

**UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA  
SEDE CUENCA**

**CARRERA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA**

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

**TÍTULO:**

DISEÑO Y SIMULACIÓN DE UN EMULADOR DE RED  
ELÉCTRICA PARA APLICACIONES EN ENERGÍA SOLAR

**AUTORES:**

JUAN SANTIAGO MOROCHO GUAMÁN  
CHRISTIAN GEOVANNY ASTUDILLO ASTUDILLO

**DIRECTOR:**

ING. FLAVIO QUIZHPI

Cuenca, Mayo de 2016

# CERTIFICACIÓN

---

En Facultad de Director del proyecto técnico de investigación “Diseño y simulación de un emulador de red eléctrica para aplicaciones en energía solar ” desarrollado por los señores: Juan Santiago Morocho Guamán y Christian Geovanny Astudillo Astudillo. Certifico la aprobación del presente trabajo de graduación, una vez ejecutado la ejecución y revisión del contenido.

Cuenca, Mayo de 2016

A handwritten signature in blue ink, appearing to be 'Ing. Flavio Quizhpi', written in a cursive style.

---

Ing. Flavio Quizhpi

## DECLARACIÓN DE AUTORÍA

---

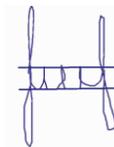
Nosotros Juan Santiago Morocho Guamán y Christian Geovanny Astudillo Astudillo autores del proyecto técnico de investigación, declaramos que el trabajo aquí presentado es de nuestra exclusiva responsabilidad y que no ha sido previamente presentado por algún grado profesional.

Por medio de esta declaración otorgamos a la Universidad Politécnica Salesiana los derechos de propiedad intelectual y autorizamos la divulgación de este documento únicamente para propósitos académicos investigativos, según lo establecido por la Ley de Propiedad Intelectual, por su reglamento y por la normativa vigente.

Cuenca, Mayo de 2016



-----  
Juan Santiago Morocho Guamán



-----  
Christian Geovanny Astudillo Astudillo

## DEDICATORIA

---

*Dedico este logro al Ser Celestial que me ha llenado de bendiciones y que gracias a su divina voluntad hoy puedo culminar una etapa importante de mi vida.*

*A las Fuerzas que me empujaron por varios años para que siempre saliera adelante, a las que de rodillas piden entre lágrimas para que todo salga bien, mami Oshita y mi mami Claudi gracias por todo. Y a mi abuelito Juan María Guamán quien se encuentra ante los ojos de Dios.*

**Santiago Morocho G.**

*Esta tesis se la dedico a mi madre por todo el esfuerzo y sacrificio para brindarme todo el amor, la comprensión, el apoyo incondicional y la confianza en cada momento de mi vida y sobre todo en mis estudios universitarios  
Agradezco la confianza y el apoyo de mis abuelitos quienes me han apoyado para poder llegar a esta instancia de mis estudios.*

*También se la dedico a mi hijo hermoso quien ha sido mi mayor motivación para nunca rendirme en los estudios y poder llegar a ser un ejemplo para él.*

**Christian Geovanny Astudillo.**

# AGRADECIMIENTOS

---

## **Santiago Morocho**

Gracias Virgen María Santísima, por estar en mi vida y taparme con tu manto desde muy pequeño y guiarme en el camino de la vida.

Gracias Mami Claudina por quererme tanto por darme todo sin pedir nada, por ser la mano que nos supo criar teniendo tantas dificultades por delante. Por escucharme aunque no entiendas de lo que hablo, por sentarte a mi lado y recostarte en mi hombro intentando comprender lo que hago, por todos los jugos inventados que llegaban tocando mi puerta cada mañana, por ser la alegría de mi alma. Agradezco a mi padre, quien tuvo que sacrificar todo por buscar lo mejor para todos sus hijos, gracias por todo lo que ha hecho.

Al Doctor Julio Viola y al ingeniero Flavio Quizhpi por brindarnos la ayuda necesaria para poder realizar este trabajo, gracias por su tiempo.

Y a mi compañero durante esta etapa de trabajo, gracias por el acole y salimos al fin.

## **Christian Geovanny Astudillo**

Agradecemos principalmente a Dios por siempre estar con nosotros, a nuestros padres por brindarnos su apoyo que fue fundamental y nos permitió nuestro desarrollo profesional, a nuestros tutores Dr. Julio Viola e Ing Flavio Quizhpi que, con sus conocimientos, experiencia, y responsabilidad nos supieron guiar de una forma desinteresada para el desarrollo y culminación de este trabajo.

# PREFACIO

---

Gracias a los incentivos por parte del gobierno para la utilización de energías renovables, se ha dado un incremento en el uso de la energía limpia generada a partir de paneles solares, aprovechando el potencial solar de nuestro país. Teniendo una alternativa para generar electricidad en nuestro medio y pensar no solo en su consumo directo, sino también en transmitir la energía sobrante en la red eléctrica, contribuyendo al desarrollo de las ciudades, generando una energía limpia que no produce gases de efecto invernadero perjudiciales para la vida en el planeta. Para ello es indispensable la presencia de los inversores, los cuales transforman la energía DC generada por los paneles en energía alterna AC, un inversor debe adaptarse a las condiciones de la red eléctrica, funcionando de manera estable ante la posible presencia de perturbaciones en la red.

En el desarrollo del presente proyecto de investigación, se encontrará cinco capítulos:

En la primera sección se recopila información sobre las instalaciones domiciliarias típicas basadas en energía fotovoltaica, fuentes de energía renovable y generación de energía renovable en el Ecuador, hasta detallar cada uno de los componentes en el sistema de generación solar fotovoltaico.

En la segunda sección el estudio de las perturbaciones más comunes presentes en la línea eléctrica, teniendo en cuenta transitorios, sobretensiones, subtensiones, armónicos, interrupciones, fluctuaciones de voltaje, variaciones de frecuencia y ruido.

La tercera sección analiza las Topologías de convertidores electrónicos de potencia, analizando las más sobresalientes como la de medio puente, puente completo, La topología de diodo anclado o NPC y Conergy NPC.

En la cuarta sección se realiza el desarrollo del emulador en MATLAB/SIMULINK y se lo divide en partes: Topología y Modulación, Etapa de Filtrado, Generación de Perturbaciones, Compensación de no Idealidades y Pruebas de funcionamiento mediante la simulación del comportamiento del emulador bajo la presencia de distintos tipos de cargas. Además se hace una breve descripción del costo de los componentes para la implementación circuital del emulador diseñado.

Las conclusiones y recomendaciones sobre el trabajo desarrollado se tratan en la última sección.

## RESUMEN

---

La necesidad de verificar el correcto funcionamiento de sistemas inversores utilizados en aplicaciones solares, conlleva a diseñar una fuente de red controlada que emule el comportamiento de la tensión de red tanto en condiciones ideales como no ideales. Este emulador puede ser usado para la realización de pruebas de funcionamiento de los algoritmos de control implementados en el inversor y desarrollarlos para que trabajen de manera estable en condiciones ideales y ante la presencia de ciertas perturbaciones.

En este trabajo se propone el desarrollo de un emulador de red eléctrica diseñado en Matlab capaz de simular la red en condiciones ideales y no ideales. El emulador utiliza convertidores de potencia basados en la topología NPC (*Neutral Point Clamped*) y los filtros para mitigar los armónicos que no sean necesarios para reproducir las perturbaciones requeridas.

La generación de perturbaciones se basa en la modificación de la señal de referencia utilizada por la modulación PWM. Este Trabajo además agrega la emulación de la resistencia y reactancia inductiva presentes en los generadores síncronos y también se realiza la compensación de tiempo muerto presente por la conmutación de los dispositivos electrónicos de potencia.

La arquitectura del emulador y las simulaciones necesarias para comprobar el funcionamiento del emulador de red bajo distintos tipos y valores de carga está realizado en MATLAB/SIMULINK.

# ABSTRACT

---

The necessity of proving the accurate functioning of inverter systems used in solar applications leads to design a controlled source grid, which will emulate the behavior of line voltage in ideal as well as non-ideal conditions. This grid emulator will be used to elaborate tests to evaluate the performance of the algorithms already implemented in the inverter, which will facilitate the development of new algorithms, if needed, to make them work effectively under ideal conditions and in the presence of certain disturbances.

Through this work, the design of an electric network emulator using Matlab/Simulink, which is capable of simulating the grid in ideal and non-ideal conditions, is proposed. The emulator utilizes power converters based on NPC (Neutral Point Clamped) topology, and filters to release the non-needed harmonic content in order to generate required disturbances and remove the unnecessary ones.

The generation of disturbances is based on the modification of the reference signal used by the modulator PWM. Furthermore, in this work the emulation of resistance and inductive reactance, which are present in synchronous generators, are added. Finally, present dead time compensation is conducted by the switching of power electronic devices.

The architecture of the grid emulator and the necessary simulations to prove it's functioning under different types and graduation loads are performed in MATLAB/SIMULINK software.

## ÍNDICE

INTRODUCCIÓN.....	1
<b>CAPITULO 1. INSTALACIONES DOMICILIARAS TÍPICAS BASADAS EN ENERGÍA FOTOVOLTAICA.....</b>	<b>3</b>
<b>1.1 FUENTES DE ENERGÍA RENOVABLES .....</b>	<b>3</b>
<b>1.2 GENERACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA EN EL ECUADOR .....</b>	<b>4</b>
1.2.1 ENERGÍA RENOVABLE Y NO RENOVABLE .....	4
1.2.2 DISTRIBUCIÓN ENERGÉTICA DE LAS FUENTES RENOVABLES.....	5
<b>1.3 ENERGÍA SOLAR.....</b>	<b>7</b>
1.3.1 PRINCIPIOS DE LA GENERACIÓN SOLAR.....	7
1.3.2 COMPONENTES EN EL SISTEMA DE GENERACIÓN SOLAR FOTOVOLTAICO. ....	8
<b>1.4 INSTALACIONES TÍPICAS DOMICILIARIAS.....</b>	<b>9</b>
<b>CAPITULO 2. PERTURBACIONES MÁS COMUNES PRESENTES EN LA LÍNEA ELÉCTRICA.....</b>	<b>11</b>
<b>2.1 TRANSITORIOS .....</b>	<b>11</b>
2.1.1 IMPULSOS.....	11
2.1.2 OSCILACIONES .....	12
<b>2.2 ARMÓNICOS .....</b>	<b>13</b>
2.2.1 INDICADORES .....	13
2.2.2 FUENTES DE ARMÓNICOS.....	14
<b>2.3 SOBRETENSIONES .....</b>	<b>17</b>
2.3.1 SOBRETENSIONES TEMPORALES .....	18
2.3.2 SOBRETENSIONES DE FRENTE LENTO .....	19
2.3.3 SOBRETENSIONES DE FRENTE RÁPIDO.....	20
2.3.4 SOBRETENSIONES DE FRENTE MUY RÁPIDO.....	20
<b>2.4 CAÍDAS DE TENSIÓN .....</b>	<b>20</b>
2.4.1 Bajada de Tensión .....	20
2.4.2 Subtensión .....	21
<b>2.5 INTERRUPCIONES .....</b>	<b>21</b>
<b>2.6 RUIDO.....</b>	<b>22</b>
<b>2.7 VARIACIONES DE FRECUENCIA.....</b>	<b>22</b>
<b>2.8 FLUCTUACIONES DE TENSIÓN .....</b>	<b>23</b>

<b>CAPITULO 3. TOPOLOGÍAS DE CONVERTIDORES ELECTRÓNICOS DE POTENCIA.....</b>	<b>24</b>
<b>3.1 Topologías .....</b>	<b>24</b>
3.1.1 TOPOLOGÍA DE MEDIO PUENTE (MONOFÁSICO) .....	25
3.1.2 TOPOLOGÍA DE PUENTE COMPLETO (MONOFÁSICO).....	26
3.1.3 TOPOLOGÍA DIODE-CLAMPED O NEUTRAL-POINT-CLAMPED (NPC)	
27	
3.1.4 TOPOLOGÍA CONERGY NPC .....	28
<b>CAPITULO 4. SIMULACIÓN DEL SISTEMA Y VALIDACIÓN DE RESULTADOS .....</b>	<b>30</b>
<b>4.1 TOPOLOGÍAS Y MODULACIÓN .....</b>	<b>30</b>
4.1.1 TOPOLOGÍA DE PUENTE COMPLETO Y SU MODULACIÓN. ....	31
4.1.2 TOPOLOGÍA NPC (Neutral Point Clamped) Y SU MODULACIÓN.....	34
4.1.3 TOPOLOGÍA CONERGY NPC .....	37
<b>4.2 FILTRADO .....</b>	<b>39</b>
4.2.1 ETAPA 1 - FILTRO LCL .....	39
4.2.2 FILTRO RLC Serie - Pasa Banda.....	47
<b>4.3 GENERACIÓN DE PERTURBACIONES. ....</b>	<b>52</b>
<b>4.4 COMPENSACIÓN DE NO IDEALIDADES .....</b>	<b>57</b>
<b>4.5 SIMULACIONES DEL COMPORTAMIENTO DEL EMULADOR CON VARIACIÓN DE CARGA. ....</b>	<b>59</b>
<b>4.6 ESTIMACIÓN DE COSTOS DE IMPLEMENTACIÓN. ....</b>	<b>63</b>
<b>CAPITULO 5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....</b>	<b>67</b>
<b>REFERENCIAS.....</b>	<b>69</b>
<b>ANEXOS.....</b>	<b>72</b>

