} \quad (3.5)$$

En donde:

ϖ es la frecuencia angular

δ es el ángulo de impedancia

I_m es la amplitud de la corriente alterna de salida

M es el índice de modulación

D es el ciclo de trabajo

V_{PN} es el voltaje pico de entrada

V_g es el voltaje continuo de entrada

Con las ecuaciones 3.1, 3.2, 3.3, 3.4, 3.5 se deduce los voltajes de los capacitores y corrientes de los inductores.

$$\tilde{i}_L = \tilde{i}_{L1} = \tilde{i}_{L2} = \frac{(1-2D)MI_m \cos(2\varpi - \delta)}{2[4LC\varpi^2 - (1-2D)^2]} \quad (3.6)$$

$$\tilde{v}_{PN} = \tilde{v}_{C1} + \tilde{v}_{C2} = \frac{2\varpi LMI_m}{4LC\varpi^2 - (1-2D)^2} \quad (3.7)$$

Para el cálculo de las inductancias y capacitancias se utilizan las siguientes expresiones.

$$L_{ZSI} = \frac{2D(1-D)TV_g}{b\%MI_m \cos \varphi} \quad (3.8)$$

$$C_{ZSI} = \frac{(1 - 2D)MI_m}{x\% \omega V_g} + \frac{(1 - 2D)^2}{4w^2 L_{ZSI}} \quad (3.9)$$

En donde:

$b\%$ es la ondulación de frecuencia para la corriente

$x\%$ es la ondulación de frecuencia para el voltaje

Con las ecuaciones 3.8, 3.9 se obtienen los resultados que se muestran en la cuadro 3.1.

Cuadro 3.1.: Valores de Diseño del Inversor QZSI

V_{PN}	60 V
f_S	10 kHz
f	60 Hz
L_{ZSI}	1.5 mH
C_{ZSI}	2000 μ F

Realizado el diseño, se procede a elaborar la simulación en base a los parámetros establecidos en el cuadro 3.1 , en la cual se realiza un control en Labview para todas las topologías con la finalidad de realizar una posterior comparación. Para la parte del circuito se emplea el programa Multisim que se observa en la figura 2.8 obteniendo los valores de corriente, voltajes y potencias mostrados en el cuadro 3.2.

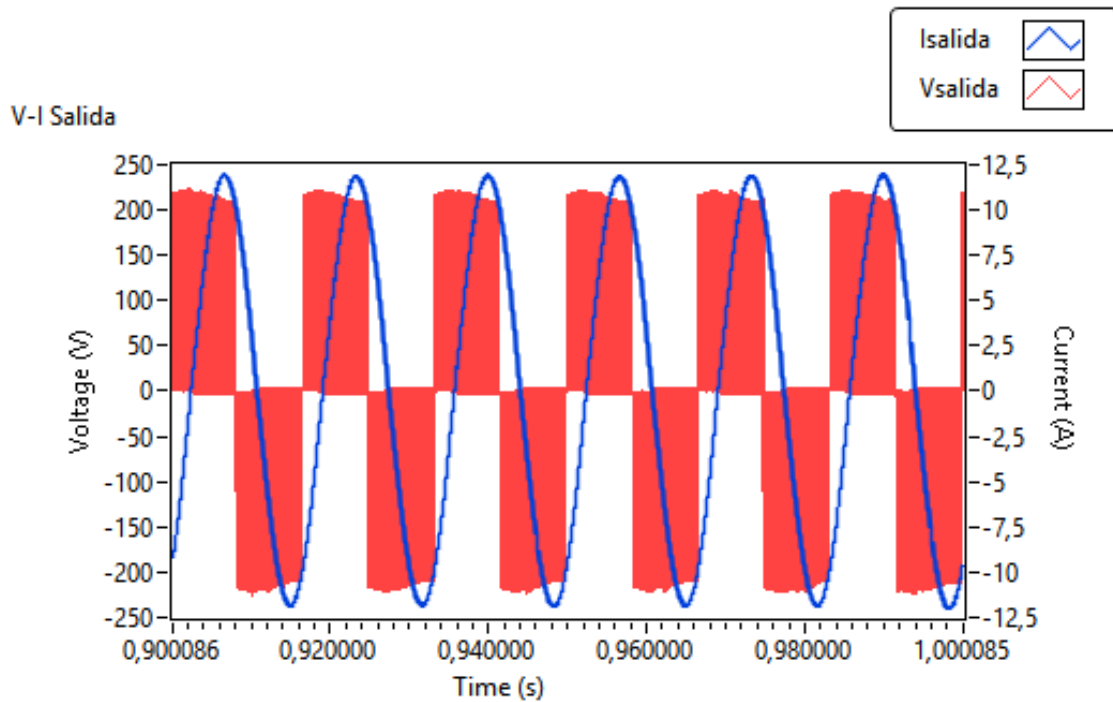


Figura 3.2.: Simulación inversor QZSI .

Cuadro 3.2.: Simulación QZSI

Simulación QZSI			
Elementos	Corriente (A)	Voltaje (V)	Potencia (W)
L_1	7.29	103.2	752.08
L_2	7.29	103.2	752.08
C_1	30.98	136.73	4236.16
C_2	30.98	76.88	2381.81
D_1	31.84	130.2	4145.04
S_{1-4}	17	118.58	2015.9
S_{2-3}	16.61	118.33	1965.94
Salida	8.35	122.02	1019.36

Para analizar la tolerancia a fallas que tiene el inversor se simula el circuito, variando cada uno de los inductores y capacitores en un porcentaje de $\pm 10\%$, con la finalidad de corroborar que los valores de voltaje se mantienen en un rango entre 110 y 127 voltios, tal como se observa en el cuadro 3.3.

Cuadro 3.3.: Tolerancia QZSI

QZSI			
L_1	Nominal	1.5 mH	122.02 V
	+10 %	1.65 mH	122.11 V
	-10 %	1.35 mH	122.24 V
L_2	Nominal	1.5 mH	122.02 V
	+10 %	1.65 mH	122.21 V
	-10 %	1.35 mH	122.23 V
C_1	Nominal	2000 μ F	122.02 V
	+10 %	2200 μ F	121.76 V
	-10 %	1800 μ F	122.06 V
C_2	Nominal	2000 μ F	122.02 V
	+10 %	2200 μ F	122.13 V
	-10 %	1800 μ F	122.22 V

Para el cálculo de la eficiencia se determinaron los valores instantáneos de potencia, que resulta del producto de $V_{ins}I_{ins}$ de cada una de las componentes del inversor, para posteriormente calcular la potencia activa para la cual se realiza el promedio de todos los valores instantáneos en un tiempo de 100 ms. La eficiencia del inversor se determinó por tres métodos diferentes, utilizando las ecuaciones 3.10, 3.11, 3.12, con los que se obtuvieron resultados muy cercanos como se muestra en el cuadro 3.4.

$$Eficiencia = 1 - \frac{\sum \text{pérdidas}}{P_{entrada}} \quad (3.10)$$

$$Eficiencia = \frac{1}{1 + \frac{\sum \text{Pérdidas}}{P_{salida}}} \quad (3.11)$$

$$Eficiencia = \frac{P_{salida}}{P_{entrada}} \quad (3.12)$$

Cuadro 3.4.: Eficiencia QZSI

Análisis de Eficiencia			
Entrada	403.6666 W	Eficiencia	89.91 %
Salida	363.9829 W		
L_1	2.2611 W		
L_2	2.1787 W	Eficiencia	89.94 %
C_1	8.8003 W		
C_2	7.3201 W		
S_1	5.3341 W	Eficiencia	90.17 %
S_2	4.4706 W		
S_3	4.4706 W		
S_4	5.3341 W		

Para analizar el costo del equipo se recurre a precios del exterior y en una adquisición al por mayor, llegando a tener un valor del equipo que se presenta en el cuadro 3.5.

Cuadro 3.5.: Costos QZSI

Análisis de Costos QZSI				
Item	Descripción	Cantidad	Precio Unitario (\$)	Total (\$)
1	Inductor Potencia 1.5 mH	2	7.4	14.8
2	Capacitor Potencia 2200 μ F	2	35	70
3	IGBT - AUIRGP4063D	4	8.03	32.12
4	DIODO - SUR83060PTG	1	3.3	3.3
TOTAL				\$ 120.22

3.2. Diseño del Inversor QSBI

Para el diseño del inversor QSBI que se observa en la figura 3.3 se realizan las siguientes suposiciones:

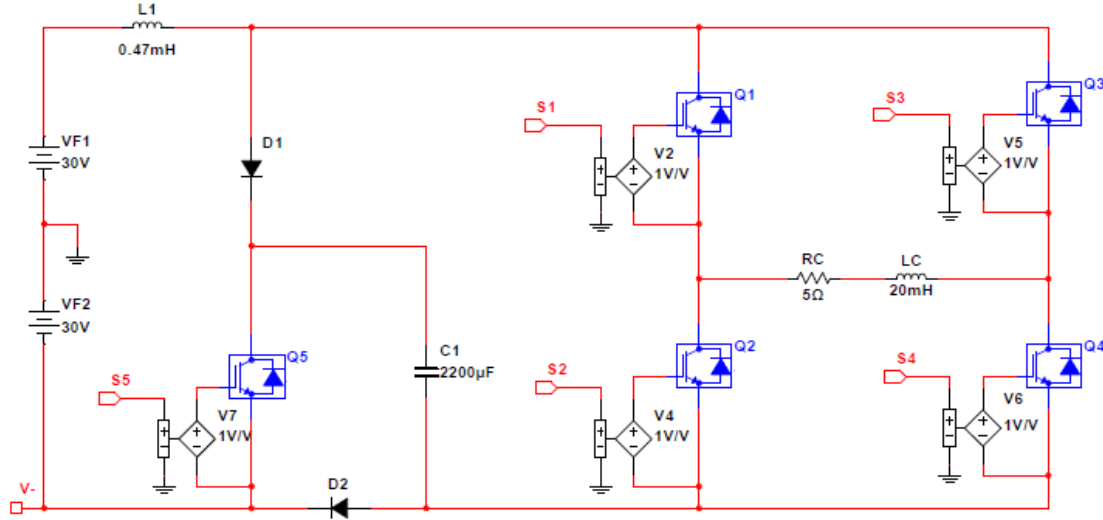


Figura 3.3.: Inversor QSBI .

- 1) El inversor está funcionando en una conducción continua.
- 2) La fuente de tensión de CC es constante.
- 3) Las señales de perturbaciones pequeñas se denotan con el símbolo "~"

En base a las suposiciones anteriores y resolviendo todas las ecuaciones desarrolladas en [3] se obtienen las siguientes expresiones para el diseño del inversor.

$$i_L = I_L + \tilde{i}_L = \frac{MI_m \cos \delta}{2(1-2D)} + \frac{(1-2D)MI_m \cos(2\varpi - \delta)}{2[4LC\varpi^2 - (1-2D)^2]} \quad (3.13)$$

$$v_C = V_C + \tilde{V}_C = \frac{1}{1-2D}V_g + \frac{\varpi LMI_m \sin(2\varpi t - \delta)}{4LC\varpi^2 - (1-2D)^2} \quad (3.14)$$

$$v_{PN} = V_{PN} + \tilde{v}_{PN} = v_C = \frac{1}{1-2D}V_g + \frac{\varpi LMI_m \sin(2\varpi t - \delta)}{4LC\varpi^2 - (1-2D)^2} \quad (3.15)$$

En donde:

ϖ es la frecuencia angular

δ es el ángulo de impedancia

I_m es la amplitud de la corriente alterna de salida

M es el índice de modulación

D es el ciclo de trabajo

V_{PN} es el voltaje pico de entrada

V_g es el voltaje continuo de entrada

Se puede determinar las expresiones de la corriente y voltaje del inductor de la siguiente forma:

$$\tilde{i}_L = \frac{(1 - 2D)MI_m}{2[4LC\omega^2 - (1 - 2D)^2]} \quad (3.16)$$

$$\tilde{v}_{PN} = V_C = \frac{\omega LMI_m}{4LC\omega^2 - (1 - 2D)^2} \quad (3.17)$$

Para el cálculo de la inductancia y capacitancia del inversor se utilizan las expresiones siguientes:

$$L_{ZSI} = \frac{4D(1 - D)TV_g}{b\%MI_m \cos\varphi} \quad (3.18)$$

$$C_{ZSI} = \frac{(1 - 2D)MI_m}{2x\%\omega V_g} + \frac{(1 - 2D)^2}{4\omega^2 L_{SBI}} \quad (3.19)$$

En donde:

$b\%$ es la ondulación de frecuencia para la corriente

$x\%$ es la ondulación de frecuencia para el voltaje

Una vez realizado el diseño se obtienen los valores presentados en el cuadro 3.6.

Cuadro 3.6.: Valores de Diseño del Inversor QSBI

V_{PN}	60V
f_S	10 kHz
f	60 Hz
L_{ZSI}	0.47 mH
C_{ZSI}	2200 μ F

Con base a los valores determinados en el cuadro 3.6 se realiza la simulación obteniendo los resultados que se muestran en la figura 3.4 y en el cuadro 3.7.

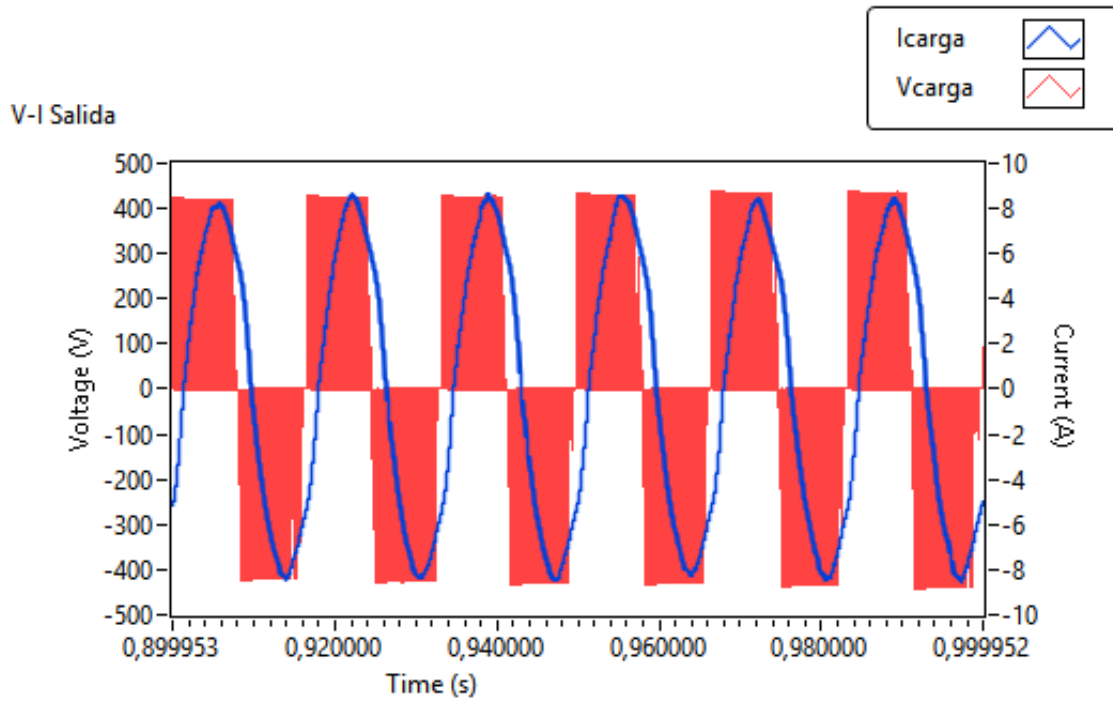


Figura 3.4.: Simulación inversor QSBI .

Cuadro 3.7.: Simulación QSBI

Simulación QSBI			
Elementos	Corriente (A)	Voltaje (V)	Potencia (W)
L_1	3.35	291.34	976.56
C_1	12.07	333.18	4020.95
D_1	8.69	232.31	2018.44
D_2	8.98	196.47	1764.65
S_{1-4}	6.14	156.53	960.946
S_{1-3}	7.67	266.3	2043.78
S_5	6.54	168.12	1099.50
Salida	6.57	126.86	833.17

Para el análisis del circuito se realizó un proceso similar al inversor anterior, considerando un rango de variación de $\pm 10\%$ a cada capacitor e inductor con la finalidad de comprobar que el voltaje no exceda el rango establecido entre 100 y 127 voltios, tal como se observa en el cuadro 3.8.

Cuadro 3.8.: Tolerancia QSBI

QSBI			
L_1	Nominal	0.47 mH	126.86 V
	+5 %	0.49 mH	128.73 V
	10 %	0.517 mH	130.39 V
	-10 %	0.42 mH	122.11 V
C_1	Nominal	2200 μ F	126.86 V
	+10 %	2420 μ F	125.74 V
	-5 %	2090 μ F	127.55 V
	-10 %	1980 μ F	128.09 V

En el presente inversor se observó que ante variaciones de 10 % en la inductancia ó 10 % en el capacitor, los valores de voltaje exceden el rango de funcionamiento.

La eficiencia del sistema se calculó con las formulas, obteniéndose los resultados que se muestran en el cuadro3.9.

Cuadro 3.9.: Eficiencia QSBI

Análisis de Eficiencia			
Entrada	461.6914 W	Eficiencia	86.07 %
Salida	397.9771 W		
L_1	2.468406 W		
C_1	5.6003 W	Eficiencia	86.09 %
S_1	8.9892 W		
S_2	9.0764 W		
S_3	9.0764 W	Eficiencia	86.20 %
S_4	8.9892 W		
S_5	20.1002 W		

Realizado el análisis económico del inversor, se determinó que el costo disminuye en comparación con las demás topologías, resultados que se muestran en el cuadro 3.10.

Cuadro 3.10.: Costos QSBI

Análisis de Costos QSBI				
Item	Descripción	Cantidad	Precio Unitario (\$)	Total (\$)
1	Inductor Potencia 0.47mH	1	6.83	6.83
2	Capacitor Potencia 2200 μ F	1	35	35
3	IGBT - AUIRGP4063D	5	8.03	40.15
4	DIODO - SUR83060PTG	2	3.3	3.3
TOTAL				\$ 88.58

3.3. Diseño del Inversor SL - QZSI

Para el diseño del inversor QZSL- SL se aplican las siguientes ecuaciones, las que se pueden revisar detalladamente en [27].

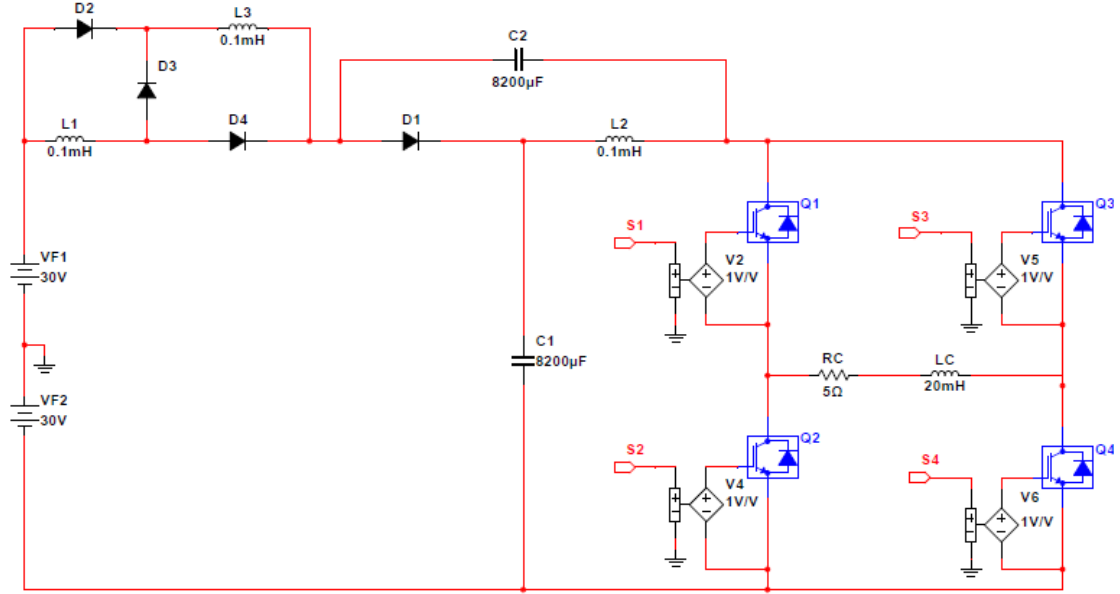


Figura 3.5.: Inversor QZSI-SL .

$$V_{C1} = (1 - D)V_{dc} - V_{in} \quad (3.20)$$

$$V_{C2} = \frac{(1 - D)V_{dc} - (1 - D)V_{in}}{1 + D} \quad (3.21)$$

$$V_{dc} = \frac{1 + D}{1 - 2D - D^2} \quad (3.22)$$

$$I_{L2} = I_{L3} = \frac{1 - D}{1 - 2D - D^2} V_{in} \quad (3.23)$$

Desarrollando las ecuaciones 3.20, 3.21, 3.23, se procedió a calcular los valores de las inductancias y capacitancias del inversor las cuales se presentan en el cuadro 3.11.

En base en el cuadro 3.11 se realiza la simulación correspondiente obteniendo los resultados ilustrados en la figura 3.6 y resumidos en el cuadro 3.12, en donde se puede corroborar que la salida de voltaje del inversor está dentro del rango establecido para una red eléctrica monofásica.

Cuadro 3.11.: Valores de Diseño del Inversor SL-QSBI

V_{PN}	60V
f_S	10 kHz
f	60 Hz
L_{ZSI}	0.1 mH
C_{ZSI}	8200 uF

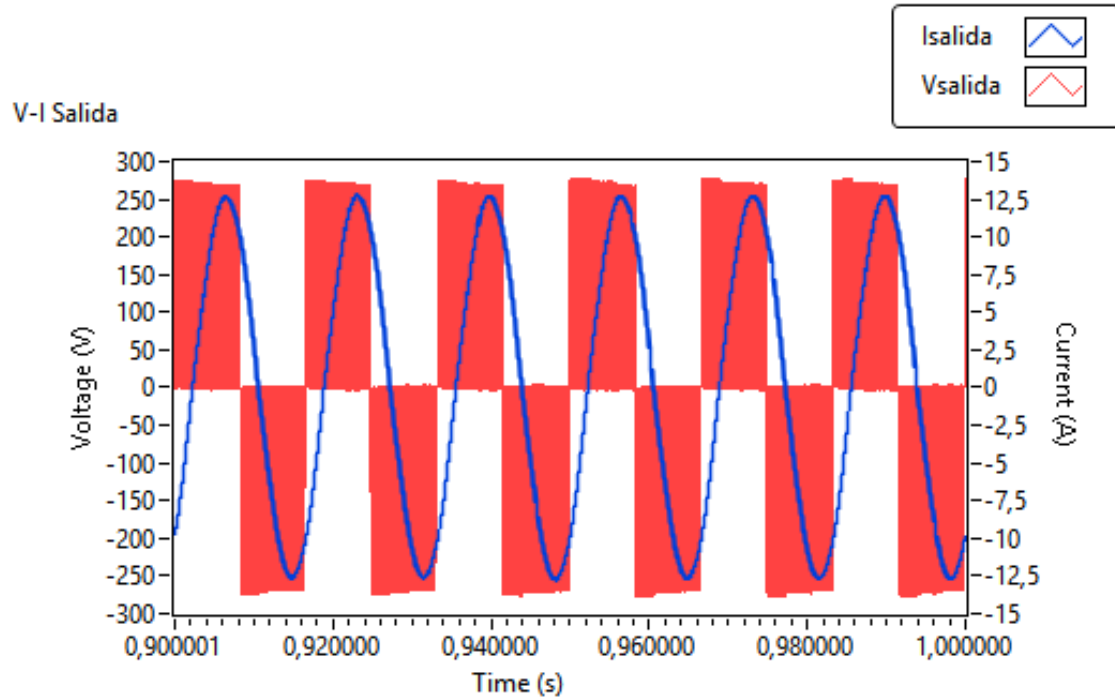


Figura 3.6.: Simulación Inversor SL-QZSI .