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1	Diagrama de la Capacidad Efectiva de Generación Renovable.....	4
Figura 1.2	Diagrama de la Capacidad Efectiva de Generación No Renovable .....	5
Figura 1.3	Componentes de una instalación fotovoltaica.....	8
Figura 2.1	Impulso Transitorio Unidireccional, $t < 2\text{ms}$ . .....	12
Figura 2.2	Oscilación Transitoria Bidireccional. ....	12
Figura 2.3	Distorsión provocada por la tercera armónica a la onda de la red. ....	13
Figura 2.4	a) Corriente absorbida por lámpara fluorescente, b) Espectro armónico de (a).....	14
Figura 2.5	a) Corriente absorbida por rectificador con filtro inductivo, b) Espectro armónico de (a). ....	15
Figura 2.6	a) Corriente absorbida por rectificador con filtro capacitivo, b) Espectro armónico de (a). ....	15
Figura 2.7	Corriente magnetizada de un transformador.....	16
Figura 2.8	Corriente magnetizada de un transformador. ....	17
Figura 2.9	Resonancia en Paralelo a) Diagrama Unifilar b)Diagrama F-N para armónicos.....	17
Figura 2.10	Resonancia en Serie a) Diagrama Unifilar b)Diagrama F-N para armónicos.....	17
Figura 2.11	Cortocircuito Fase-Tierra en una Red con neutro aislado. ....	18
Figura 2.12	Diagrama de Desconexión repentina de una carga. ....	19
Figura 2.13	Sobretensión resultante de la desconexión de la carga . ....	19
Figura 2.14	Bajada de Tensión resultante de la conexión de la carga. ....	21
Figura 2.15	Subtensión en la red eléctrica. ....	21
Figura 2.16	Interrupción de la Tensión en una red eléctrica. ....	22
Figura 2.17	Ruido presente en una red eléctrica. ....	22
Figura 2.18	Variaciones de Frecuencia en la red eléctrica. ....	23
Figura 2.19	Fluctuaciones de Tensión en la red eléctrica. ....	23
Figura 3.1	Diagrama esquemático del inversor de medio puente H.....	25
Figura 3.2	Forma de onda de entrada y salida del medio puente. ....	25
Figura 3.3	Diagrama esquemático del inversor monofásico de puente completo. ....	26
Figura 3.4	Forma de onda de salida del puente H. ....	26
Figura 3.5	Diagrama esquemático del inversor NPC. ....	27
Figura 3.6	Diagrama esquemático del inversor conergy NPC. ....	28

Figura 4.1	Señal de Referencia Seno 60 Hz y Señal Portadora de 2kHz .....	31
Figura 4.2	Modulación PWM: (a) Semiciclo Positivo (b) Semiciclo Negativo .....	31
Figura 4.3	Diagrama de la Topología Puente Completo y modulación aplicada, realizado en Matlab/Simulink. ....	32
Figura 4.4	Modulación PWM ocupada por la Topología Puente Completo. ....	33
Figura 4.5	Corriente, Voltaje y Valor medio obtenidos a la salida del Inversor de Puente Completo. ....	33
Figura 4.6	Diagrama de la Topología NPC y modulación aplicada, realizado en Matlab/Simulink. ....	34
Figura 4.7	PWM utilizada en la Topología NPC. ....	35
Figura 4.8	Corriente, Voltaje y Valor medio obtenidos a la salida del Inversor NPC. ....	36
Figura 4.9	Diagrama de la Topología Conergy NPC y modulación aplicada, realizado en Matlab/Simulink. ....	37
Figura 4.10	Modulación PWM ocupada por la Topología Conergy NPC. ....	38
Figura 4.11	Corriente, Voltaje y Valor medio de la tensión obtenidos a la salida del Inversor Conergy NPC. ....	39
Figura 4.12	Esquema del Filtro LCL .....	40
Figura 4.13	Diagrama de Bode del Filtro LCL con Resistencias. ....	44
Figura 4.14	Diagrama de Bode del Filtro LCL con Resistencias. ....	44
Figura 4.15	Esquema del inversor con la primera etapa de filtrado, desarrollado y simulado en SIMULINK. ....	45
Figura 4.16	Voltaje de Salida del Inversor al aplicar una etapa de filtrado. ....	46
Figura 4.17	Cargas utilizadas para observar el comportamiento del voltaje de salida al aplicar un filtro LCL. ....	46
Figura 4.18	Comportamiento del voltaje y corriente de salida agregando el filtro LCL con cargas: (a) Resistencia de $0.1\Omega$ , (b) Carga RL paralelo $(7.9 + j20.9)\Omega$ y (c) Rectificador con una R de $10\Omega$ . ....	47
Figura 4.19	Esquema del Filtro RLC. ....	48
Figura 4.20	Diagrama de Bode del Filtro RLC. ....	49
Figura 4.21	Esquema del Inversor con las dos etapas de filtrado, desarrollado y simulado en SIMULINK. ....	50
Figura 4.22	Voltaje de Salida del Inversor al aplicar las dos etapas de filtrado. ....	51
Figura 4.23	Comportamiento del voltaje y corriente de salida agregando los filtros LCL y RLC con cargas: (a) Resistencia de $0.1\Omega$ , (b) Carga RL paralelo $(7.9 + j20.9)\Omega$ y (c) Rectificador con una R de $10\Omega$ . ....	52

Figura 4.24	Esquema de la adición de las perturbaciones, desarrollado y simulado en SIMULINK. ....	53
Figura 4.25	Simulación del voltaje de salida afectado por Transitorios.....	54
Figura 4.26	Simulación del voltaje de salida afectado por una variación de frecuencia y una interrupción.....	55
Figura 4.27	Simulación del voltaje de salida afectado por una Sobretensión.....	55
Figura 4.28	Simulación del voltaje de salida afectado por una Subtensión.....	56
Figura 4.29	Simulación del voltaje de salida afectado por Armónicos y Ruido.....	56
Figura 4.30	Simulación del voltaje de salida afectado por una fluctuación de voltaje. ....	57
Figura 4.31	Emulación de Resistencia y Reactancia Inductiva del Generador: Azul - sin considerar y Amarillo - considerando estos parámetros. ....	58
Figura 4.32	Emulación del Tiempo Muerto: Azul - Compensado y Amarillo - sin compensar.....	59
Figura 4.33	Simulación del Voltaje de Salida de emulador con Transitorios: Azul - Carga R 10Ω, Verde – Carga RL Paralelo (7.9+ j20.9)Ω y, Amarillo – Carga Rectificador con R100Ω.....	60
Figura 4.34	Simulación del Voltaje de Salida de emulador con Sobretensión: Azul - Carga R 10Ω, Verde – Carga RL Paralelo (7.9+ j20.9)Ω y, Amarillo – Carga Rectificador con R100Ω.....	60
Figura 4.35	Simulación del Voltaje de Salida de emulador con Subtensión: Azul - Carga R 10Ω, Verde – Carga RL Paralelo (7.9+ j20.9)Ω y, Amarillo – Carga Rectificador con R100Ω.....	61
Figura 4.36	Simulación del Voltaje de Salida de emulador con Fluctuación de Voltaje: Azul - Carga R 10Ω, Verde – Carga RL Paralelo (7.9+ j20.9)Ω y, Amarillo – Carga Rectificador con R100Ω. ....	61
Figura 4.37	Simulación del Voltaje de Salida de emulador con Armónicos y Ruido: Azul - Carga R 10Ω, Verde – Carga RL Paralelo (7.9+ j20.9)Ω y, Amarillo – Carga Rectificador con R100Ω. ....	62
Figura 4.38	Simulación del Voltaje de Salida de emulador con Variación de Frecuencia e Interrupción: Azul - Carga R 10Ω, Verde – Carga RL Paralelo (7.9+ j20.9) Ω y, Amarillo – Carga Rectificador con R100Ω. ....	62
Figura 4.39	Costos de MOSFET N y Tarjeta de Control. ....	63
Figura 4.40	Costos de Componentes Pasivos de la etapa de Potencia.....	64

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.1	Capacidad Efectiva de Generación Renovable .....	4
Tabla 1.2	Capacidad Efectiva de Generación No Renovable .....	5
Tabla 1.3	Datos de la Insolación Solar cada meses en el Ecuador .....	6
Tabla 4.1	Estados de los Interruptores para la obtención de Voltaje de Salida en la Topología de Puente Completo. ....	32
Tabla 4.2	Estados de los Interruptores para la obtención de Voltaje de Salida en la Topología NPC. ....	35
Tabla 4.3	Estados de los Interruptores para la obtención de Voltaje de Salida en la Topología Conergy NPC.....	38
Tabla 4.4	Características de lo componentes necesarios para la implementación circuital. ....	65
Tabla 4.5	Precio de lo componentes necesarios para la implementación circuital. ....	65

# INTRODUCCIÓN

## I. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

En la actualidad son cada vez más comunes las instalaciones domiciliarias que hacen uso de la energía eléctrica obtenida a través de paneles solares, la cual es convertida en energía alterna por medio de un inversor que alimenta las cargas del usuario y que eventualmente puede inyectar la energía sobrante hacia la línea eléctrica.

Los algoritmos de control implementados en los inversores deben ser diseñados para funcionar establemente aun cuando aparezcan transitorios o condiciones irregulares en la tensión presente en la línea eléctrica. Reproducir en laboratorio de manera programada las distintas anomalías que pudiera presentar la tensión de línea resulta de gran ayuda para mejorar los algoritmos de control desarrollados para el inversor solar y resulta entonces de gran utilidad poder contar con un sistema capaz de emular eléctricamente estos fenómenos.

## II. JUSTIFICACIÓN

Dentro de las actividades regularmente desarrolladas en el Grupo de Investigación en Energías está el diseño, desarrollo y prueba de inversores destinados a aplicaciones solares domiciliarias. La investigación que se desarrollará en el presente trabajo constituye la primera fase de un proyecto más amplio que incluye a futuro la construcción física del emulador para poder ser utilizado en las pruebas. Se requiere en consecuencia la simulación integral y detallada del sistema de emulación, tema en el cual se centra el presente trabajo.

## III. ALCANCE

En el presente proyecto se realizará el diseño y simulación de un emulador para red eléctrica domiciliaria. El modelo final entregado incluirá el sistema funcionando en SIMULINK así como el dimensionamiento de los componentes electrónicos requeridos para su futura implementación circuital.

Además se realizará un estudio económico de los costos aproximados requeridos para la posterior implementación. De esta manera el proyecto es solo el paso inicial del cual depende la posible implementación circuital de una fuente de energía

alterna controlada, para usos de simulación en laboratorio con la finalidad de determinar el comportamiento de inversores usados en proyectos de energía solar. Sin embargo este proyecto no está solo restringido a este caso en particular, ya que puede ser usado también para analizar el comportamiento de anomalías en la red y estudiar los efectos que éstas puedan tener en diferentes tipos de carga.

#### **IV. OBJETIVOS**

##### **OBJETIVO GENERAL**

Diseñar, implementar y validar el funcionamiento mediante simulación de una fuente de tensión alterna capaz de emular en tiempo real el comportamiento de la línea eléctrica domiciliaria tanto en condiciones normales como ante la presencia de perturbaciones típicas.

##### **OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

- Analizar la topología adecuada para la realización de la fuente emulada controlada.
- Estudiar y analizar las distintas anomalías originadas en la línea eléctrica.
- Estudiar y analizar los componentes electrónicos de potencia idóneos para la realización del emulador en condiciones normales y anormales en MATLAB/SIMULINK.
- Realizar un estudio económico de la implementación circuital del emulador.

# **CAPITULO 1. INSTALACIONES DOMICILIARAS TÍPICAS BASADAS EN ENERGÍA FOTOVOLTAICA.**

## **1.1 FUENTES DE ENERGÍA RENOVABLES**

A lo largo de la historia el hombre ha logrado usar la energía contenida en los combustibles fósiles (el carbón, gas natural, el petróleo) y desde mediados del siglo XX el desarrollo tecnológico ha permitido la generación de energía mediante reacciones atómicas, permitiendo lograr un continuo avance industrial y tecnológico con la finalidad de aumentar la calidad de vida de las personas. En la actualidad muchos de los sistemas energéticos alrededor del mundo están contruidos en base al consumo de estos recursos y debido al problema ambiental que estos representan, es necesario buscar o mejorar los sistemas de generación basados en fuentes renovables.

El consumo energético se ha elevado de manera preocupante en los últimos años, es por esta razón que se vuelve obligatorio el correcto uso de la energía, tanto en la etapa de generación, en la transmisión, como en el rendimiento de los dispositivos conectados a la red y en el consumo responsable de la energía disponible. Todo con el fin de generar el menor impacto ambiental posible sin dejar de satisfacer las necesidades energéticas.

El sol es la mayor fuente de energía disponible sobre la superficie terrestre, la energía suministrada es de alrededor de 178 000 TW año, donde el 50% es convertida en calor, el 30% es reflejada hacia el espacio y el otro 20% restante permite la generación energética de manera directa o indirecta [1]. En este 20% está involucrada la generación solar fotovoltaica, construida a base de células fotovoltaicas que generan electricidad cuando fotones provenientes de los rayos solares inciden sobre ellas.

Esta tecnología está desarrollándose rápidamente, tanto así, que en el 2011 los sistemas de generación energía eléctrica solar en todo el mundo produjeron alrededor de 85 TW hora logrando suministrar electricidad alrededor de 100 millones de personas y convirtiéndose en la tercera energía renovable más importante [2].

## 1.2 GENERACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA EN EL ECUADOR

### 1.2.1 ENERGÍA RENOVABLE Y NO RENOVABLE

En el Ecuador la capacidad efectiva en generación eléctrica está distribuida casi de manera equitativa entre fuentes de energía renovable y no renovable, representando el 43,32% y el 56,68% respectivamente [3].

El 43,32% equivale a una capacidad de generación de 2.604,72MW y está comprendido entre la generación hidroeléctrica, eólica, fotovoltaica y térmica turbo vapor (Biomasa), como se detalla en la Tabla 1.1 y en la Figura 1.1.

Capacidad Efectiva de Generación	MW	%
Hidráulica	2.412,86	40,13%
Eólica	21,15	0,35%
Fotovoltaica	26,41	0,44%
Térmica Turbovapor	144,30	2,40%
<b>Total de Energía Renovable</b>	<b>2.604,72</b>	<b>43,32%</b>

Tabla 1.1 Capacidad Efectiva de Generación Renovable  
Fuente: CONELEC, Información Estadística Enero 2016

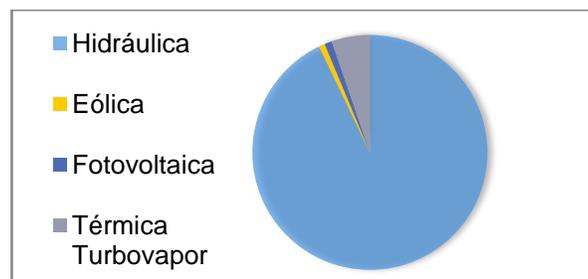


Figura 1.1 Diagrama de la Capacidad Efectiva de Generación Renovable  
Fuente: CONELEC, Información Estadística Enero 2016

El 56,68% restante es generado por centrales de generación térmica y equivale a una capacidad de 3.407,83MW, según se muestra en la Tabla 1.2 y en la Figura 1.2. Además el país dispone de interconexiones con Colombia y Perú, con una capacidad de hasta 650MW.

Capacidad Efectiva de Generación	MW	%
Térmica MCI	1.863,26	30,99%
Térmica Turbogas	1.086,19	18,07%
Térmica Turbovapor	458,24	7,62%
<b>Total de Energía No Renovable</b>	<b>3.407,83</b>	<b>56,68%</b>

Tabla 1.2 Capacidad Efectiva de Generación No Renovable  
Fuente: CONELEC, Información Estadística Enero 2016

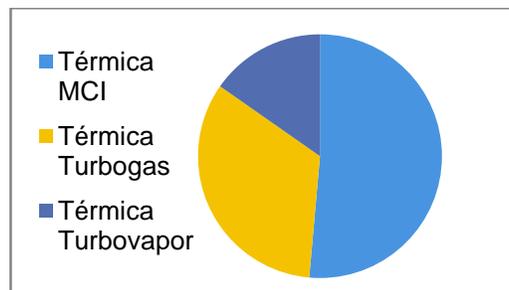


Figura 1.2 Diagrama de la Capacidad Efectiva de Generación No Renovable  
Fuente: CONELEC, Información Estadística Enero 2016

## 1.2.2 DISTRIBUCIÓN ENERGÉTICA DE LAS FUENTES RENOVABLES

La distribución de la energía con fuentes renovables está ampliamente dominada por la generación hidroeléctrica debido a la disponibilidad de fuentes hídricas en el territorio ecuatoriano.

El estado ecuatoriano ha apostado por este tipo de generación para el abastecimiento y exportación del suministro eléctrico promoviendo varios proyectos hidroeléctricos entre los más importantes tenemos: Coca Codo Sinclair con una capacidad de 1500MW y la Sopladora con una capacidad de 487MW de generación.

En la generación eólica se dispone del proyecto Villonaco ubicado en la ciudad de Loja con una capacidad de generación de 16,5MW el cual se encuentra operando desde el 2 de enero del 2013.

Con respecto a la generación fotovoltaica, el estado ecuatoriano consta de sistemas de generación como el de Los Bajos con una capacidad de generación de 30MW, el cual forma parte del proyecto de generación fotovoltaico ENERGÍA SOLAR S.A [3]. La mayoría de este tipo de instalaciones han sido optadas por la falta de suministro eléctrico en zonas alejadas, sin embargo el estado ha visto conveniente avanzar un poco más en este tipo de generación, por ello ha puesto en práctica el proyecto “Atlas Solar de Ecuador con fines de generación eléctrica” [1] donde se dispone de mapas de insolación difusa, directa y global. La Tabla 1.3 muestra el nivel de insolación durante los meses de año. Estos datos permiten tener una idea de la cantidad de radiación que incide sobre la superficie y siendo esta información necesaria para realizar proyectos de generación fotovoltaica solar.

	Insolación Global Wh/m2/Día		
	Mínima	Promedio	Máxima
Enero	3089	4411,18	5523
Febrero	3315	4480,31	5817
Marzo	3572	4655,19	5855
Abril	3188	4360,2	5421
Mayo	3288	4276,06	5213
Junio	3107	4140,23	5474
Julio	3216	4308,48	5842
Agosto	3117	4624,62	6254
Septiembre	3835	4974,44	6492
Octubre	3748	4888,34	6323
Noviembre	4059	4943,48	6484
Diciembre	3537	4837,51	6089

Tabla 1.3 Datos de la Insolación Solar para cada mes en el Ecuador  
Fuente: CONELEC, Atlas Solar de Ecuador con fines de generación eléctrica

## 1.3 ENERGÍA SOLAR

### 1.3.1 PRINCIPIOS DE LA GENERACIÓN SOLAR

Hay muchas maneras de aprovechar el calor que nos brinda el sol, pero podemos clasificarlas en dos métodos de obtención, método indirecto y método directo.

- **Métodos Directos:** Dividida en generación térmica y no térmica.
  - La generación térmica utiliza el calor para calentar fluidos haciendo el uso del vapor para la generación de energía eléctrica en los bornes de un alternador, la temperatura con la que se calientan los fluidos están el rango de los 400°C a 1000°C. Los 3 sistemas más utilizados para la captación de la radiación según [5] son: Concentradores cilíndricos/parabólicos, sistemas de torre o con receptor central (helióstatos) y discos parabólicos. En este mismo campo también se tiene a la energía generada a través de la diferencia de temperatura encontradas a distintas profundidades en el océano, por medio de un alternador con características especiales, donde la diferencia de temperatura adecuada para la generación es de 20°C [6].
  - La generación no térmica se constituye por dos campos: El primero es la generación de energía por medio de la combustión de biomasa, según [7] para el año 2050 la energía calorífica obtenida por este medio estará entre 100 y 400 EJ año. El segundo campo de generación directa no térmico y sobre el cual se desarrolla este trabajo es el de origen fotovoltaico, el cual transforma la radiación obtenida en energía eléctrica por medio de paneles fotovoltaicos.
- **Métodos Indirectos:** La diferencia de temperaturas en la superficie terrestre dependiendo de su altitud produce una variación en la temperatura del aire, lo que genera un flujo de aire al que se le conoce como viento. El aerogenerador es el encargado en transformar el flujo de aire en energía eléctrica por medio de un alternador, esta generación

depende de dos factores: la velocidad del viento y la potencia del aerogenerador [4].

### 1.3.2 COMPONENTES EN EL SISTEMA DE GENERACIÓN SOLAR FOTOVOLTAICO.

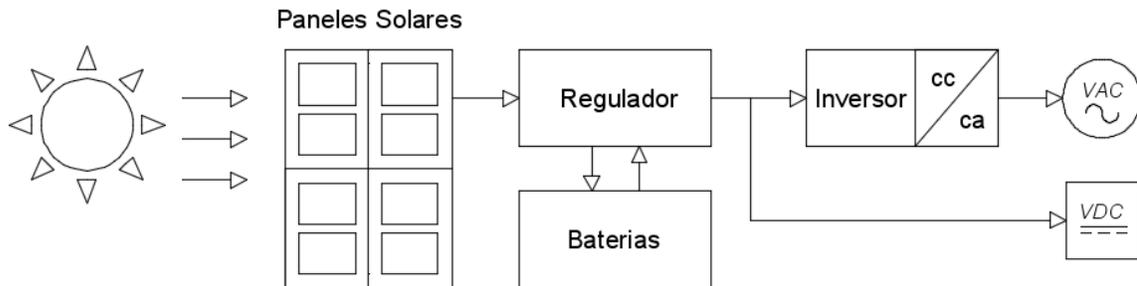


Figura 1.3 Componentes de una instalación fotovoltaica  
Fuente: Autores

#### a) Paneles Solares

También conocidas como células fotovoltaicas, su objetivo principal es captar los fotones provenientes de la radiación emitida por el sol y transformarlos en energía eléctrica. Las células están compuestas generalmente por la unión de materiales semiconductores como el silicio, agrupándose en serie o paralelo para la obtención del nivel de tensión e intensidad deseados. El comportamiento de las curvas de tensión y corriente se puede consultar en [4]. Para un óptimo aprovechamiento de la radiación captada es conveniente que el panel solar tenga algún tipo de controlador que le permita extraer la máxima potencia disponible ante distintas condiciones.

#### b) Regulador de carga

Sirve principalmente como protección para evitar sobrecargas y descargas fuera del rango normal de la batería, evitando así su desgaste y daño. Hay que tener en cuenta que el nivel de tensión de los paneles solares debe ser mayor al voltaje nominal de las baterías [8]. El regulador debe ser capaz de brindar información sobre el estado de carga de las baterías y de realizar el control del flujo de energía.

**c) Baterías**

Es la parte encargada de la acumulación de energía generada a través de los paneles solares. Compuestos de elementos químicos como el plomo, el níquel, el cadmio, el ácido, entre otros. Una de sus aplicaciones es el dar una corriente extra en el momento de arranque de motores [8], además de servir como apoyo cuando no haya energía generada por los paneles.

**d) Inversor**

El inversor es el sistema que transforma la energía continua en alterna para ser consumida o inyectada a la red. Es una de las partes más críticas ya que involucra dispositivos electrónicos de potencia controlados por PWM. La conmutación de estos dispositivos generan armónicos los cuales deben ser filtrados para obtener una tensión de salida dentro de los márgenes establecidos.

## **1.4 INSTALACIONES TÍPICAS DOMICILIARIAS**

En la actualidad sectores alejados que no constan con el servicio eléctrico por parte de empresas distribuidoras han optado por la utilización de paneles solares para la generación de energía eléctrica. Sectores como las Telecomunicaciones también se han visto beneficiados ya que pueden alimentar elementos como las repetidoras que por lo general se encuentran en lugares de difícil acceso y alejados de zonas pobladas.

En los últimos años sectores que generan energía eléctrica en centrales solares y granjas solares han optado por la venta de este bien energético a empresas distribuidoras de energía cuando estas no pueden cumplir con la demanda existente.

### **1.1.1 MONTAJE DE INSTALACIONES SOLARES FOTOVOLTAICAS**

Para la realización de una correcta instalación de un sistema de generación solar por medio de paneles solares se deben tener en cuenta parámetros como: la ubicación y orientación del panel, ubicación y conexión de baterías, la conexión a tierra, y la conexión del inversor y otros elementos.

- a) **Paneles Solares:** Deben ser fijados en estructuras sólidas, que permitan al panel recibir la mayor cantidad de radiación solar posible. Es recomendable que en el momento de la conexión del panel con el regulador, primero se debe conectar el polo negativo y luego el polo positivo [9].
- b) **Baterías:** Debido a que la batería está compuesta de elementos químicos y desprenden gases nocivos, es necesario que su instalación se haga en algún lugar alejado del usuario y de cualquier equipo eléctrico. Las baterías deben estar constantemente siendo ventiladas en un cuarto donde no lleguen los rayos del sol [9], ya que la temperatura de trabajo ideal para la batería esta entre los 15°C y 35°C [8]. Para su conexión hay que tener en cuenta la polaridad de las mismas ya que estas trabajan con corriente continua.
- c) **Inversores:** Suelen estar ubicados cerca de las baterías, teniendo en cuenta una distancia de seguridad mínima debido a las características nocivas de las mismas. Al igual que las baterías es recomendable que se encuentren en ambientes ventilados, debido a que están constituidos por dispositivos de potencia.
- d) **Conexión a Tierra:** Todo sistema debe poseer una conexión de puesta tierra que asegure la protección de las personas frente a contactos directos o indirectos [8].

## **CAPITULO 2. PERTURBACIONES MÁS COMUNES PRESENTES EN LA LÍNEA ELÉCTRICA**

En la transmisión de energía eléctrica desde las empresas distribuidoras hacia los distintos abonados, las características más importantes del servicio es la continuidad y la calidad del suministro energético, características que dependen de: la empresa distribuidora, los medios involucrados en la transmisión y los abonados consumidores.

Dicho esto, es posible tener distintos tipos de perturbaciones que afectan el servicio eléctrico. Perturbaciones que pueden ser generadas en la empresa distribuidora en su centro de transformación, en la red de transmisión por la presencia de cortocircuitos o fenómenos atmosféricos, y en la alimentación de los abonados debido a la conexión de diferentes tipos de cargas a la red. Todas estas perturbaciones afectan la forma de onda de la tensión y corriente provocando anomalías en la red eléctrica y en consecuencia un mal funcionamiento de los equipos conectados a la misma.

A continuación presentaremos algunas de las perturbaciones más comunes en la red, intentando abordar los aspectos más importantes de las mismas.

### **2.1 TRANSITORIOS**

Son perturbaciones que ocurren de manera repentina afectando a la señal de tensión y/o corriente de la red de alimentación, se caracterizan por ser de corta duración y se las estudia en dos grupos: Impulsos y Oscilaciones [10].

#### **2.1.1 IMPULSOS**

De duración no superior a los 6ms, se caracterizan por producir de manera repentina elevaciones unidireccionales (positivas) en la tensión alcanzando picos muy superiores al valor de cresta.

Su origen está ligado a descargas atmosféricas y a maniobras en las líneas de transmisión, siendo los primeros generadores de problemas con mayor impacto sobre todo en los convertidores CA/CA y CA/CC de los cuales

hablaremos en el siguiente capítulo. La Figura 2.1 muestra un transitorio impulsivo de duración inferior a 2 ms.