Cuadro 3.12.: Simulación SL-QSBI

Simulación SL - QZSI			
Elementos	Corriente (A)	Voltaje (V)	Potencia (W)
L_1	9.76	80.76	786.649
L_2	9.76	80.76	786.649
L_3	9.76	80.76	786.649
C_1	30.77	164.48	5061.27
C_2	20.38	117.59	2396.93
D_1	33.23	131.93	4384.85
D_2	35.61	65.81	2343.73
D_3	36.05	69.27	2497.15
D_4	35.61	65.81	2343.73
S_{1-4}	13.3	131.83	1752.96
S_{2-3}	13.53	119.38	1615.25
Salida	8.25	123.99	1023.3

La tolerancia se procedió a analizarla en base al procedimiento de los dos inversores anteriores, obteniendo los resultados mostrados en el cuadro 3.13.

Cuadro 3.13.: Tolerancia SL-QSBI

SL - QZSI			
L_1	Nominal	0.1 mH	123.99 V
	+10 %	0.11 mH	122.11 V
	-10 %	0.09 mH	122.24 V
L_2	Nominal	0.1 mH	123.99 V
	+10 %	0.11 mH	124.11 V
	-10 %	0.09 mH	123.24 V
L_3	Nominal	0.1 mH	123.99 V
	+10 %	0.11 mH	126.31 V
	-10 %	0.09 mH	122.63 V
C_1	Nominal	8200 μ F	123.99 V
	+10 %	9020 μ F	122.64 V
	-10 %	7380 μ F	124.71 V
C_2	Nominal	8200 μ F	123.99 V
	+10 %	9020 μ F	123.38 V
	-10 %	7380 μ F	124.06 V

El valor de eficiencia se determino utilizando las ecuaciones 3.10, 3.11, 3.12, obteniéndose los resultados mostrados en el cuadro 3.14.

Cuadro 3.14.: Eficiencia SL-QSBI

Análisis de Eficiencia			
Entrada	547.1808 W		
Salida	503.1394 W		
L_1	0.7059 W	Eficiencia	92.11 %
L_2	0.7059 W		
L_3	0.7059 W		
C_1	7.5652 W	Eficiencia	92.10 %
C_2	6.3822 W		
S_1	6.3833W		
S_2	7.1650 W	Eficiencia	91.95 %
S_3	7.1650 W		
S_4	6.3833 W		

Para el análisis económico se procedió a determinar el costo de cada componente, obteniéndose un valor muy elevado para esta topología, resultados que se muestran en el cuadro 3.15.

Cuadro 3.15.: Costos SL-QSBI

Análisis de Costos SL - QZSI				
Item	Descripción	Cantidad	Precio Unitario (\$)	Total (\$)
1	Inductor Potencia 0.1mH	3	6.20	18.6
2	Capacitor Potencia 8200 μF	2	70	140
3	IGBT - AUIRGP4063D	4	8.03	32.12
4	DIODO - SUR83060PTG	4	3.3	13.2
			TOTAL	\$ 203.92

3.4. Diseño del Inversor QZSI - SL

En el diseño del Inversor QZSI-SL se utilizan las ecuaciones enunciadas a continuación, las cuales se deducen en [28].

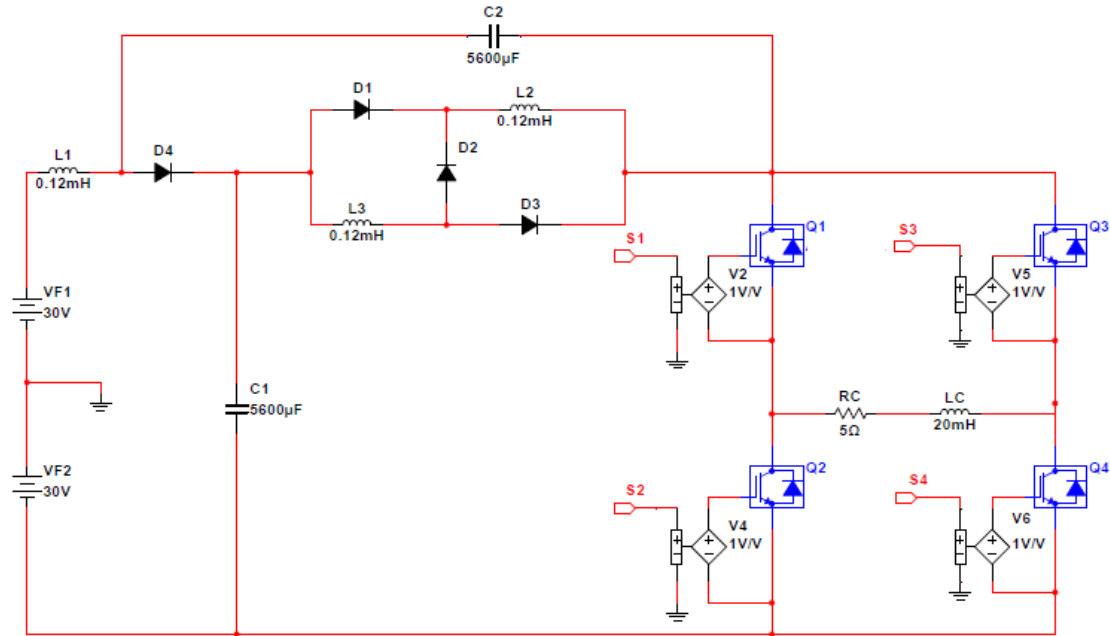


Figura 3.7.: Inversor QZSI .

$$V_{C1} = \frac{1 + D^2}{1 - 2D - D^2} \frac{V_{dc}}{2} \quad (3.24)$$

$$V_{C2} = \frac{1 + 2D - D^2}{1 - 2D - D^2} \frac{V_{dc}}{2} \quad (3.25)$$

$$V_{PN} = V_{C1} + V_{C2} = \frac{1 - D}{1 - 2D - D^2} V_{dc} = BV_{dc} \quad (3.26)$$

$$I_{L2} = I_{L3} = \frac{1 - D}{1 - 2D - D^2} \quad (3.27)$$

Después de aplicar las ecuaciones 3.24, 3.25, 3.27, se procede a determinar los valores de las componentes pasivas del sistema, enunciada en la tabla 3.16.

Cuadro 3.16.: Valores de Diseño del Inversor QSBI-SL

V_{PN}	60 V
f_S	10 kHz
f	60 Hz
L_{ZSI}	0.12 mHz
C_{ZSI}	5600 μ F

Considerando los valores anteriores se procedió a realizar la simulación correspondiente, obteniendo la gráfica de la figura 3.8 y los valores de la tabla 3.17.

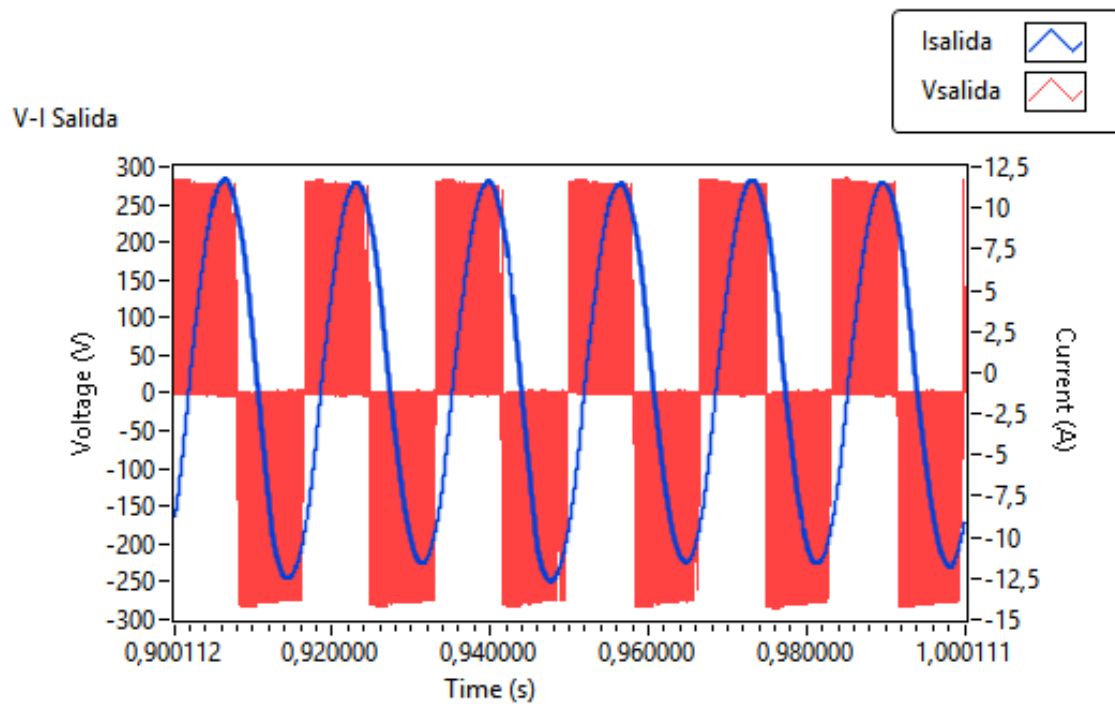


Figura 3.8.: Simulación Inversor QZSI- SL .

Cuadro 3.17.: Simulación QSBI-SL

Simulación SL - QZSI			
Elementos	Corriente (A)	Voltaje (V)	Potencia (W)
L_1	10.26	105.54	1082.77
L_2	9.7	80.36	779.138
L_3	9.7	80.36	779.138
C_1	18.48	135.15	2497.04
C_2	34.4	112.65	3875.29
D_1	38.46	46.58	1791.18
D_2	37.46	94.05	3523.11
D_3	37.45	93.97	3519.17
D_4	28.25	94.25	3605.06
S_{1-4}	12.06	135.31	1632.1
S_{2-3}	11.17	134.9	1580.8
Salida	7.86	119.88	941.826

Para el análisis de la tolerancia de falla se analiza un rango de variación para cada inductor o capacitor de $\pm 10\%$, con lo cual se obtuvieron los valores mostrados en el cuadro 3.18.

Cuadro 3.18.: Tolerancia QSBI-SL

SL - QZSI			
L_1	Nominal	0.12 mH	119.88 V
	+10 %	0.132 mH	122.53 V
	-10 %	0.108 mH	127.94 V
L_2	Nominal	0.12 mH	199.88 V
	+10 %	0.132 mH	121.53 V
	-10 %	0.108 mH	120.71 V
L_3	Nominal	0.12 mH	119.88 V
	+10 %	0.132 mH	120.77 V
	-10 %	0.108 mH	120.69 V
C_1	Nominal	5600 μ F	119.88 V
	+10 %	6160 μ F	119.41 V
	-10 %	5040 μ F	120.11 V
C_2	Nominal	5600 μ F	119.88 V
	+10 %	6160 μ F	119.21 V
	-10 %	5040 μ F	120.4 V

La eficiencia del presente inversor fue la más alta de todas las analizadas, llegando a valores cercanos al 94 % tal como se muestra en el cuadro 3.19.

Cuadro 3.19.: Eficiencia QSBI-SL

Análisis de Eficiencia			
Entrada	501.8666 W		
Salida	471.8403 W		
L_1	0.2984 W	Eficiencia	93.85 %
L_2	0.2701 W		
L_3	0.2701 W		
C_1	2.7273 W	Eficiencia	93.86 %
C_2	2.5403 W		
S_1	6.3843W		
S_2	5.9996 W	Eficiencia	94.02 %
S_3	5.9996 W		
S_4	6.3843 W		

El análisis económico del presente inversor se obtuvo en base a precios al por mayor, obteniendo los resultados mostrados en el cuadro 3.20.

Cuadro 3.20.: Costos QSBI-SL

Análisis de Costos SL - QZSI				
Item	Descripción	Cantidad	Precio Unitario (\$)	Total (\$)
1	Inductor Potencia 0.12mH	3	6.20	18.6
2	Capacitor Potencia 5600 μ F	2	56	112
3	IGBT - AUIRGP4063D	4	8.03	32.12
4	DIODO - SUR83060PTG	4	3.3	13.2
			TOTAL	\$ 175.92

3.5. Análisis de Resultados

3.5.1. Rizado

El rizado que se analiza en todas las topologías es el que se produce en los puntos críticos de las componentes pasivas, es decir en los picos de corriente o voltaje de cada componente.