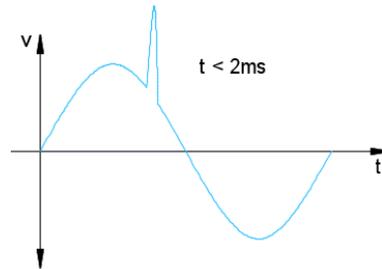


Figura 2.1 Impulso Transitorio Unidireccional,  $t < 2\text{ms}$ .  
Fuente: [10] Dibujo: Autores

### 2.1.2 OSCILACIONES

De la misma manera que los transitorios impulsivos son de corta duración pero con la diferencia de que producen variaciones bidireccionales (positiva o negativa). Es como tener una oscilación de la onda principal durante un breve tiempo, y se producen por la conexión y conmutación de bancos de condensadores, conmutación de transformadores y por efectos de resonancia.

Generan efectos dañinos como la degradación de los conductores, aislantes, equipos electrónicos de potencia y equipos informáticos en general.

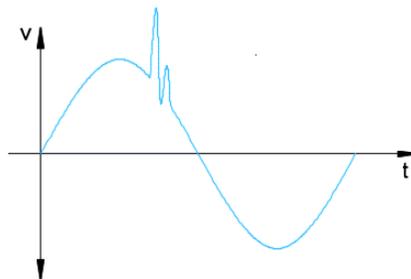


Figura 2.2 Oscilación Transitoria Bidireccional.  
Fuente: [11] Dibujo: Autores

## 2.2 ARMÓNICOS

A la red eléctrica se le siguen conectando cargas no lineales empleadas en procesos industriales o en el sector residencial como soldadores, hornos de arco, hornos de inducción, bancos de condensadores, lámparas fluorescentes, entre otros. Estas cargas provocan la aparición de armónicos en la onda de corriente no necesariamente presentes en la onda de tensión original. El resultado final es la distorsión de la onda de tensión.

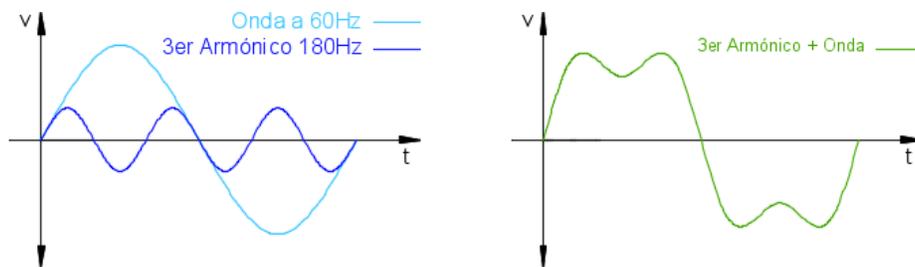


Figura 2.3 Distorsión provocada por la tercera armónica a la onda de la red.  
Fuente y Dibujo: Autores

La generación de armónicos no es responsabilidad exclusiva de los clientes ya que también se lo hace en las empresas distribuidoras debido a que trabajan con sistemas no lineales como los transformadores e incluso la propia red eléctrica la cual contiene elementos conformados por bobinas que actúan como cargas no lineales al momento de la saturación de los núcleos ferromagnéticos.

Lo que sucede en este tipo de cargas es que al alimentarlas con una onda de tensión sinusoidal la corriente que circula por ellas es no sinusoidal. Si las cargas contienen, además, componentes electrónicos (tiristores en los rectificadores) que solo demandan corriente cuando la onda de voltaje es positiva, estas corrientes no sinusoidales al circular por las impedancias de la red provoca que las caídas de tensión también sean ondas no sinusoidales.

### 2.2.1 INDICADORES

Existen indicadores que nos permiten cuantificar y analizar las distorsiones armónicas para la posterior toma de decisiones, entre los más importantes tenemos:

Fp: El factor de potencia que es la relación entre la potencia activa y la potencia aparente. Se presentan armónicos cuando el valor de éste factor sea inferior a la frecuencia fundamental.

Fc: El factor de cresta que es la relación entre los valores de cresta del voltaje o corriente respecto a los valores eficaces de los mismos (la relación normal entre estos valores es  $\sqrt{2}$ ), un factor elevado (1,2,...5) indica sobretensiones puntuales.

PD: La potencia de distorsión que es la potencia extra generada por los armónicos.

## 2.2.2 FUENTES DE ARMÓNICOS

Los armónicos se caracterizan por generar una distorsión de la forma onda de corriente, esta variación se da mediante la inyección a la red de múltiplos pares e impares de la frecuencia fundamental de 60Hz.

Los armónicos se generan principalmente debido a las cargas no lineales conectadas a la red eléctrica y las podemos separar en tres grupos [11]:

### 2.2.2.1 Arcos de Descarga

Generado cuando la corriente atraviesa un gas o el vacío entre dos electrodos, la corriente que circula en los arcos de descarga es inversa a la resistencia, convirtiéndola en una carga no lineal, se encuentran generalmente en los soldadores de arco y las lámparas fluorescentes.

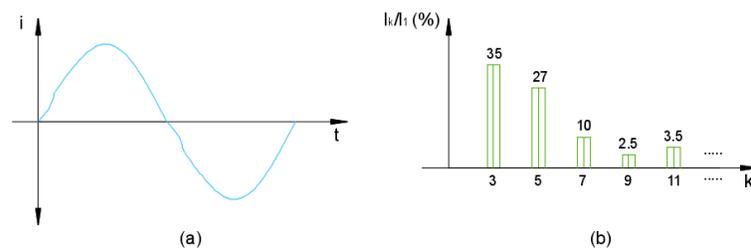


Figura 2.4 a) Corriente absorbida por lámpara fluorescente, b) Espectro armónico de (a).

Fuente [11] Dibujo: Autores

El espectro armónico se obtiene al aplicar la serie de Fourier de la corriente consumida por las lámparas, y en él se puede observar que las lámparas fluorescentes solo generan armónicos impares. El comportamiento de la corriente y el espectro armónico se muestran en la Figura 2.4

### 2.2.2.2 Equipos Electrónicos

Constituidos por semiconductores que conducen solamente cumpliendo ciertas condiciones como los rectificadores. En la Figura 2.5 se analiza el espectro y la corriente absorbida por un rectificador con filtro inductivo permite disminuir la tensión de rizado en los rectificadores y en la Figura 2.6 se muestra el espectro y la corriente absorbida por un rectificador con filtro capacitivo que se utiliza en muchas fuentes de alimentación de los equipos electrónicos e informáticos.

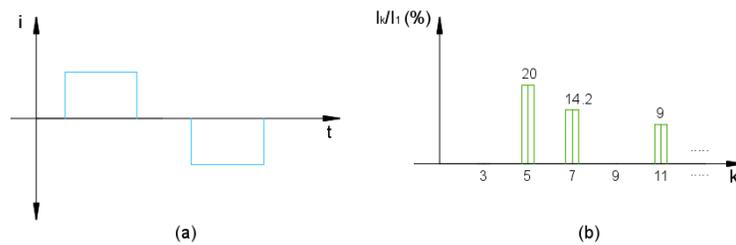


Figura 2.5 a) Corriente absorbida por rectificador con filtro inductivo, b) Espectro armónico de (a).  
Fuente [11] Dibujo: Autores

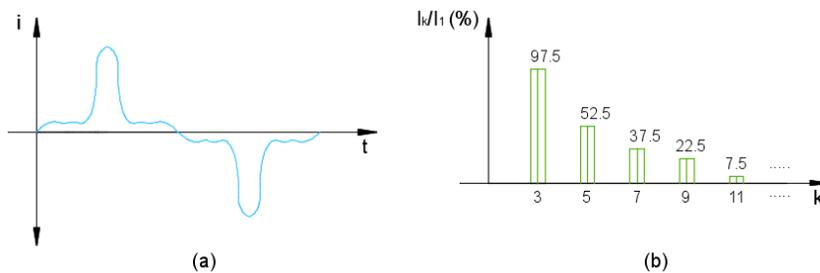


Figura 2.6 a) Corriente absorbida por rectificador con filtro capacitivo, b) Espectro armónico de (a).  
Fuente [11] Dibujo: Autores

### 2.2.2.3 Inductancias con núcleo saturable

Otra carga no lineal son las inductancias que poseen un núcleo de hierro como en los transformadores, motores y reactancias en lámparas de descarga, en estas cargas cuando la tensión se eleva por encima de los valores nominales el núcleo se va saturando de modo que su impedancia y coeficiente de autoinducción disminuyen.

Por esto los transformadores son construidos para trabajar a una tensión cercana a la de su saturación, la saturación provoca que la corriente magnetizante contenga armónicos véase la Figura 2.7. Por otro lado en el caso de los motores de inducción se generan armónicos entre el rotor y el estator.

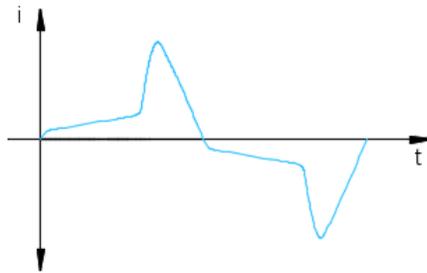


Figura 2.7 Corriente magnetizada de un transformador.  
Fuente [11] Dibujo: Autores

### 2.2.2.4 Armónicos de Tensión

Como ya se mencionó al usuario no siempre le llega una onda sinusoidal perfecta debido a las cargas no lineales, a las caídas de tensión y al efecto de resonancia.

En la Figura 2.8, con la carga no lineal la corriente se distorsiona provocando que la caída de tensión no sea sinusoidal de tal modo que la tensión en los terminales de la carga esté distorsionada.

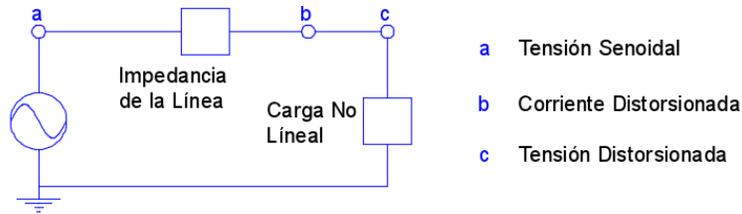


Figura 2.8 Corriente magnetizada de un transformador.  
Fuente [11] Dibujo: Autores

La caída de tensión está dada en las líneas de transmisión y en el transformador, por lo tanto es inductiva. Como las reactancias aumentan con la frecuencia, a mayor armónico mayor caída inductiva, aunque a mayor orden del armónico menor es su magnitud.

Si además existen condensadores esto generara resonancia, podemos obtener condensadores en serie y en paralelo véase Figura 2.9 y 2.10.

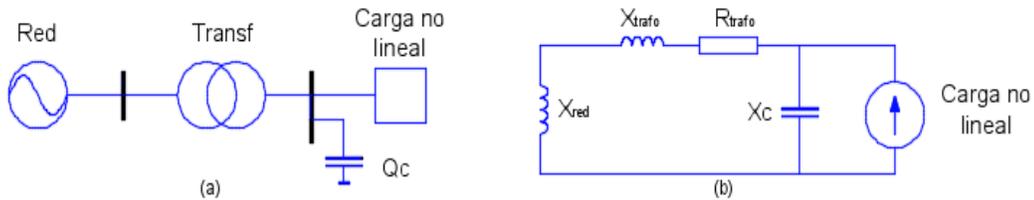


Figura 2.9 Resonancia en Paralelo a) Diagrama Unifilar b) Diagrama F-N para armónicos.  
Fuente [11] Dibujo: Autores

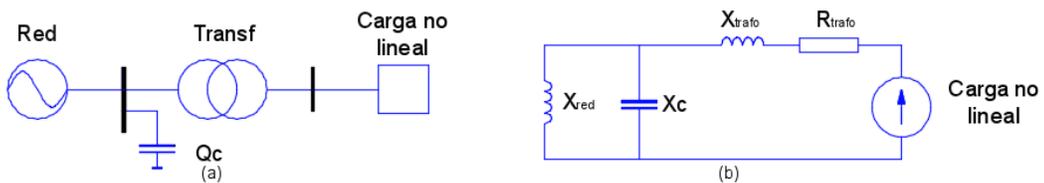


Figura 2.10 Resonancia en Serie a) Diagrama Unifilar b) Diagrama F-N para armónicos.  
Fuente [11] Dibujo: Autores

### 2.3 SOBRETENSIONES

Es una perturbación que posee en un instante de tiempo un valor superior al valor de cresta de la tensión nominal de la red, este aumento de tensión pone en peligro a todo material o carga que forme parte de la instalación eléctrica. Por otro lado el cálculo de las sobretensiones es de vital importancia para escoger correctamente los materiales caracterizados por su conductividad o su rigidez eléctrica empleados para la transmisión de energía.

Las sobretensiones pueden ocurrir a nivel de baja y media tensión, en ambos casos se deben emplear precauciones para evitarlas y descargarlas a tierra. A continuación algunas de las sobretensiones más importantes [12].

### 2.3.1 SOBRETENSIONES TEMPORALES

Son perturbaciones de larga duración en un rango que va desde los milisegundos hasta varios segundos y de frecuencia igual a la de la red, siendo su amortiguación casi nula. Estas tensiones son de origen interno y sus principales causantes pueden ser [13]:

**Fallas de Tierra:** Son bastante frecuentes y causadas cuando se produce una falta con contacto de una o más fases a tierra, en una falta monofásica a tierra se originan sobre tensiones fase-tierra en las fases sanas.

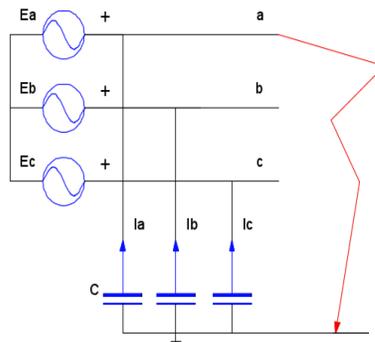


Figura 2.11 Cortocircuito Fase-Tierra en una Red con neutro aislado.  
Fuente [13] Dibujo: Autores

El tiempo de la falla es la duración de la sobretensión pudiendo alcanzar hasta horas mientras no se elimine la falla de tierra, en sistemas con puestas a tierra la duración de esta sobretensión es menor a 1 seg y cuando tiene un

sistema de neutro con puesta a tierra a través de bobinas de compensación es menor a 10s.

**Pérdidas de carga:** Sucede cuando existe una desconexión brusca de cargas significativas por sobrecargas, cortocircuitos y/o malas maniobras que activen las protecciones.

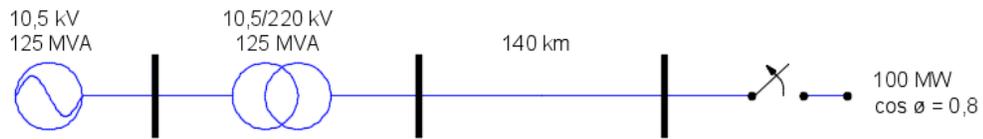


Figura 2.12 Diagrama de Desconexión repentina de una carga.  
Fuente [13] Dibujo: Autores

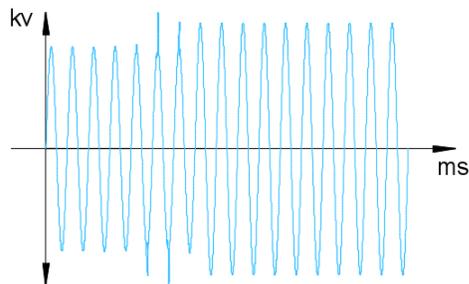


Figura 2.13 Sobretensión resultante de la desconexión de la carga .  
Fuente [13] Dibujo: Autores

**Resonancia armónicas:** Presentes cuando se conectan a la red cargas con componentes capacitivos (líneas, cables) o inductivos (bobinas, transformadores), estas sobretensiones pueden alcanzar valores extremadamente altos.

**Ferroresonancias:** Presente en transformadores, generado por la excitación de inductancias saturables a través de una capacitancia en serie.

### 2.3.2 SOBRETENSIONES DE FRENTE LENTO

Son perturbaciones de corta duración en el rango de microsegundos y milisegundos y de frecuencia variable entre 2 y 20 kHz y fuertemente amortiguadas. Estas tensiones son originadas por la actuación de las protecciones de potencia en subestaciones o por descargas atmosféricas. Entre las sobretensiones principales de frente lento tenemos:

- Conexión y reenganche de líneas.
- Maniobras con cargas inductivas y capacitivas.
- Descarga atmosférica cercana o sobre las fases de una red.

### **2.3.3 SOBRETENSIONES DE FRENTE RÁPIDO**

Son perturbaciones de muy corta duración en el rango de microsegundos (0,1 y 20  $\mu$ s), su forma de onda tiene componentes de alta frecuencia y elevados picos de tensión. Entre estas sobretensiones las más importantes son las originadas por el rayo en las líneas aéreas de distribución.

### **2.3.4 SOBRETENSIONES DE FRENTE MUY RÁPIDO**

Tiene una duración en el rango de los nanosegundos (inferior a los 3ns) siendo originadas por maniobras de seccionadores o por defectos en subestaciones SF6, esta sobretensión disminuye rápidamente al atravesar aisladores que conectan a la subestación con la red.

## **2.4 CAÍDAS DE TENSION**

Perturbación caracterizada por una disminución en la tensión de la red, existen caídas de tensión de corta y larga duración conocidas como Bajadas de tensión y Subtensiones respectivamente [14].

### **2.4.1 Bajada de Tensión**

De duración inferior a 1 minuto, esta caída tensión ocurre con una disminución de la tensión seguida por una pronta recuperación del sistema en un rango de tiempo de 10 ms a 1 minuto [15]. Entre las posibles causas tenemos al encendido de cargas significativas como los motores que en su arranque consumen hasta 6 veces su corriente nominal y la liberación de fallas por las protecciones en la red.

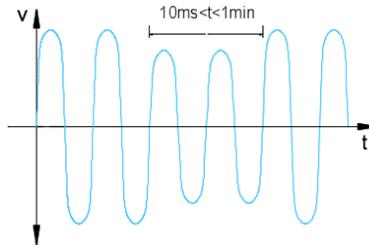


Figura 2.14 Bajada de Tensión resultante de la conexión de la carga.  
Fuente [14] Dibujo: Autores

### 2.4.2 Subtensión

A diferencia de las bajadas de tensión esta perturbación se caracteriza por ser de larga duración, provocando el sobrecalentamiento de motores y problemas con las cargas no lineales (UPS).

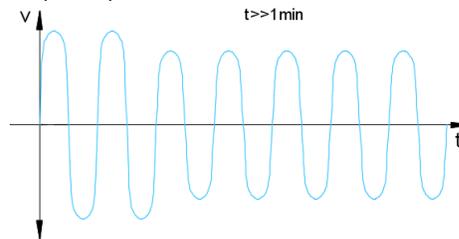


Figura 2.15 Subtensión en la red eléctrica.  
Fuente [14] Dibujo: Autores

## 2.5 INTERRUPCIONES

Caracterizado por el corte total de tensión en la red eléctrica. De origen variado como descargas atmosféricas, fallos de equipos de la red, activación de disyuntores, daños a la red por circunstancias ambientales, etc.

El tiempo de corte clasifica las interrupciones en:

- Instantánea: Corte de tensión y corriente de 0,5 a 30 ciclos
- Momentánea: Corte de tensión y corriente de 30 ciclos a 20 segundos.
- Temporal: Corte de tensión y corriente de 2 segundos a 2 minutos.
- Sostenida: Corte de tensión y corriente superior a 2 minutos.

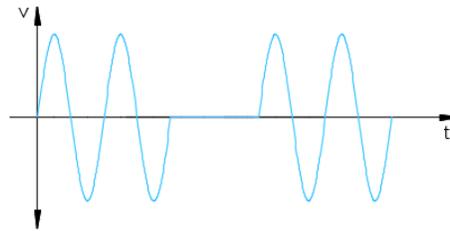


Figura 2.16 Interrupción de la Tensión en una red eléctrica.  
Fuente [14] Dibujo: Autores

## 2.6 RUIDO

Presentes en los conductores de las líneas de transmisión, son perturbaciones aleatorias de valores pequeños y poco predecibles. Su origen está ligado a máquinas de escobillas, perturbaciones atmosféricas y también a la presencia de dispositivos electrónicos.

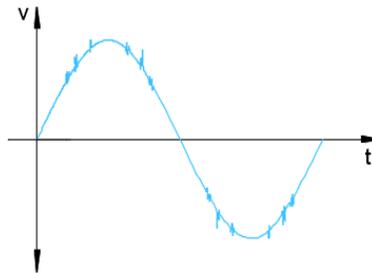


Figura 2.17 Ruido presente en una red eléctrica.  
Fuente [14] Dibujo: Autores

## 2.7 VARIACIONES DE FRECUENCIA

Perturbación muy poco común originada por la puesta de encendido de generadores de reserva, estas variaciones afectan principalmente a motores alterando su velocidad [14].

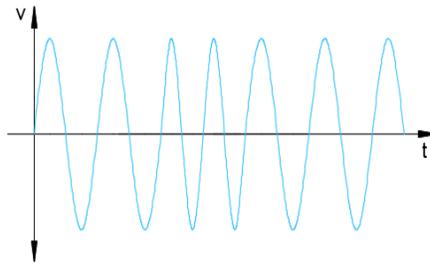


Figura 2.18 Variaciones de Frecuencia en la red eléctrica.  
Fuente [14] Dibujo: Autores

## 2.8 FLUCTUACIONES DE TENSIÓN

Producen una variación aleatoria en la forma de onda de la tensión en un rango  $\pm 5\%$  del valor nominal con una frecuencia inferior a los 25 Hz. Producidas por cargas que muestren variaciones en el consumo de corriente.

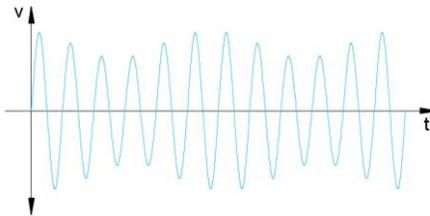


Figura 2.19 Fluctuaciones de Tensión en la red eléctrica.  
Fuente [14] Dibujo: Autores

## **CAPITULO 3. TOPOLOGÍAS DE CONVERTIDORES ELECTRÓNICOS DE POTENCIA.**

Un inversor es un dispositivo eléctrico que convierte la corriente directa (DC) a corriente alterna (AC), la AC puede ser convertida a cualquier nivel de voltaje por medio de transformadores y control de circuitos [17].

En los inversores conmutados de fuente de tensión la tensión de salida tiene un alto contenido armónico dado que está compuesta por flancos de tensión que corresponden a los distintos estados de conmutación de los dispositivos que componen el inversor. Para poder obtener una señal sinusoidal de tensión se debe emplear la combinación de una modulación sinusoidal de ancho de pulso (SPWM) con el agregado de filtros pasabajos a la salida del inversor. Dada la disponibilidad de los dispositivos semiconductores de potencia de alta velocidad, es posible reducir significativamente el contenido armónico de la tensión de salida mediante diversas técnicas de conmutación, utilizando dispositivos como tiristores, triac's, IGBT's, MOSFET's o dispositivos similares [17].

### **3.1 Topologías**

Las topologías más utilizadas en aplicaciones de potencia como los inversores son:

- Topología de Medio puente,
- Topología de Puente completo.
- Topología Diode-Clamped o Neutral-Point-Clamped (NPC) y,
- Topología Conergy NPC.

En [18] se puede consultar más topologías de inversores.

### 3.1.1 TOPOLOGÍA DE MEDIO PUENTE (MONOFÁSICO)

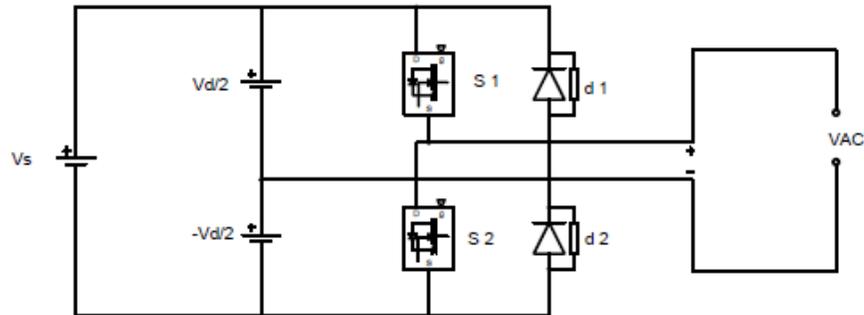


Figura 3.1 Diagrama esquemático del inversor de medio puente H.  
Fuente: [17] Dibujo: Autores

La Figura 3.1 muestra el inversor de medio puente. El inversor consta de dos condensadores iguales, que se conectan en serie a través de la entrada DC, y en su unión está en el potencial medio con un voltaje de  $\frac{1}{2} V_d$ . También consta de un par de interruptores (S1 y S2) los cuales funcionan de forma complementaria, es decir, al estar en activo S1, S2 se mantiene abierto y el voltaje del capacitor  $\frac{1}{2} V_d$  se ve reflejado en la carga; mientras que al estar en activo S2, S1 se abre y el voltaje de entrada  $-\frac{1}{2} V_d$  se muestra a través de la carga. Es decir, el voltaje de salida en la carga corresponderá a una señal cuadrada, como se observa en la Figura 3.2.

Se deben usar capacitancias lo bastante grandes para que sea razonable suponer que el potencial en el punto “o” permanezca esencialmente constante respecto del bus de DC negativo [2].

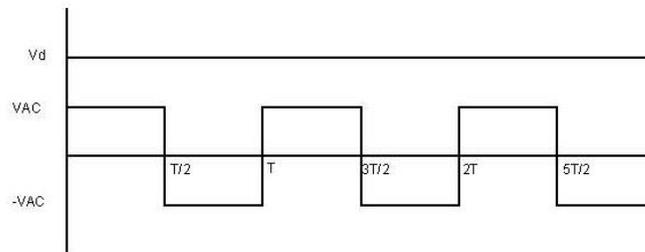


Figura 3.2 Forma de onda de entrada y salida del medio puente.  
Fuente: [2] Dibujo: Autores

### 3.1.2 TOPOLOGÍA DE PUENTE COMPLETO (MONOFÁSICO).

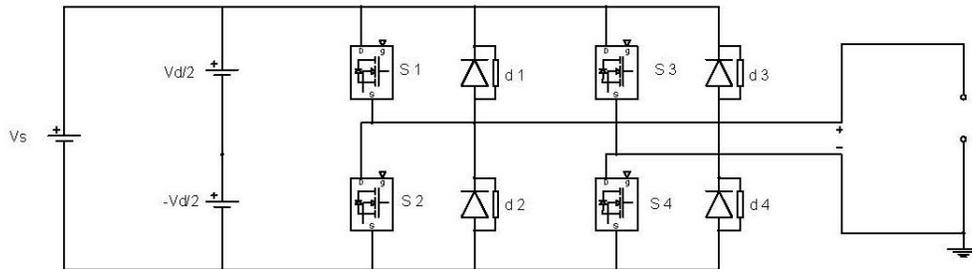


Figura 3.3 Diagrama esquemático del inversor monofásico de puente completo.  
Fuente: [17] Dibujo: Autores

La Figura 3.3 muestra un inversor de puente completo. El puente completo es similar al de medio puente con la ventaja de que a su salida proporciona  $\pm V_s$  a diferencia de la topología medio puente que únicamente proporciona a la carga la mitad del voltaje de entrada. Es decir, con el mismo voltaje DC de entrada, tenemos el doble de voltaje que con el inversor de medio puente. Esto implica que, para la misma potencia la corriente de salida y la corriente de los interruptores son la mitad que las corrientes de un inversor de medio puente. En potencias altas, se notan más las ventajas de esta topología, ya que se requieren menos conexiones paralelas de dispositivos [16].