3.5.1.1. Rizado QZSI

En la Figura 3.9, 3.10, 3.11 se muestran los rizados en los puntos críticos de las componentes pasivas del sistema, se observa que el inductor ubicado en la entrada es el más afectado debido a que tiene un factor de rizado para el voltaje y corriente de 44,62 % y 52 % respectivamente, como se muestra en el cuadro 3.21, los cuales limitan que la corriente de entrada del controlador se reduzca a la mitad, produciendo que la corriente de salida tenga una ganancia mínima.

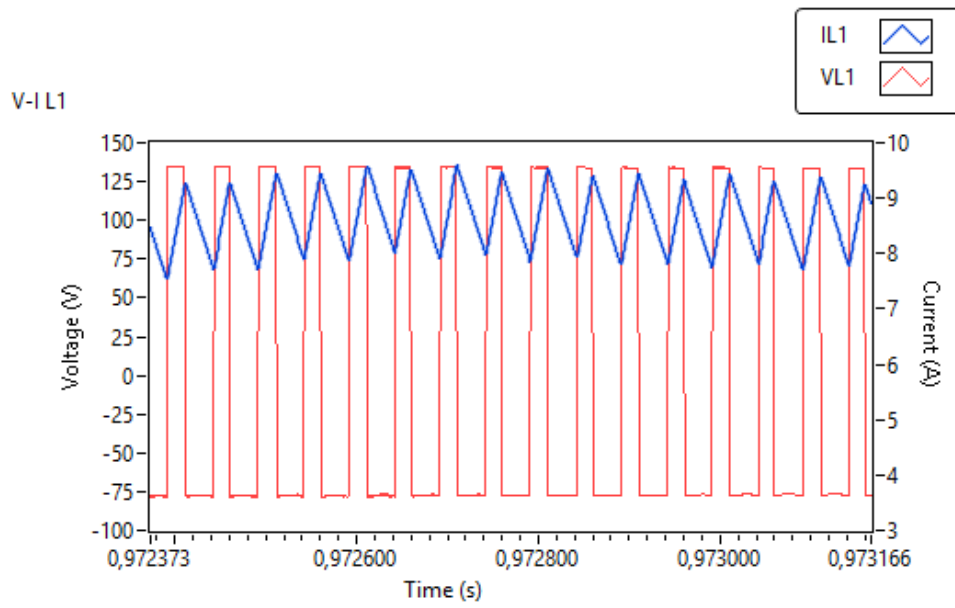


Figura 3.9.: Rizado en el Inductor L1y L2 .

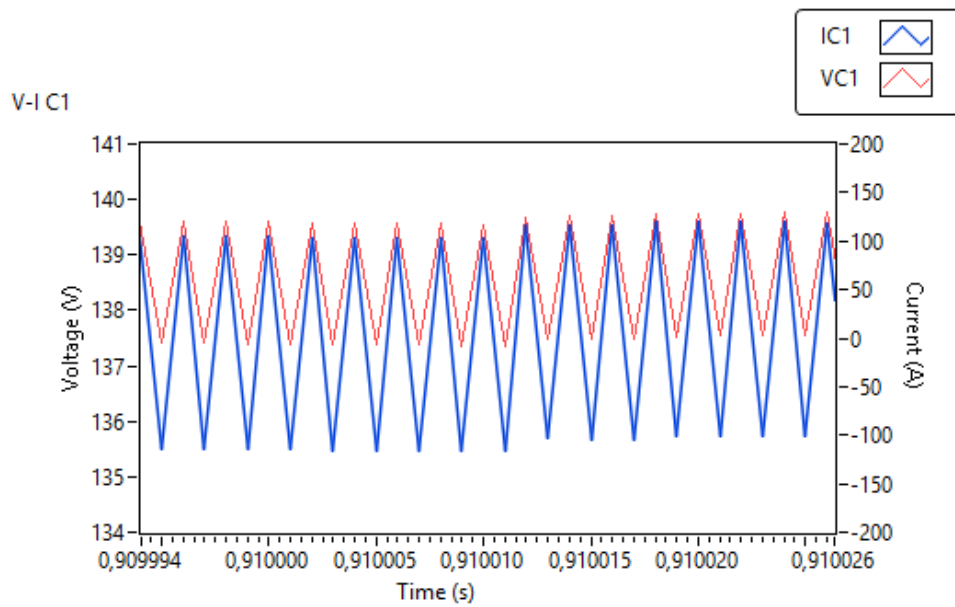


Figura 3.10.: Rizado en el Capacitor C1 .

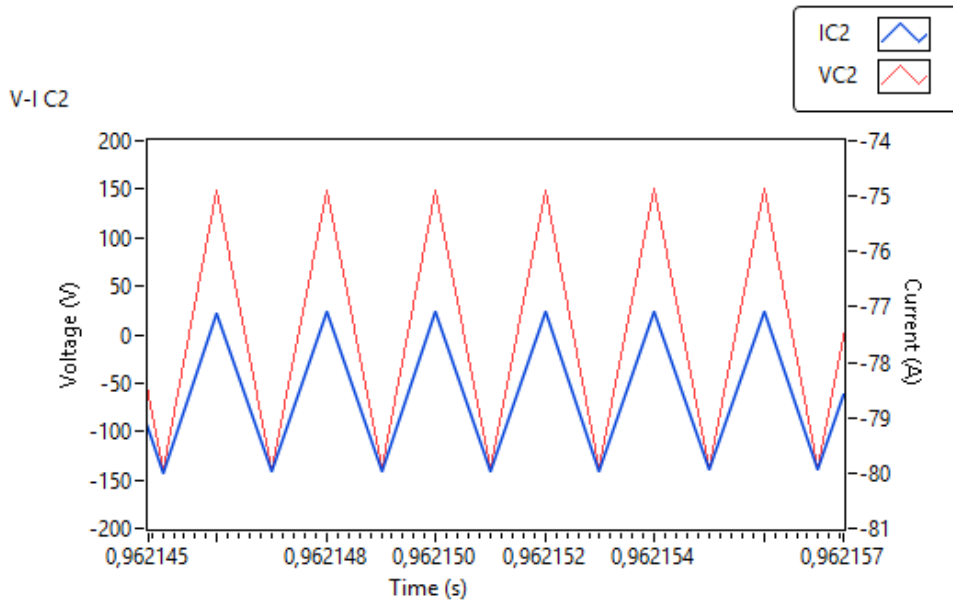


Figura 3.11.: Rizado en el Capacitor C2 .

Cuadro 3.21.: Factor de Rizado QZSI

Factor de Rizado QZSI			
Elemento		Valor	Factor de Rizado
L_1	V_{max}	130 V	44.62 %
	V_{min}	72 V	
	I_{max}	125 A	52.00 %
	I_{min}	60 A	
L_2	V_{max}	130 V	44.62 %
	V_{min}	72 V	
	I_{max}	125 A	52.00 %
	I_{min}	60 A	
C_1	V_{max}	140 V	1.43 %
	V_{min}	138 V	
	I_{max}	139 A	2.16 %
	I_{min}	136 A	
C_2	V_{max}	270 V	144.44 %
	V_{min}	-120 V	
	I_{max}	10 A	1500.00 %
	I_{min}	-140 A	

3.5.1.2. Rizado QSBI

En la figura 3.12, 3.13, se muestran los rizados tanto del inductor como del capacitor y en el cuadro 3.22 sus valores, en los cuales se observa que el factor de rizado de voltaje y corriente en C_1 es de 0.23 % y 0.92 %, los mismos que producen que el voltaje tenga una ganancia elevada, mientras que en el inductor L_1 que es la encargada de limitar la corriente del sistema, el rizado de la corriente se ve afectada con una

disminución de 30 % produciendo una disminución de corriente entre la entrada y la salida.

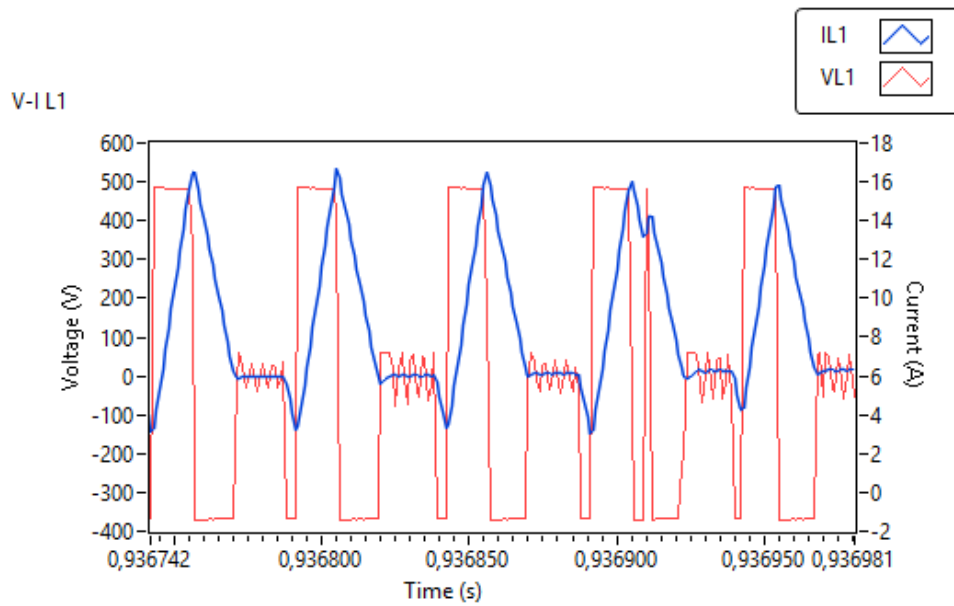


Figura 3.12.: Rizado en el Inductor L1 .

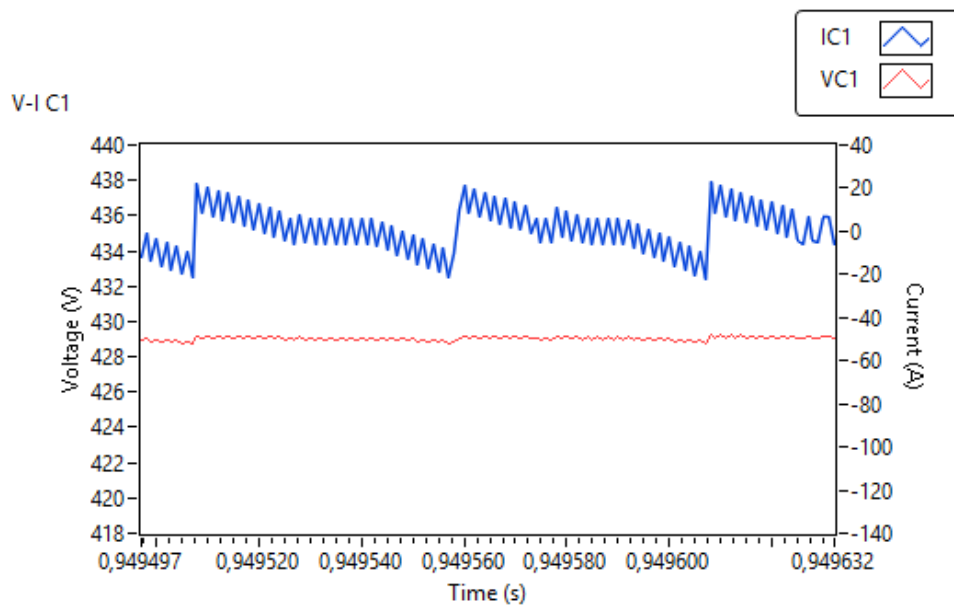


Figura 3.13.: Rizado en el Capacitor C1 .

Cuadro 3.22.: Factor de Rizado QSBI

Factor de Rizado QSBI			
Elemento		Valor	Factor de Rizado
L_1	V_{max}	500 V	170 %
	V_{min}	-350 V	
	I_{max}	510 A	127.45 %
	I_{min}	-140 A	
C_1	V_{max}	430 V	0.23 %
	V_{min}	429 V	
	I_{max}	437 A	0.92 %
	I_{min}	433 A	

3.5.1.3. Rizado SL - QZSI

En las figuras 3.14, 3.15, 3.16 se observan los rizados de las componentes pasivas en los puntos críticos de funcionamiento y en el cuadro 3.23 valores. Se resalta que el factor de rizado para el voltaje y corriente en los inductores es de 140 % y 100 % respectivamente, los cuales producen pérdidas considerables a la salida del inversor, todo esto debido a la configuración especial del esquema utilizado.