En [17] se amplía más información sobre esta topología donde se observan los posibles estados de conmutación de cada interruptor (MOSFETs, IGBTs, etc.) La forma de onda de salida del inversor se muestra en la Figura 3.4.

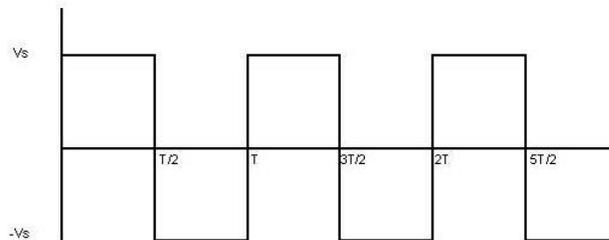


Figura 3.4 Forma de onda de salida del puente H.  
Fuente: [17] Dibujo: Autores.

### 3.1.3 TOPOLOGÍA DIODE-CLAMPED O NEUTRAL-POINT-CLAMPED (NPC)

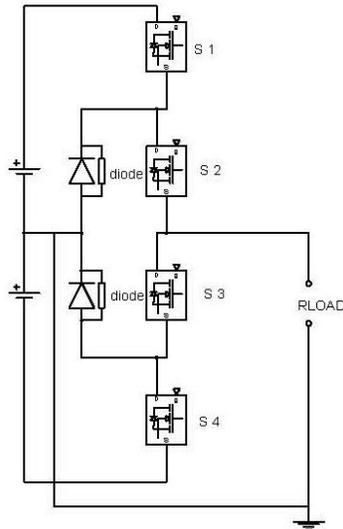


Figura 3.5 Diagrama esquemático del inversor NPC.  
Fuente: [18] Dibujo: Autores

El concepto principal es que el nivel voltaje cero puede lograrse anclando la salida del punto medio del bus DC a tierra utilizando dos diodos, dependiendo del signo de la corriente. La topología de diodo anclado o NPC es una topología de punto neutro la cual mejora la eficiencia de conversión de energía [18] pudiendo ofrecer una ventaja en la distribución de las pérdidas de conversión (por lo tanto, el aumento de la eficiencia de conversión).

Las principales ventajas de esta clase de inversores son:

- El voltaje que soportan los interruptores es la mitad de la tensión del bus de entrada DC, gracias a esto los interruptores pueden soportar mayores niveles de potencia.
- Utiliza pocos condensadores en comparación a otras topologías existentes. [19]

Sin embargo, con esta topología se pueden presentar los siguientes inconvenientes:

- En esta topología se necesita que los elementos como transistores o dispositivos similares sean de alta velocidad, que estos puedan soportar corrientes elevadas y tengan un tiempo de recuperación en inversa rápida.
- Es importante que el voltaje en los condensadores sea equilibrado durante la operación del inversor, ya que se puede llegar a tener en la salida un voltaje desequilibrado [19].

### 3.1.4 TOPOLOGÍA CONERGY NPC

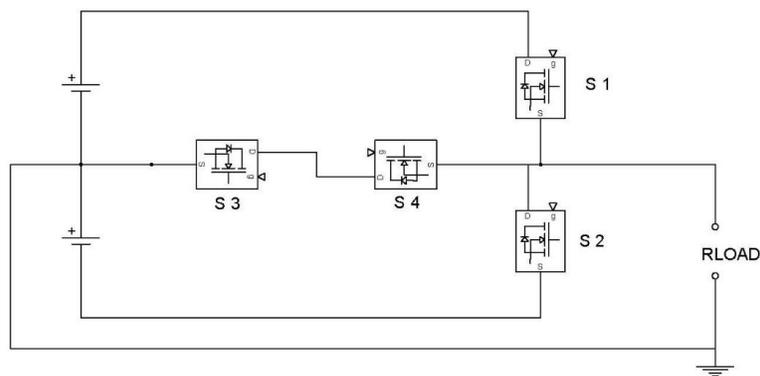


Figura 3.6 Diagrama esquemático del inversor conergy NPC.  
Fuente: [18] Dibujo: Autores

Es una variante la topología NPC, es un medio puente con la salida conectada al neutro, utilizando como interruptor bidireccional una serie de dos MOSFETs o IGBTs.

El concepto principal del inversor Conergy NPC es que el nivel de voltaje cero puede lograrse anclando la salida del punto medio del bus DC a tierra a través S3 Y S4, dependiendo del sentido de la corriente [18].

Una característica importante en esta configuración es que los dispositivos electrónicos tales como MOSFETs o IGBTs deben ser de alta frecuencia.

Esta topología presenta las siguientes ventajas:

- El Conergy NPC es más eficiente con relación a la NPC clásica.
- Logra tener una mayor eficiencia con respecto a otras configuraciones de hasta el 98% debido a una caída de tensión reducida, ya que durante el estado activo solamente un interruptor está operando,
- Adecuada para usos en aplicaciones fotovoltaicas sin transformador debido a la alta eficiencia y baja corriente de fuga

Como principal inconveniente se tiene que la tensión nominal de S1 y S2 es el doble en comparación con otros interruptores de la NPC.

## **CAPITULO 4. SIMULACIÓN DEL SISTEMA Y VALIDACIÓN DE RESULTADOS**

Como se indica en el capítulo 1, el crecimiento del uso de paneles solares en domicilios para la generación de energía eléctrica, ha llevado a pensar no solo en el consumo directo sino también en inyectar a la red de distribución eléctrica la energía sobrante generada.

Debido a esto es necesario que el sistema inversor funcione adecuadamente ante la presencia de perturbaciones que se presentan en la red eléctrica (estudiadas en el capítulo 2). Por ello se hace necesario realizar pruebas de funcionamiento del inversor con una fuente de red controlada que sea capaz de reproducir los distintos tipos de perturbaciones.

El emulador de la tensión de red desarrollado en este trabajo permite reproducir perturbaciones con las características enunciadas en la norma IEEE 1150 2009 [20].

El desarrollo se lo puede dividir en 6 secciones: Topologías y modulación, filtrado, generación de perturbaciones, compensación de no idealidades, pruebas de funcionamiento y estimación de costos de implementación circuital.

### **4.1 TOPOLOGÍAS Y MODULACIÓN**

De lo estudiado en el capítulo 3, se van a simular tres tipos de topologías diferentes con su respectiva modulación. De esta forma, se puede observar de cada topología su funcionamiento, ventajas y desventajas. Información necesaria para seleccionar la topología más conveniente para el emulador de la tensión de red.

La modulación PWM empleada, consiste en la comparación de una onda seno de 60 Hz (señal de referencia) con una onda triangular de 100 kHz (señal portadora). Esta comparación genera un pulso cuando la onda seno es mayor a la onda triangular, para observar como funciona la modulación se utilizara una portadora de 2kHz como se muestra en la Figura 4.1.

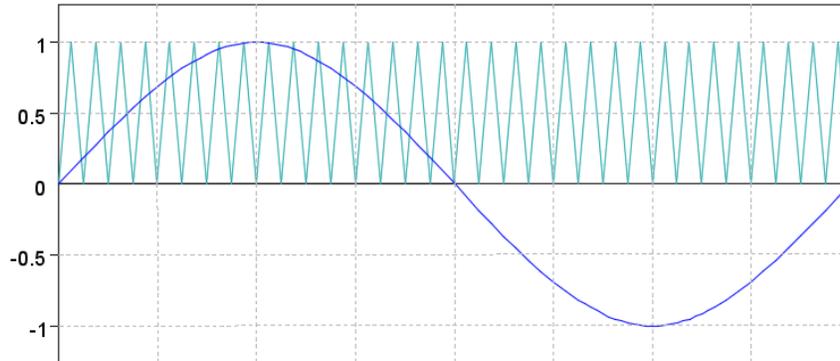


Figura 4.1 Señal de Referencia Seno 60 Hz y Señal Portadora de 2khz  
Fuente: Autores

En la Figura 4.2 (a) se observa como se obtienen los pulsos para el semiciclo positivo. Para la obtención de los pulsos para el semiciclo negativo es necesario que la señal de referencia este afectada por un offset como se observa en la Figura 4.2 (b).

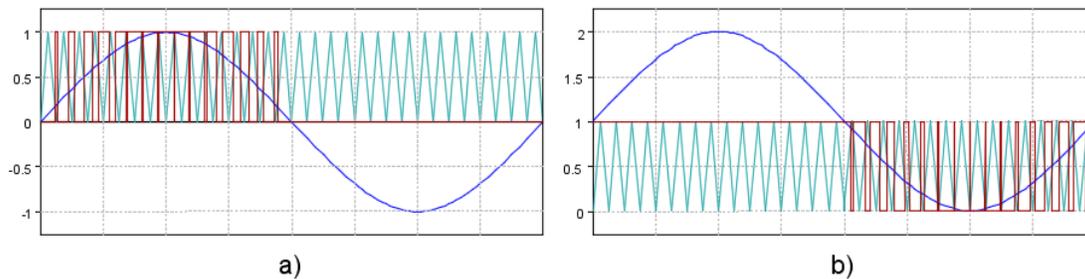


Figura 4.2 Modulación PWM: (a) Semiciclo Positivo (b) Semiciclo Negativo  
Fuente: Autores

#### 4.1.1 TOPOLOGÍA DE PUENTE COMPLETO Y SU MODULACIÓN.

Esta topología consiste en dos brazos alimentados por una fuente  $V_D$ , cada brazo con dos interruptores en serie con un diodo en antiparalelo cada uno. El voltaje de salida para esta topología se encuentra en la unión de los interruptores como se observa en la Figura 4.3 y puede tomar 2 niveles de tensión  $+V_D$  y  $-V_D$ .

Los estados de los interruptores (encendido/apagado) para la obtención del voltaje de salida vienen dados por la Tabla 4.1.

Semiciclo Positivo				
$S_1$	$S_4$	$S_2$	$S_3$	Nivel
ON	ON	OFF	OFF	$+V_D$
Semiciclo Negativo				
$S_2$	$S_3$	$S_1$	$S_4$	Nivel
ON	ON	OFF	OFF	$-V_D$

Tabla 4.1 Estados de los Interruptores para la obtención de Voltaje de Salida en la Topología de Puente Completo.

Fuente: Autores

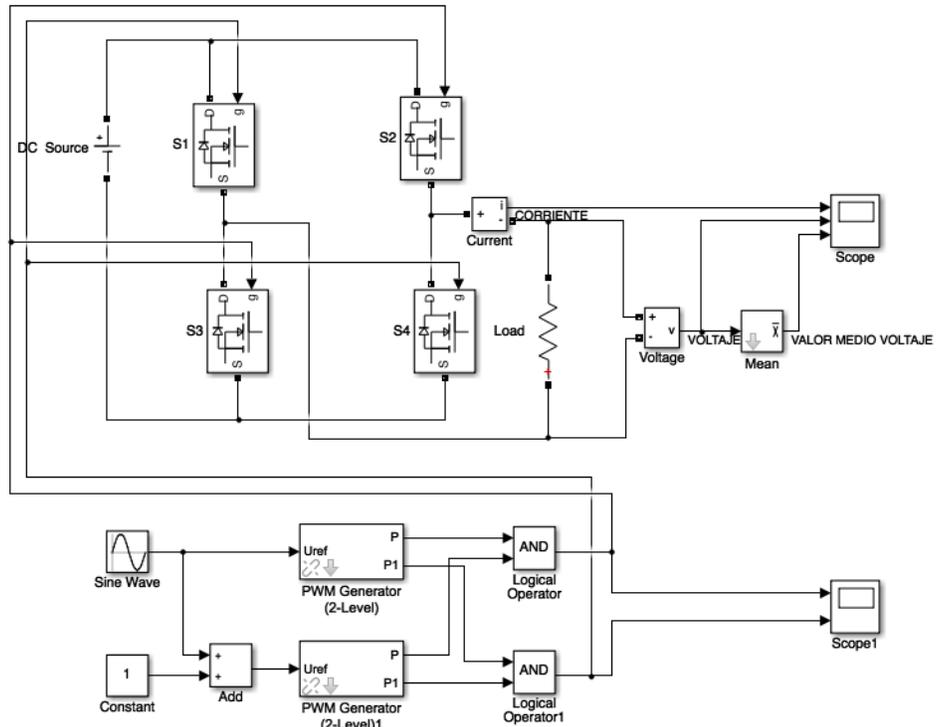


Figura 4.3 Diagrama de la Topología Puente Completo y modulación aplicada, realizado en Matlab/Simulink.

Fuente: Autores

La modulación por ancho de pulso PWM, esta dada por una señal de referencia seno de 60Hz con una señal portadora triangular de 100kHz.



Figura 4.4 Modulación PWM ocupada por la Topología Puento Completo.

Fuente: Autores

El valor de los buses de continua  $V_D$  que se ocupan para realizar las simulaciones es de 170V. El voltaje de salida simulado para una carga resistiva pura se muestra en la Figura 4.5. Donde se puede ver la corriente, el voltaje y el valor medio del voltaje.



Figura 4.5 Corriente, Voltaje y Valor medio obtenidos a la salida del Inversor de Puento Completo.

Fuente: Autores.

#### 4.1.2 TOPOLOGÍA NPC (Neutral Point Clamped) Y SU MODULACIÓN.

La estructura de esta topología es de un solo brazo con dos medios puentes alimentados por dos fuentes  $V_D$ . Cada medio puente tiene dos interruptores en serie con su diodo en antiparalelo. Dos diodos son utilizados junto con dos interruptores para que el voltaje de salida sea cero [21].

El voltaje de salida se encuentra entre; el punto medio de las fuentes de tensión  $V_D$  que va conectado a neutro y el punto ubicado en la unión de los dos medios puentes. El voltaje de salida puede tomar 3 niveles de tensión  $+V_D$ , 0 y  $-V_D$ .

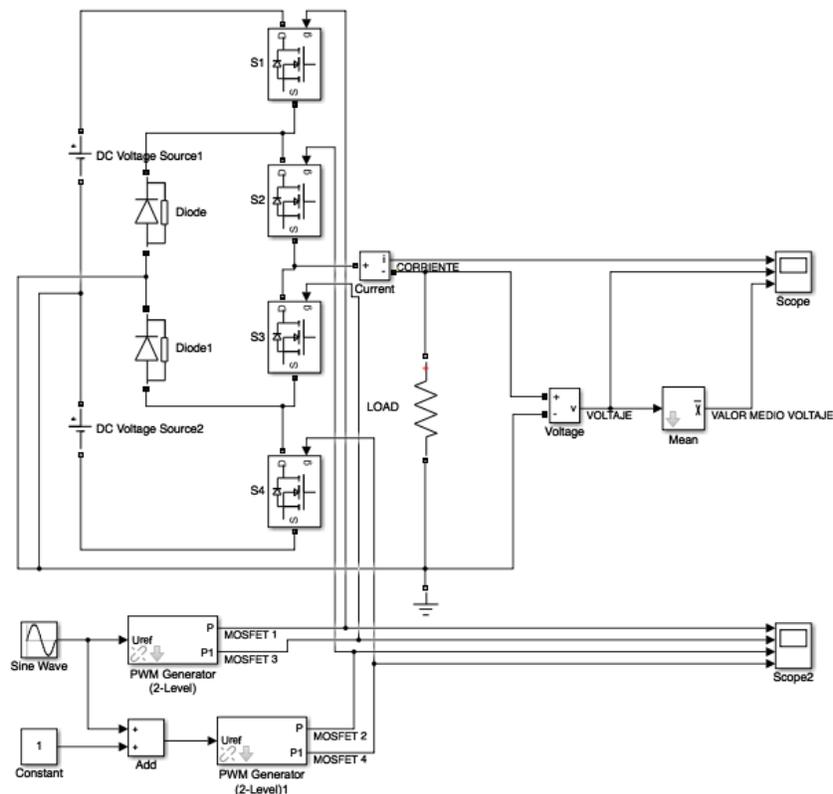


Figura 4.6 Diagrama de la Topología NPC y modulación aplicada, realizado en Matlab/Simulink.

Fuente: Autores

Los estados de los interruptores para la obtención de los tres niveles de voltaje se detallan en la Tabla 4.2.

Semiciclo Positivo				
$S_1$	$S_3$	$S_2$	$S_4$	Nivel
ON	OFF	ON	OFF	$+V_D$
OFF	ON	ON	OFF	0
Semiciclo Negativo				
$S_4$	$S_2$	$S_3$	$S_1$	Nivel
ON	OFF	ON	OFF	$-V_D$
OFF	ON	ON	OFF	0

Tabla 4.2 Estados de los Interruptores para la obtención de Voltaje de Salida en la Topología NPC.  
Fuente: Autores

La modulación aplicada a los interruptores (MOSFETs) se muestra en la Figura 4.7. El voltaje, la corriente y el valor medio del voltaje a la salida del inversor NPC se muestran en la Figura 4.8.



Figura 4.7 PWM utilizada en la Topología NPC.  
Fuente: Autores

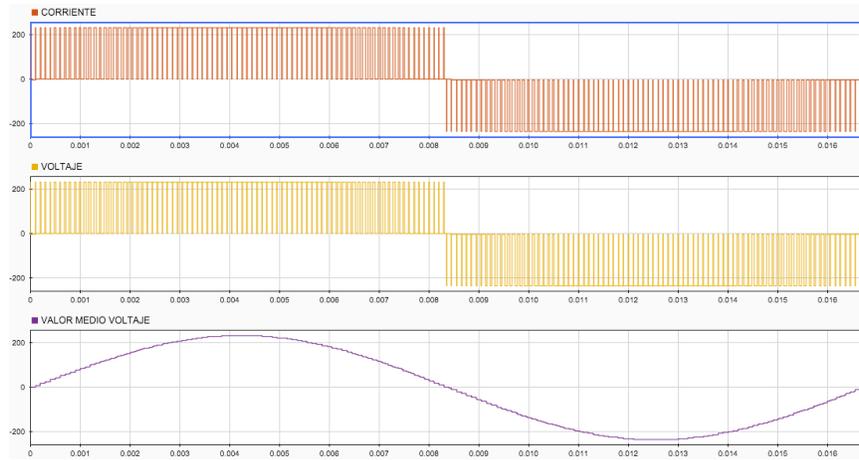


Figura 4.8 Corriente, Voltaje y Valor medio obtenidos a la salida del Inversor NPC.  
Fuente: Autores

### 4.1.3 TOPOLOGÍA CONERGY NPC

Topología con estructura tipo T donde para la obtención del nivel de tensión 0 (V) utiliza dos interruptores auxiliares como se muestra en la Figura 4.9.

El voltaje de salida se encuentra entre el punto medio de las fuentes de tensión  $V_D$  que va conectado a neutro y el punto ubicado en la unión de los dos interruptores  $S_1$  y  $S_4$ . El voltaje de salida puede tomar 3 niveles  $+V_D$ ,  $0(V)$  y  $-V_D$ .

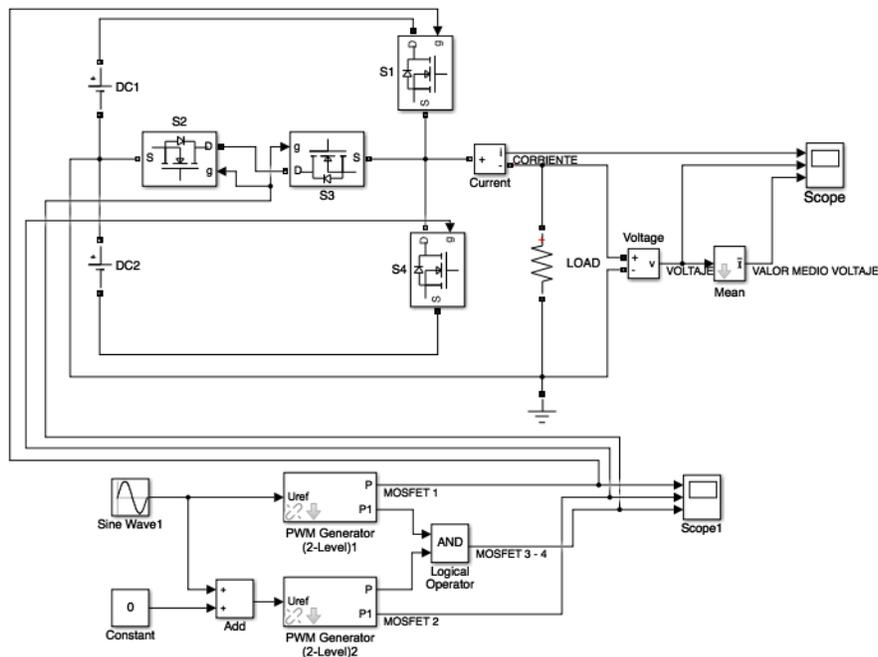


Figura 4.9 Diagrama de la Topología Conergy NPC y modulación aplicada, realizado en Matlab/Simulink.

Fuente: Autores

Los estados de los interruptores para la obtención de los tres niveles de voltaje se detallan en la Tabla 4.3.

Semiciclo Positivo				
$S_1$	$S_2$	$S_3$	$S_4$	Nivel
ON	OFF	OFF	OFF	$+V_D$
OFF	ON	ON	OFF	0
Semiciclo Negativo				
$S_4$	$S_2$	$S_3$	$S_1$	Nivel
ON	OFF	OF	OFF	$-V_D$
OFF	ON	ON	OFF	0

Tabla 4.3 Estados de los Interruptores para la obtención de Voltaje de Salida en la Topología Conergy NPC.

Fuente: Autores

La modulación aplicada a los interruptores (MOSFETs) para esta topología se muestra en la Figura 4.10. El voltaje, la corriente y el valor medio del voltaje a la salida del inversor Conergy NPC se muestra en la Figura 4.11.



Figura 4.10 Modulación PWM ocupada por la Topología Conergy NPC.

Fuente: Autores

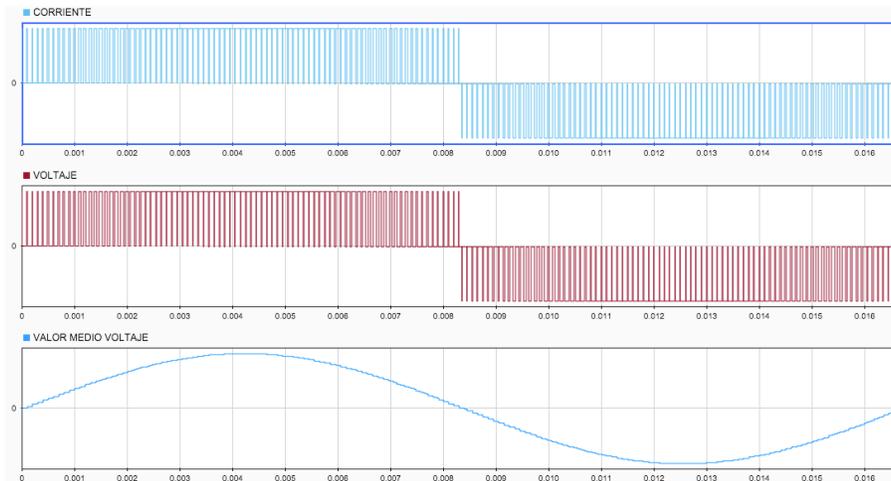


Figura 4.11 Corriente, Voltaje y Valor medio de la tensión obtenidos a la salida del Inversor Conergy NPC.

Fuente: Autores

## 4.2 FILTRADO

La modulación sinusoidal de ancho de pulso asegura que en la tensión de salida del inversor están presentes los componentes armónicos de alta frecuencia correspondientes a la frecuencia de la portadora y los de baja frecuencia correspondientes a la moduladora sinusoidal, estos armónicos deben ser eliminados por medio de la utilización de filtros.

En este trabajo se propone la implementación de dos etapas de filtrado para obtener un voltaje de salida similar al de la red.

### 4.2.1 ETAPA 1 - FILTRO LCL

La primera etapa consiste en un filtro LCL que es comúnmente usado en inversores debido a su característica de presentar una alta atenuación y el bajo costo de implementación [23].

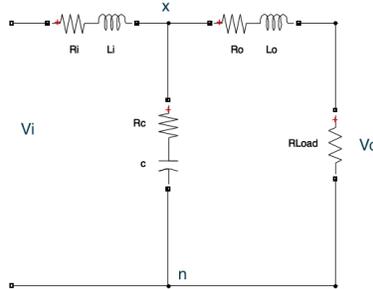


Figura 4.12 Esquema del Filtro LCL  
Fuente: Autores

### 4.2.1.1 Función de Transferencia y Frecuencia del Filtro LCL

Para observar el comportamiento en frecuencia del filtro LCL es necesario obtener su función de transferencia. La que nos permitirá, además, encontrar la frecuencia de resonancia. A continuación se presenta el desarrollo matemático para encontrar estos parámetros.

$$V_{x-n} = i_o(Z_o + Z_{load}) = i_o Z_A \quad (1)$$

$$V_{x-n} = V_i \frac{Z_C \parallel Z_A}{Z_i + Z_C \parallel Z_A} \quad (2)$$

Donde  $V_{x-n}$  es el voltaje entre el nodo x y el neutro,  $V_i$  es el voltaje de ingreso del filtro,  $Z_o = R_o + sL_o$ ,  $Z_{load} = R_{load}$  y  $Z_C = R_c + \frac{1}{sC}$ . A continuación se proceden a igualar estas ecuaciones para encontrar la función de transferencia.