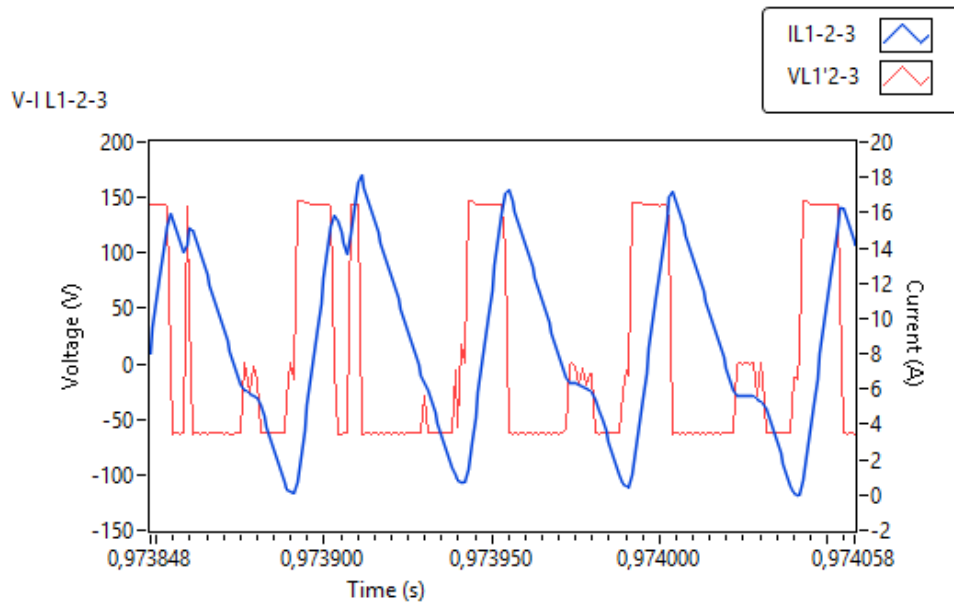


Figura 3.14.: Rizado en el Inductor L1, L2, L3 .

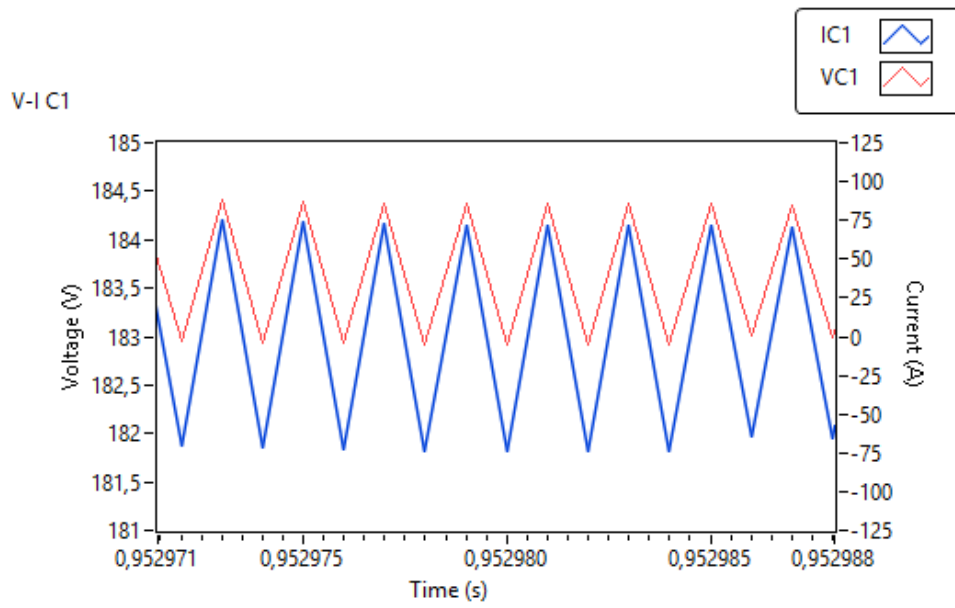


Figura 3.15.: Rizado en el Capacitor C1 .

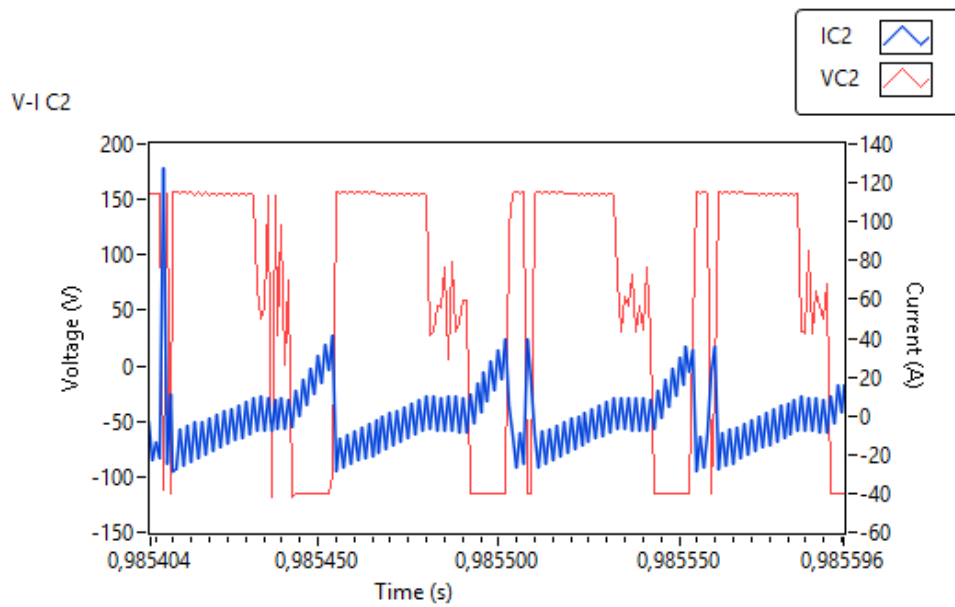


Figura 3.16.: Rizado en el Capacitor C2 .

Cuadro 3.23.: Factor de Rizado SL-QZSI

Factor de Rizado SL-QZSI			
Elemento		Valor	Factor de Rizado
L_1	V_{max}	150 V	140 %
	V_{min}	-60 V	
	I_{max}	16 A	100 %
	I_{min}	0 A	
L_2	V_{max}	150 V	140 %
	V_{min}	-60 V	
	I_{max}	16 A	100 %
	I_{min}	0 A	
L_3	V_{max}	150 V	140 %
	V_{min}	-60 V	
	I_{max}	16 A	100 %
	I_{min}	0 A	
C_1	V_{max}	184 V	1.09 %
	V_{min}	182 V	
	I_{max}	75 A	100 %
	I_{min}	0 A	
C_2	V_{max}	150 V	166.67 %
	V_{min}	-100 V	
	I_{max}	120 A	133.33 %
	I_{min}	40 A	

3.5.1.4. Rizado QZSI - SL

Los rizados de los inductores y capacitores se muestran en las figuras 3.17, 3.18 y sus valores en el cuadro 3.24, destacando en estos el factor de rizado para el voltaje y corriente del inductor L_1 que es de 155 % y de 166 % respectivamente, motivo por el cual se tiene una disminución de corriente considerable a la entrada. Sin embargo, la topología posee un rango de ganancia elevado en la salida.

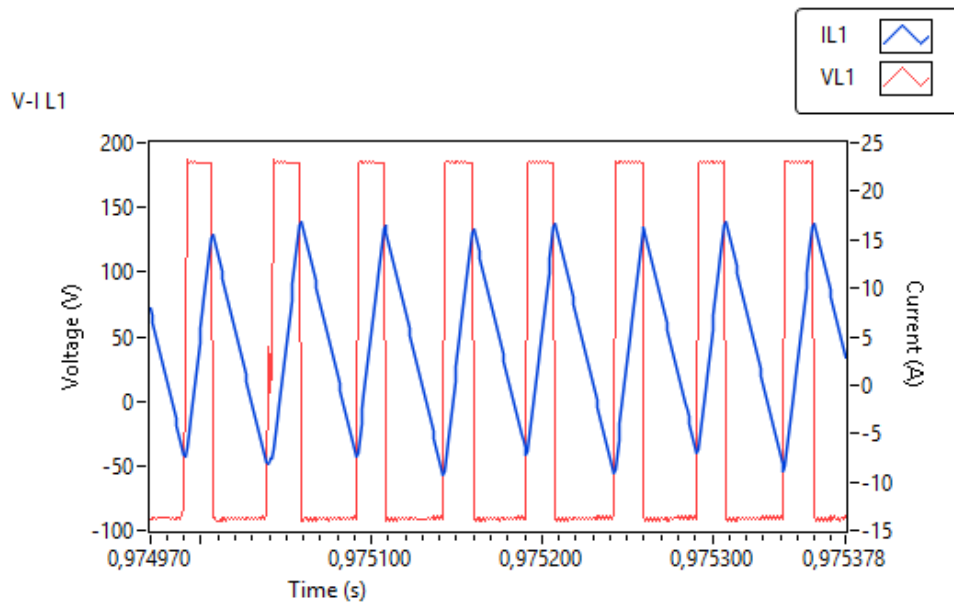


Figura 3.17.: Rizado en el Inductor L1 .

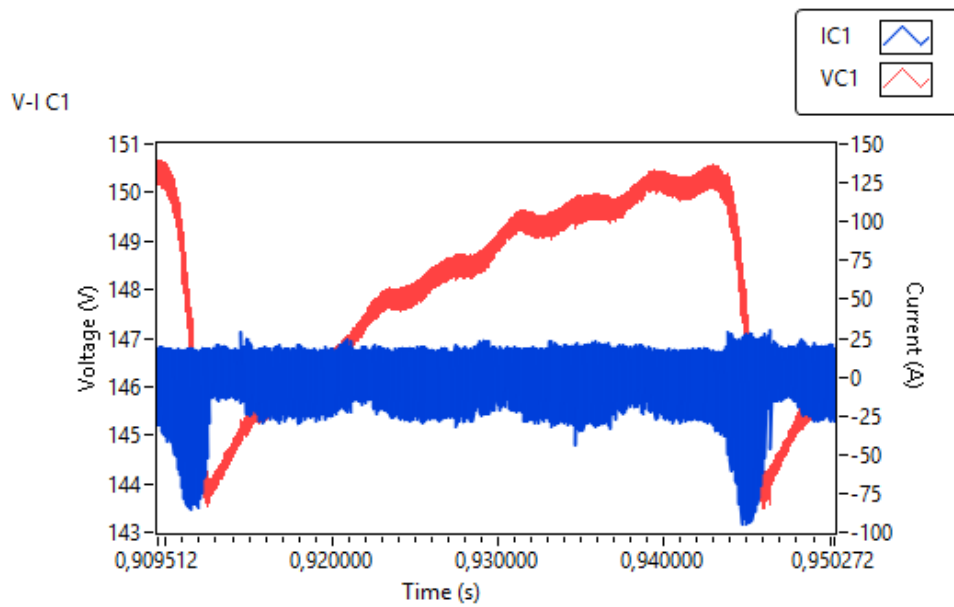


Figura 3.18.: Rizado en el Capacitor C1 .

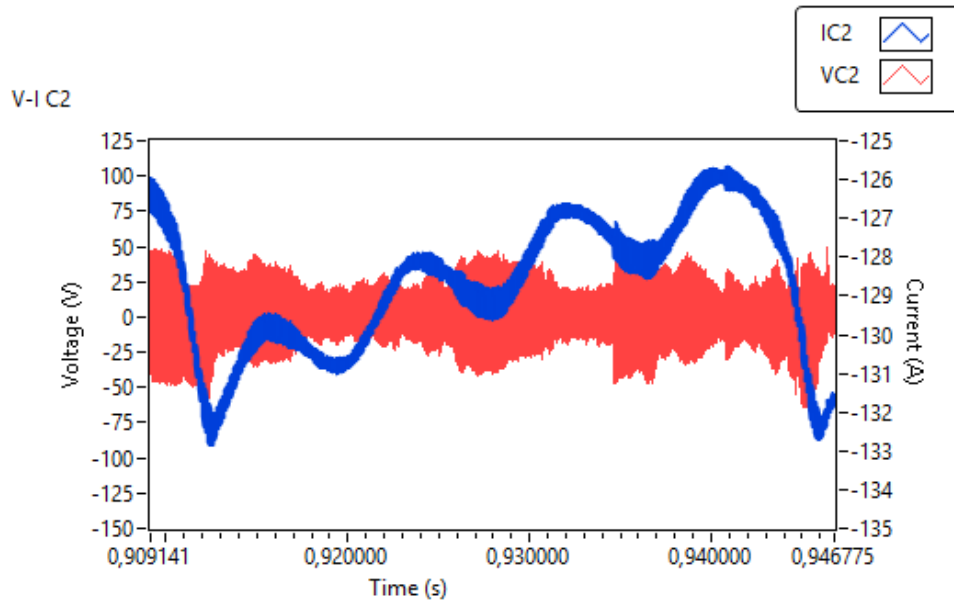


Figura 3.19.: Rizado en el Capacitor C2 .

Cuadro 3.24.: Factor de Rizado QZSI-SL

Factor de Rizado SL-QZSI			
Elemento	Valor	Factor de Rizado	
L_1	V_{max}	180 V	155.56 %
	V_{min}	-100 V	
	I_{max}	15 A	166.67 %
	I_{min}	-10 A	
L_2	V_{max}	150 V	140 %
	V_{min}	-60 V	
	I_{max}	40 A	42.50 %
	I_{min}	23 A	
L_3	V_{max}	150 V	140 %
	V_{min}	-60 V	
	I_{max}	40 A	42.50 %
	I_{min}	23 A	
C_1	V_{max}	150 V	4 %
	V_{min}	144 V	
	I_{max}	25 A	460 %
	I_{min}	-90 A	
C_2	V_{max}	100 V	200 %
	V_{min}	-100 V	
	I_{max}	-128 A	-2.43 %
	I_{min}	-131 A	

3.5.2. Rango de Intercambio (Ganancia)

El rango de intercambio hace referencia a la relación de voltaje, corriente y potencia de entrada con respecto a la salida, para lo cual se realiza un análisis entre estos valores en cada topología, priorizando la potencia debido a que es un parámetro fundamental en este análisis.

3.5.2.1. QZSI

El inversor QZSI posee una ganancia en la corriente y la potencia, motivo por el cual se considera que posee un rango de intercambio amplio, como se observa en el cuadro 3.25.

Cuadro 3.25.: Rango de Intercambio QZSI

Rango de Intercambio QZSI				
Entrada		Salida		Ganancia
$V_{entrada}$	60 V	V_{salida}	122.02 V	103.37 %
$I_{entrada}$	7.29 A	I_{salida}	8.35 A	14.54 %
$P_{entrada}$	437.51 W	P_{salida}	1019.36 W	132.99 %

3.5.2.2. QSBI

Esta topología tiene una pérdida de corriente en la salida motivo por el cual ocasiona una reducción de potencia en el inversor, como se muestra en el cuadro 3.26.

Cuadro 3.26.: Rango de Intercambio QSBI

Rango de Intercambio QSBI				
Entrada		Salida		Ganancia
$V_{entrada}$	60 V	V_{salida}	126.86 V	111.43 %
$I_{entrada}$	9.65 A	I_{salida}	6.57 A	-31.92 %
$P_{entrada}$	57901 W	P_{salida}	833.17 W	43.90 %

3.5.2.3. SL-QZSI

Este circuito tiene un rango de intercambio reducido, debido a que la topología presenta una reducción de corriente en la salida del inversor, que lógicamente provocará un disminución en la potencia entregada. Este comportamiento se puede observar en el cuadro 3.27.

Cuadro 3.27.: Rango de Intercambio SL - QZSI

Rango de Intercambio SL - QZSI				
Entrada		Salida		Ganancia
$V_{entrada}$	60 V	V_{salida}	123.99 V	106.65 %
$I_{entrada}$	37.78 A	I_{salida}	8.25 A	-78.16 %
$P_{entrada}$	2266.74 W	P_{salida}	1023.3 W	-54.86 %

3.5.2.4. QZSI-SL

En el inversor QZSI-SL posee una pequeña disminución de corriente en la salida del inversor, ocasionando que la ganancia de potencia a la salida no tenga un valor considerable. Datos que se puede observar en el cuadro 3.28.

Cuadro 3.28.: Rango de Intercambio QZSI - SL

Rango de Intercambio QZSI -SL				
Entrada		Salida		Ganancia
$V_{entrada}$	60 V	V_{salida}	119.88 V	99.80 %
$I_{entrada}$	10.26 A	I_{salida}	7.68 A	-25.15 %
$P_{entrada}$	615.564 W	P_{salida}	941.826 W	53 % %

3.5.3. Modulación y Control

La modulación que se utiliza es un control SPWM en el cual se compara una señal portadora, con una señal moduladora con la finalidad de obtener anchos de pulsos, para que posteriormente ingresen a una lógica con compuertas, que producirán los pulsos que irán a los IGBTs, produciendo la señal de salida, la misma que fue diseñada para un rango de 110 a 127 voltios, con una potencia cercana a 1 kW.

3.5.4. Eficiencia

La eficiencia fue calculada por tres métodos diferentes, lo que ofrece seguridad y permite corroborar la veracidad de los datos, debido a que sus resultados fueron similares; en estos cálculos se determinó que la topología que presta una mayor eficiencia es la QZSI-SL llegando a tener una eficiencia del 94 %, y la que menor rendimiento presentó es la topología QSBI con 86 % de eficiencia.

3.5.5. Tolerancia a Fallas

Para analizar la tolerancia a fallas, que se puede estudiar como confiabilidad del inversor, se procedió a variar los componentes pasivas en un rango de ± 10 %, llegando a obtener resultados satisfactorios en las topologías QZSI, SL-QZSI, SL-QZSI debido a que la variación no afecta el funcionamiento del inversor. En cambio la topología QSBI excede el rango de funcionamiento normal cuando el inductor varía un 10 % o el capacitor un -10 %, indicando que este inversor no es muy robusto ante variación de los parámetros de sus componentes pasivas, por lo cual es menos tolerante a fallas.

3.5.6. Análisis Económico

Para el análisis económico se analizaron los costos en otros países, considerando una compra a gran escala. Se obtuvo que el inversor más económico es el QSBI debido a

que posee menos cantidad de componentes en comparación con las otras topologías, y el más costoso es el inversor SL-QZSI debido a que posee una cantidad considerable de componentes.

3.5.7. Análisis General

Cuadro 3.29.: Análisis General

Criterio de Evaluación Topología	Criterios de Análisis				
	Tolerancia	Eficiencia	Costos	FR	Ganancia
	Cualitativo	%	\$	Cualitativo	Cualitativo
QZSI	Bueno	90.17	120.22	Normal	Bueno
QSBI	Malo	86.20	88.58	Normal	Normal
SL - QZSI	Bueno	91.95	203.92	Malo	Normal
QZSI - SL	Bueno	94.02	175.92	Normal	Bueno

4. CAPÍTULO 4: Conclusiones y Recomendaciones

4.1. Conclusiones

Los inversores QZSI son muy útiles debido a su eficiencia tanto técnica como económica. Las ventajas que presentan han impulsado el desarrollo de varias topologías con la finalidad de encontrar la más conveniente para cada aplicación. En este trabajo investigativo se analizaron cuatro topologías, tanto en sus características técnicas, como económicas.

Es importante destacar que para todas las topologías se utilizó una fuente de tensión de entrada con un arreglo de paneles fotovoltaicos de 60 voltios, una carga monofásica RL de 5Ω y 20 mH, y el control se realizó con los siguientes parámetros: índice de modulación de 60%, ciclo de trabajo de 40% y una corriente de entrada limitada a un valor de 15 A. La simulación se la realizó en Multisim para la modelación de las componentes de potencia y Labview para el respectivo control, utilizando una cosimulación, con lo cual se asegura que los resultados obtenidos son cercanos a la realidad debido a que se utilizan los modelos Spice de los fabricantes para los componentes. Esta combinación ofrece precisión en la simulación realizada.

Luego de realizar las simulaciones y cálculos correspondientes a cada topología se obtuvieron las siguientes conclusiones:

- 1.- La topología QZSI presenta un comportamiento aceptable para una aplicación fotovoltaica residencial, debido a que los resultados permiten operar el convertidor sin dificultades técnicas para una carga residencial en base a las condiciones de diseño. Es importante destacar que según la bibliografía revisada, la principal aplicación de esta topología es para cargas bifásicas y trifásicas, en las cuales presentan eficiencias más elevadas al ser comparadas con aplicaciones monofásicas.
- 2.- La topología QSBI se presentó como una modificación de la QZSI en la cual se disminuye el número de componentes pasivas pero aumenta un IGBT que permite trabajar en rangos de voltaje más amplios en comparación con otras topologías, aunque en el caso de estudio no es un factor determinante. Esta topología aun cuando es la más económica presenta la menor eficiencia, la menor robustez debido a que no tolera variaciones en sus componentes pasivas y tiene un factor de rizado elevado lo que produce una mayor cantidad de pérdidas, motivo por el cual esta topología no es la más recomendable para aplicaciones fotovoltaicas residenciales en comparación con los otros esquemas.
- 3.- La topología SL -QZSI en comparación con la QZSI presenta un filtro inductivo a la entrada del sistema, que le permite una mayor estabilidad, controlabilidad, y requiere corrientes y potencias más elevadas a la entrada, que producen un rango de

intercambio menor, pero debido a la configuración de la topología el inversor tiene a la salida corrientes y potencias altas en comparación con las dos topologías antes estudiadas.

4.- La topología QZSI - SL es similar a la topología SL- QZSI con la variación en la ubicación del filtro inductivo que se encuentra antes del puente inversor, lo que permite tener una mayor ganancia a la salida, generando un rango de intercambio amplio, que entrega mayores potencias a la salida, por lo cual el inversor presenta la mejor eficiencia de todas las topologías estudiadas.

Considerando todos los parámetros técnicos y económicos analizadas para las diferentes topologías se obtiene que la más adecuada para la generación fotovoltaica residencial es la QZSI-SL, debido a su altas características técnicas, posee una eficiencia de 94 %, fácil controlabilidad, alta tolerancia a la variación de parámetros, ganancia elevada y un valor económico cercano a los 175.92 dólares.

4.2. Recomendaciones

Con la finalidad de corroborar el trabajo realizado se recomienda utilizar el inversor QZSI- SL en un sistema fotovoltaico residencial para comprobar su adecuado funcionamiento y evaluar la eficiencia calculada en este trabajo.

Es importante también continuar con el estudio de estos inversores aplicando otras estrategias de control, para maximizar su eficiencia y confiabilidad, porque son parte de un sistema fotovoltaico que son tecnologías que estarán en auge en el futuro, debido a que son amigables con el medio ambiente y tienden a ser rentables a medida que se reducen los costos.

A. Anexos

A.1. Anexo 1: Simulaciones Régimen Permanente QZSI

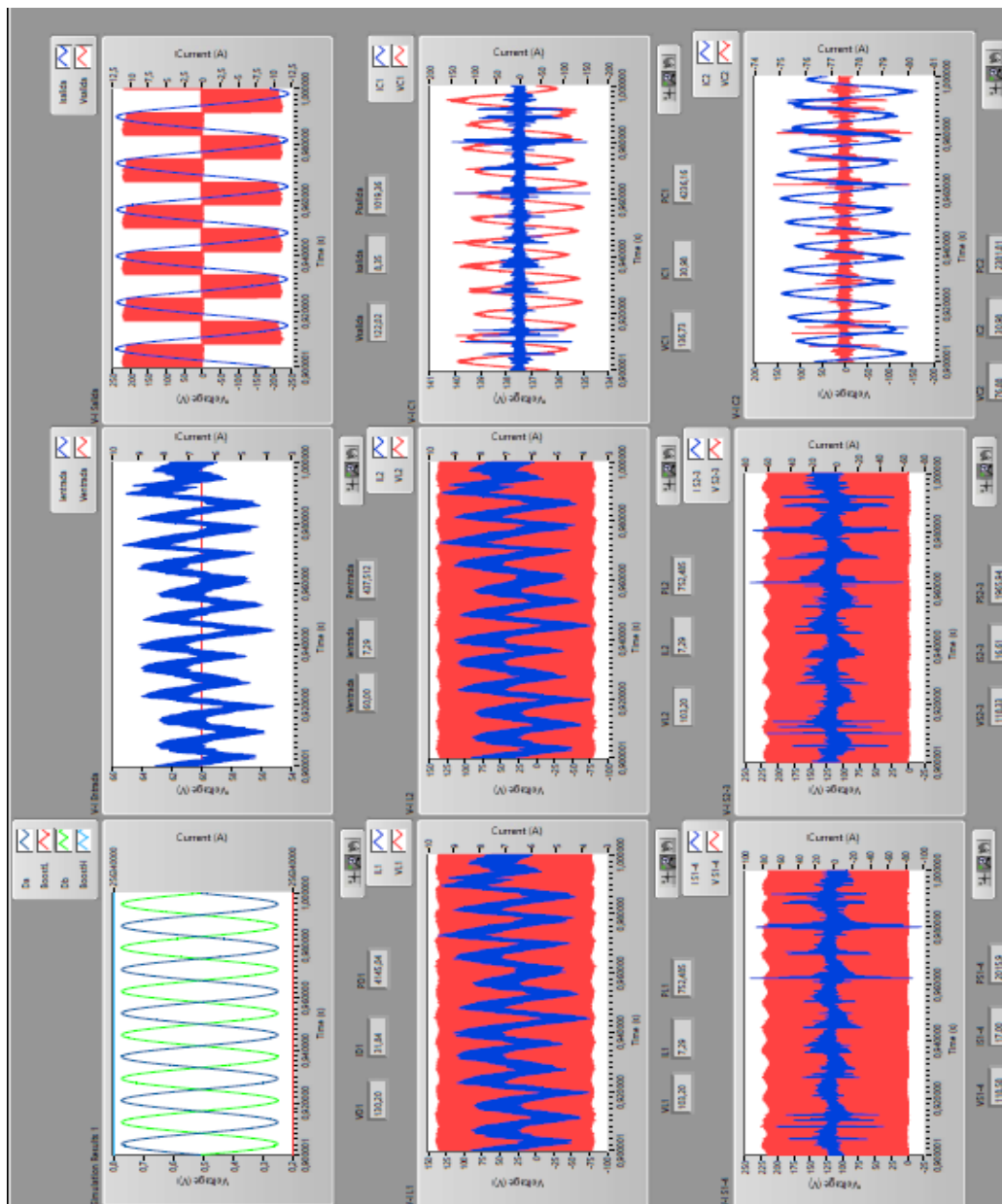


Figura A.1.: Simulaciones Régimen Permanente QZSI

A.2. Anexo 2: Simulaciones Régimen Permanente QSBI

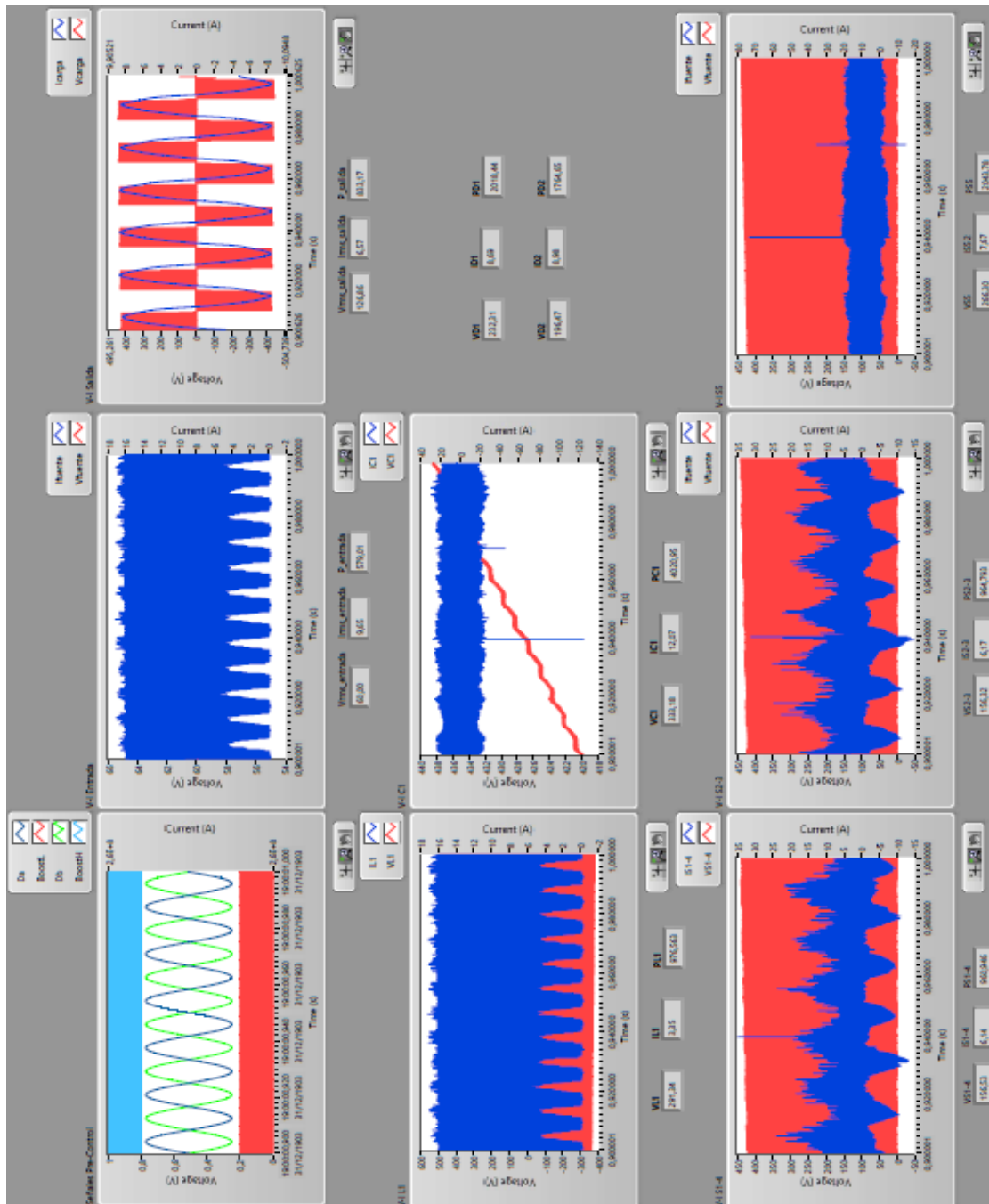


Figura A.2.: Simulaciones Régimen Permanente QSBI

A.3. Anexo 3: Simulaciones Régimen Permanente SL-QZSI

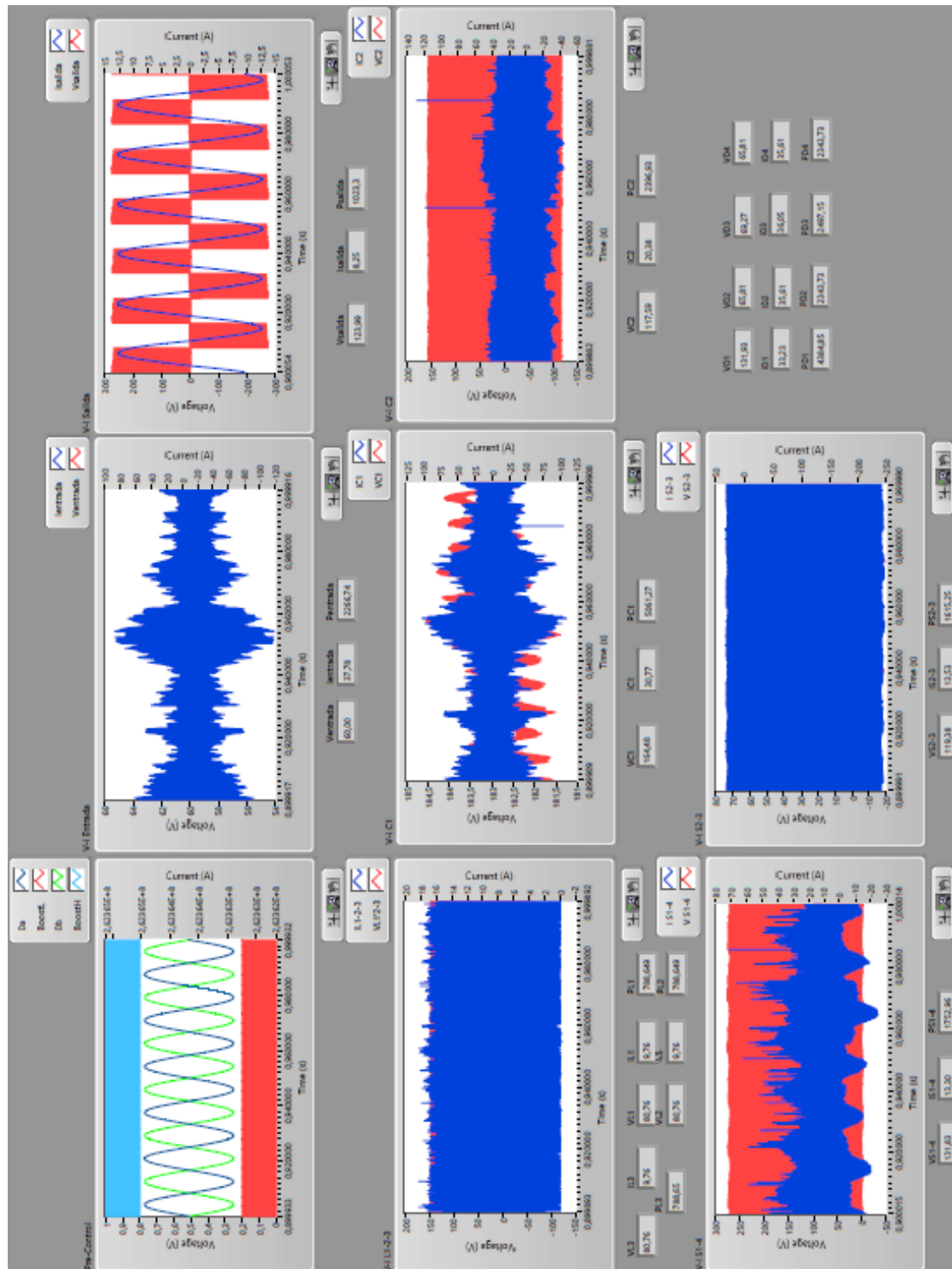


Figura A.3.: Simulaciones Régimen Permanente SL - QZSI

A.4. Anexo 4: Simulaciones Régimen Permanente QZSI - SL

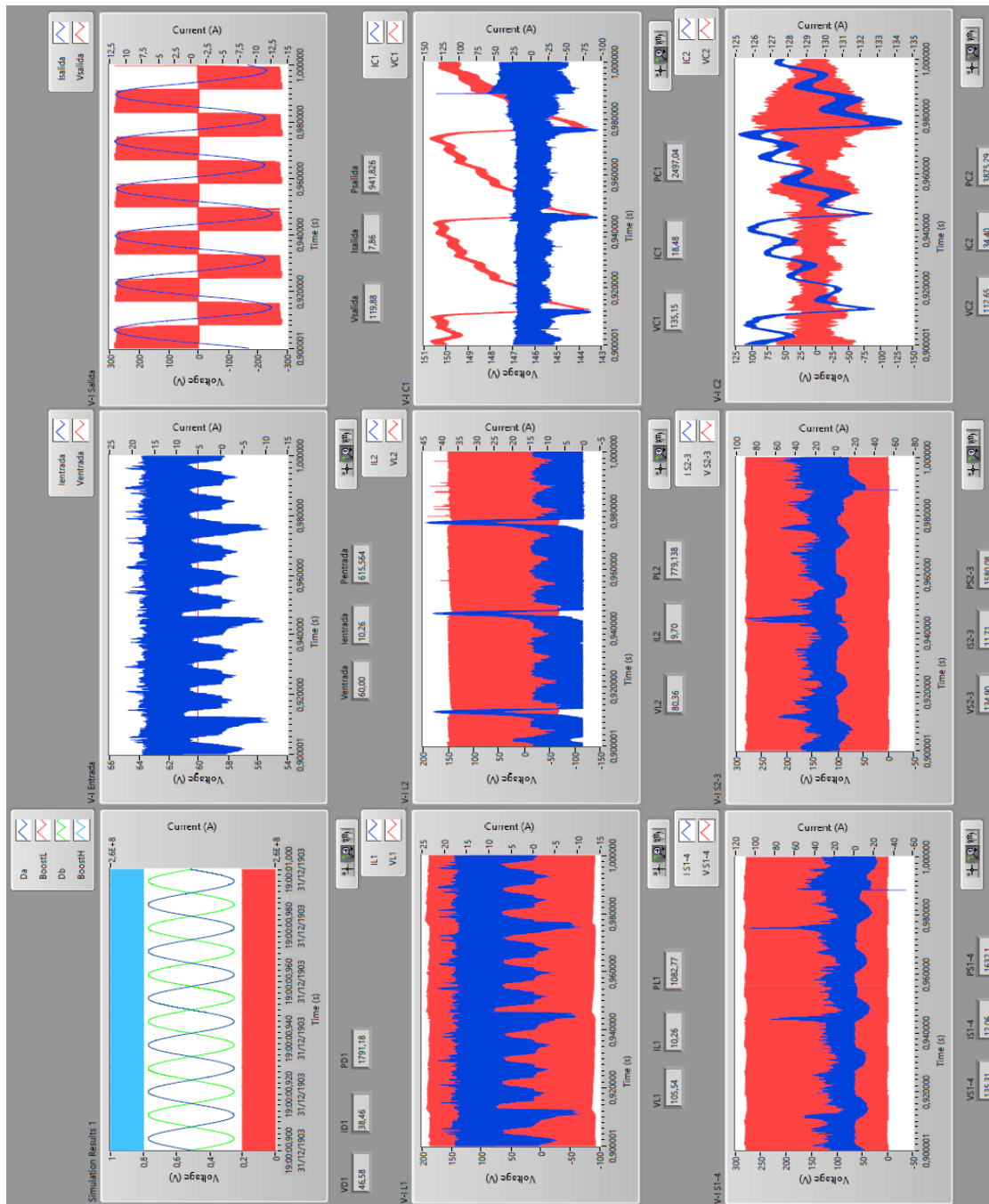


Figura A.4.: Simulaciones Régimen Permanente QZSI - SL

A.5. Anexo 5: Circuito del Control de los Inversores

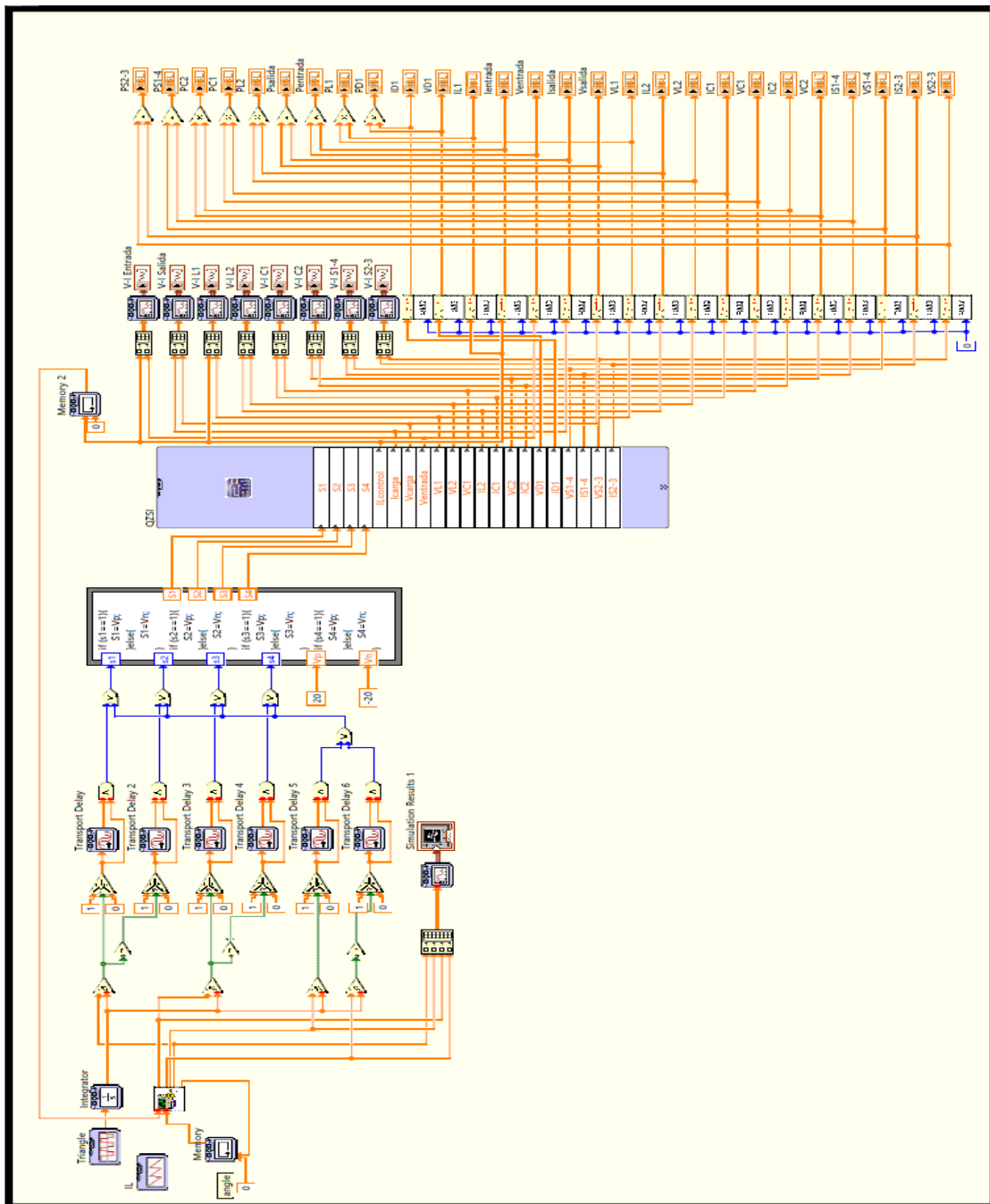


Figura A.5.: Circuito del Control de los Inversores

Bibliografía

- [1] E. Cruz Carrascal *et al.*, “Inversores en aplicaciones fotovoltaicas,” 2012.
- [2] A. Calderón, W. Vinicio, and O. M. Lema Galarza, “Simulación de un sistema fotovoltaico residencial con regulación de potencia inyectada a la red,” 2017.
- [3] M.-K. Nguyen, Y.-C. Lim, and S.-J. Park, “A comparison between single-phase quasi-z-source and quasi-switched boost inverters,” *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 62, no. 10, pp. 6336–6344, 2015.
- [4] Y. Li, J. Anderson, F. Z. Peng, and D. Liu, “Quasi-z-source inverter for photovoltaic power generation systems,” in *Applied Power Electronics Conference and Exposition, 2009. APEC 2009. Twenty-Fourth Annual IEEE*, pp. 918–924, IEEE, 2009.
- [5] J. Anderson and F. Z. Peng pp. 2743–2749, 2008.
- [6] A. Bakeer, M. A. Ismeil, M. Orabi, and R. Kennel, “Control of switched-inductor quasi z-source inverter (sl-qzsi) based on model predictive control technique (mpc),” in *Industrial Technology (ICIT), 2015 IEEE International Conference on*, pp. 2248–2253, IEEE, 2015.
- [7] A.-V. Ho and T.-W. Chun, “Topologies of active-switched quasi-z-source inverters with high-boost capability,” *Journal of Power Electronics*, vol. 16, no. 5, pp. 1716–1724, 2016.
- [8] W. Qian, F. Z. Peng, and H. Cha, “Trans-z-source inverters,” *IEEE transactions on power electronics*, vol. 26, no. 12, pp. 3453–3463, 2011.
- [9] J. C. Hernández, P. G. Bueno, and F. Sanchez-Sutil, “Enhanced utility-scale photovoltaic units with frequency support functions and dynamic grid support for transmission systems,” *IET Renewable Power Generation*, vol. 11, no. 3, pp. 361–372, 2017.
- [10] M. Cliandone, R. Campaner, A. M. Pavan, V. Arcidiacono, F. Milano, and G. Sulligoi, “Coordinated voltage control of multi-converter power plants operating in transmission systems. the case of photovoltaics,” in *Clean Electrical Power (ICCEP), 2015 International Conference on*, pp. 506–510, IEEE, 2015.
- [11] H. F. Ahmed, H. Cha, S.-H. Kim, and H.-G. Kim, “Switched-coupled-inductor quasi-z-source inverter,” *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 31, no. 2, pp. 1241–1254, 2016.
- [12] X. P. Fang, X. G. Wang, and Z. Q. Chen, “A single-phase ac power supply based on modified quasi-z-source inverter,” *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, vol. 24, no. 5, pp. 1–5, 2014.
- [13] O. Ellabban and H. Abu-Rub, “Z-source inverter: Topology improvements review,” *IEEE Industrial Electronics Magazine*, vol. 10, pp. 6–24, March 2016.

- [14] E. Formación, *Energía solar fotovoltaica*. FC Editorial, 2007.
- [15] E. Lorenzo, G. L. Araujo, and A. Cuevas, *Electricidad solar: ingeniería de los sistemas fotovoltaicos*. Progensa, 1994.
- [16] C. A. Jara Álvarez and P. E. Galarza Contreras, “Simulación y evaluación de sistemas fotovoltaicos residenciales conectados a la red eléctrica,” B.S. thesis, 2015.
- [17] D. Cervantes and O. Munoz, “Diseno de control y simulación de un sistema de generación de energía eléctrica,” 2010.
- [18] M. H. Rashid, *Electrónica de potencia: circuitos, dispositivos y aplicaciones*. Pearson Educación, 2004.
- [19] S. S. Kumar and S. Chinnaiya, “Switched inductor quasi-z-source inverter for pmsg based wind energy conversion system,” *International Journal of Emerging Trends in Electrical and Electronics (IJETEE-ISSN: 2320-9569)*, vol. 3, no. 1, pp. 41–46, 2013.
- [20] G. Camacho, D. López, J. Díaz, and C. Gaviria, “Caracterización de las técnicas de modulación pulse width modulation (pwm) aplicadas a inversores trifásicos,” *Épsilon*, no. 19, pp. 145–176, 2012.
- [21] C. A. Londoño Noreña *et al.*, “Análisis y simulación de algunas estrategias de control spwm y svpwm en corriente para un puente inversor,” B.S. thesis, Pereira: Universidad Tecnológica de Pereira, 2008.
- [22] K. V. Kumar, P. A. Michael, J. P. John, and S. S. Kumar, “Simulation and comparison of spwm and svpwm control for three phase inverter,” *ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences*, vol. 5, no. 7, pp. 61–74, 2010.
- [23] M. SIMULINK, “Using simulink,” *The Math Works Inc., Version*, vol. 4, 2000.
- [24] O. D. Londoño Ocampo, J. W. Restrepo Grisales, *et al.*, “Manual para la simulación de circuitos de corriente alterna senoidal haciendo uso del software multisim 11.0,” B.S. thesis, Pereira: Universidad Tecnológica de Pereira, 2013.
- [25] J. R. L. Vizcaíno and J. P. Sebastiá, *LabView: entorno gráfico de programación*. Marcombo, 2011.
- [26] S. Khader, A. Hadad, and A. A. Abu-Aisheh, “The application of psim & matlab/simulink in power electronics courses,” in *Global Engineering Education Conference (EDUCON), 2011 IEEE*, pp. 118–121, IEEE, 2011.
- [27] M. A. Ismeil, A. Kouzou, R. Kennel, H. Abu-Rub, and M. Orabi, “A new switched-inductor quasi-z-source inverter topology,” in *Power Electronics and Motion Control Conference (EPE/PEMC), 2012 15th International*, pp. DS3d–2, IEEE, 2012.
- [28] M.-K. Nguyen, Y.-C. Lim, and G.-B. Cho, “Switched-inductor quasi-z-source inverter,” *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 26, no. 11, pp. 3183–3191, 2011.