$$\begin{aligned} i_o Z_A &= V_i \frac{Z_C \parallel Z_A}{Z_i + Z_C \parallel Z_A} \\ \frac{i_o}{V_i} &= \frac{Z_C \parallel Z_A}{Z_i + Z_C \parallel Z_A} \cdot \frac{1}{Z_A} \\ \frac{i_o}{V_i} &= \frac{\frac{Z_C \cdot Z_A}{Z_C + Z_A}}{Z_i + \frac{Z_C \cdot Z_A}{Z_C + Z_A}} \cdot \frac{1}{Z_A} = \frac{\frac{Z_C \cdot Z_A}{Z_C + Z_A}}{\frac{Z_i(Z_C + Z_A) + Z_C \cdot Z_A}{Z_C + Z_A}} \cdot \frac{1}{Z_A} \\ \frac{i_o}{V_i} &= \frac{Z_C \cdot Z_A}{Z_i(Z_C + Z_A) + Z_C \cdot Z_A} \cdot \frac{1}{Z_A} \end{aligned}$$

$$\frac{i_o}{V_i} = \frac{Z_C}{Z_i(Z_C + Z_A) + Z_C \cdot Z_A}$$

Se procede a reemplazar el valor de las impedancias, donde:

$$Z_i = Z_{Ri} + Z_{Li} = R_i + sL_i$$

$$Z_o = Z_{Ro} + Z_{Lo} = R_o + sL_o$$

$$Z_C = Z_{Rc} + Z_C = R_c + \frac{1}{sC} = \frac{sCR_c + 1}{sC}$$

$$Z_A = Z_o + Z_{load} = R_{load} + R_o + sL_o$$

$$H(s) = \frac{i_o}{V_i}$$

$$H(s) = \frac{Z_C}{Z_i Z_C + Z_i Z_A + Z_C \cdot Z_A}$$

$$H(s) = \frac{\frac{sCR_c + 1}{sC}}{Z_i \frac{sCR_c + 1}{sC} + Z_i Z_A + \frac{sCR_c + 1}{sC} \cdot Z_A}$$

$$H(s) = \frac{\frac{sCR_c + 1}{sC}}{\frac{Z_i(sCR_c + 1) + sCZ_i Z_A + Z_A(sCR_c + 1)}{sC}}$$

$$H(s) = \frac{sCR_c + 1}{Z_i(sCR_c + 1) + sCZ_i Z_A + Z_A(sCR_c + 1)}$$

$$H(s) = \frac{sCR_c + 1}{Z_i sCR_c + Z_i + sCZ_i Z_A + Z_A sCR_c + Z_A}$$

$$H(s) = \frac{sCR_c + 1}{sCR_c Z_i + sCR_c Z_A + sCZ_i Z_A + Z_A + Z_i}$$

$$H(s) = \frac{sCR_c + 1}{D(s)}$$

$$D(s) = sCR_c Z_i + sCR_c Z_A + sCZ_i Z_A + Z_A + Z_i$$

$$D(s) = sCR_c(R_i + sL_i) + sCR_c(R_{load} + R_o + sL_o) + sC[(R_i + sL_i)(R_{load} + R_o + sL_o)] + (R_{load} + R_o + sL_o) + (R_i + sL_i)$$

$$D(s) = sCR_c R_i + s^2 CR_c L_i + sCR_c R_{load} + sCR_c R_o + s^2 CR_c L_o + sC[(R_i R_{load} + R_i R_o + sR_i L_o + sL_i R_{load} + sR_o L_i + s^2 L_i L_o)] + (R_{load} + R_o + sL_o) + (R_i + sL_i)$$

$$D(s) = sCR_cR_i + s^2CR_cL_i + sCR_cR_{load} + sCR_cR_o + s^2CR_cL_o + sCR_iR_{load} + sCR_iR_o + s^2CR_iL_o + s^2CL_iR_{load} + s^2CR_oL_i + s^3CL_iL_o + R_{load} + R_o + sL_o + R_i + sL_i$$

$$D(s) = s^3CL_iL_o + s^2[CR_cL_i + CR_cL_o + CR_iL_o + CL_iR_{load} + CR_oL_i] + s[CR_cR_i + CR_cR_{load} + CR_cR_o + CR_iR_{load} + CR_iR_o + L_o + L_i] + R_i + R_o + R_{load}$$

$$D(s) = s^3CL_iL_o + s^2[CL_i(R_c + R_{load} + R_o) + CL_o(R_c + R_i)] + s[L_i + L_o + CR_i(R_c + R_o + R_{load}) + CR_c(R_o + R_{load})] + R_i + R_o + R_{load}$$

La función de transferencia simplificada resultante queda de la forma:

$$H(s) = \frac{sCR_c + 1}{D(s)} \quad (3)$$

Donde:

$$D(s) = s^3CL_iL_o + s^2[CL_i(R_c + R_{load} + R_o) + CL_o(R_c + R_i)] + s[L_i + L_o + CR_i(R_c + R_o + R_{load}) + CR_c(R_o + R_{load})] + R_i + R_o + R_{load}$$

$$\text{Con: } R_i = R_o = R_c = R_{load} = 0$$

$$H(s) = \frac{1}{s^3CL_iL_o + s(L_i + L_o)}$$

De la función de transferencia se obtiene la frecuencia de resonancia  $\omega_0$ :

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{L_i + L_o}{L_i \cdot L_o} \cdot \frac{1}{C}} \quad (4)$$

### 4.2.1.2 Cálculo de elementos para el Filtro LCL

Para el cálculo de los componentes se escoge un valor comercial de capacitancia, para luego encontrar el valor del inductor. Se hace uso de una frecuencia de 50 kHz debido a las características de las perturbaciones a reproducir

$$\begin{aligned}C &= 2\mu F \\f &= 50 \text{ kHz} \\L_i &= L_o = L \\\omega &= 2\pi \cdot f \\\omega &= \sqrt{\frac{2L}{L^2} \cdot \frac{1}{C}} = \sqrt{\frac{2}{L} \cdot \frac{1}{C}} \\\omega^2 &= \frac{2}{LC} \\L &= \frac{2}{\omega^2 C} \\L = L_i = L_o &= \frac{2}{\omega^2 C} \\R_{Li} = R_{Lo} = R_C &= 10e^{-3} \\L &= 1.0132e - 5 \text{ H} = 10\mu H\end{aligned}$$

### 4.2.1.3 Diagramas de Bode simulados en MATLAB

Los diagramas de Bode del filtro LCL para una frecuencia de corte de 50 kHz son mostrados en las Figuras 4.13 y 4.14. En la Figura 4.13 se observa el comportamiento del filtro cuando se consideran las resistencias colocadas en serie y que están típicamente presentes en los capacitores e inductores (véase Figura 4.12) mientras que en la Figura 4.14 se ve el comportamiento al no presentar estas resistencias. Como se observa las resistencias si bien no afectan a la frecuencia de corte si lo hacen al pico de magnitud presente en esta frecuencia [24].

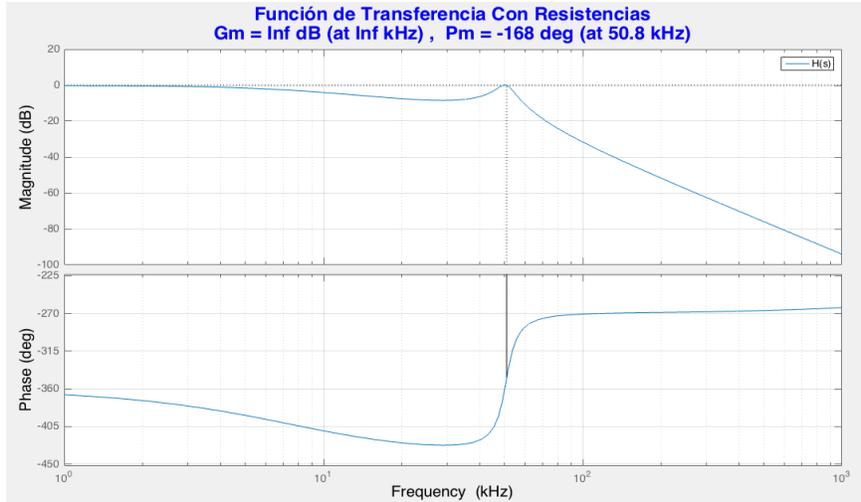


Figura 4.13 Diagrama de Bode del Filtro LCL con Resistencias.  
 Fuente: Autores

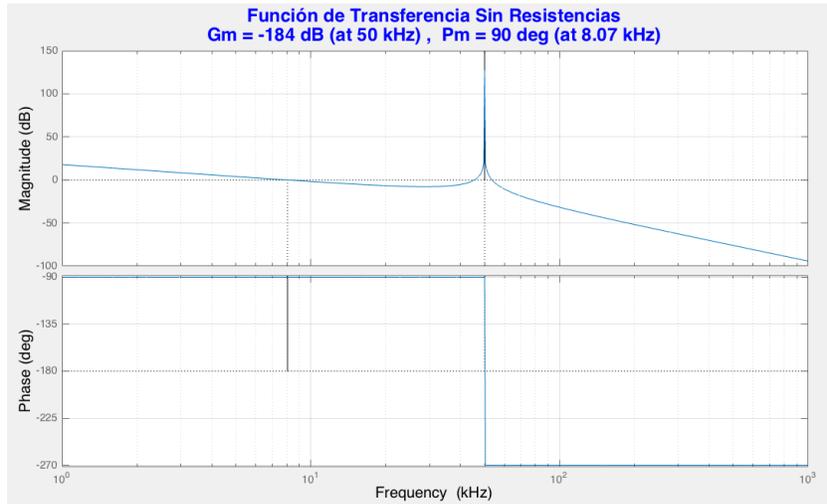


Figura 4.14 Diagrama de Bode del Filtro LCL con Resistencias.  
 Fuente: Autores

#### 4.2.1.4 Filtro Simulado en SIMULINK

Para ver como se comporta el filtro diseñado se procede a realizar las simulaciones mediante el programa SIMULINK.

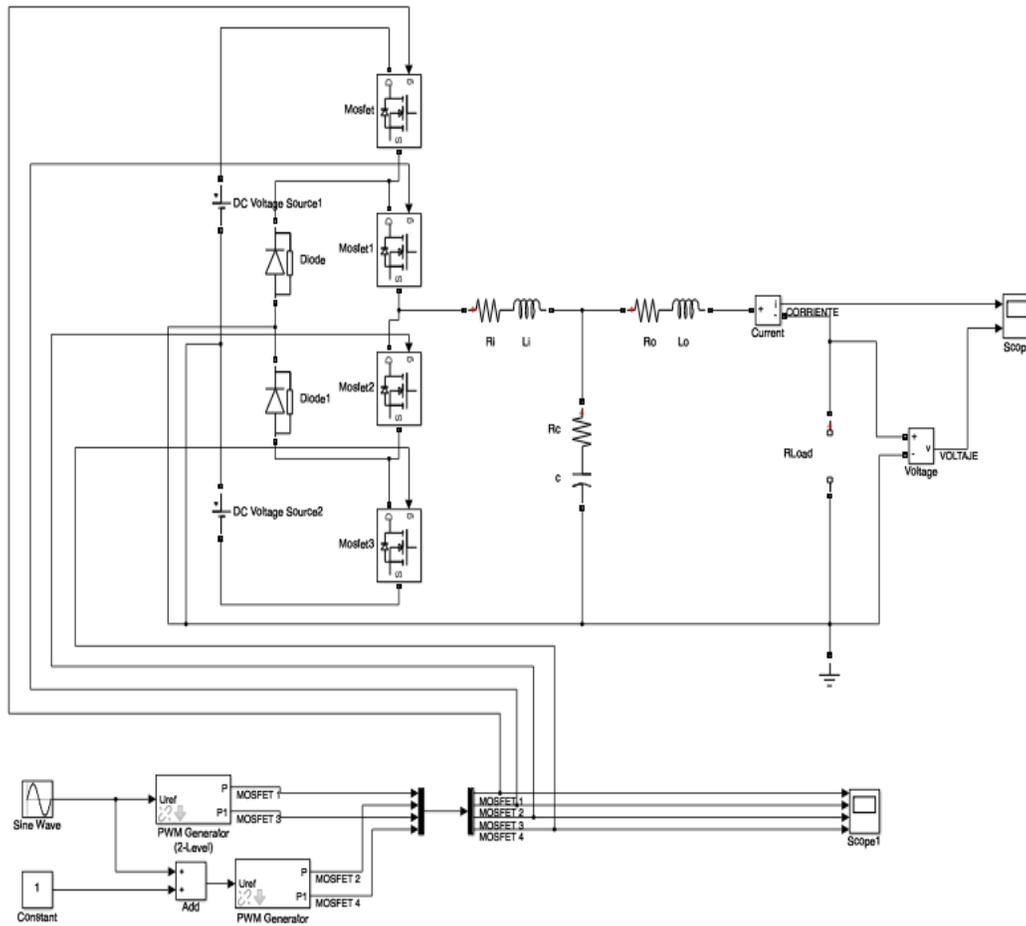


Figura 4.15 Esquema del inversor con la primera etapa de filtrado, desarrollado y simulado en SIMULINK.

Fuente: Autores

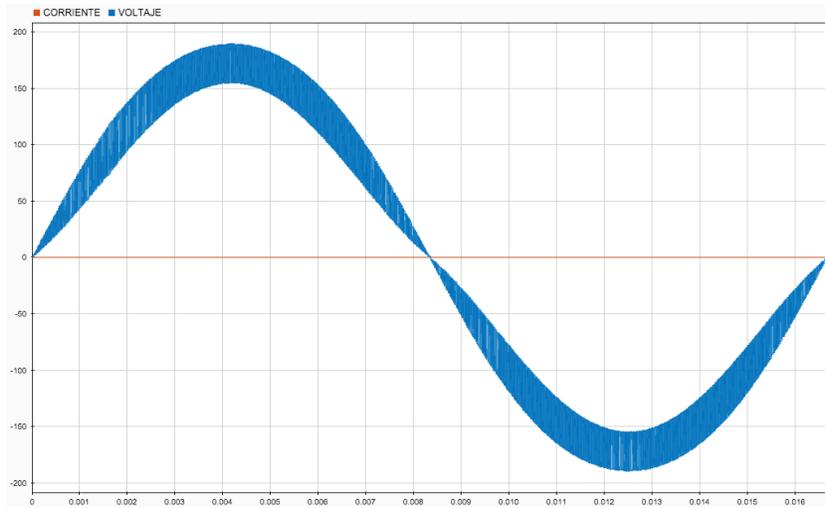


Figura 4.16 Voltaje de Salida del Inversor al aplicar una etapa de filtrado.  
Fuente: Autores

A continuación se muestran las simulaciones del voltaje de salida al variar la carga conectada al emulador. Las cargas a utilizar son: una puramente resistiva  $R=0.1\Omega$ , una carga RL en paralelo y un rectificador de media onda que alimenta a una resistencia.

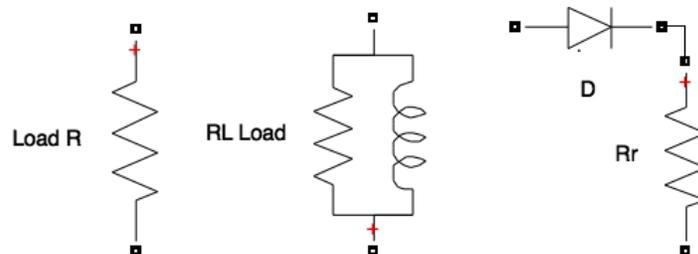


Figura 4.17 Cargas utilizadas para observar el comportamiento del voltaje de salida al aplicar un filtro LCL.  
Fuente: Autores

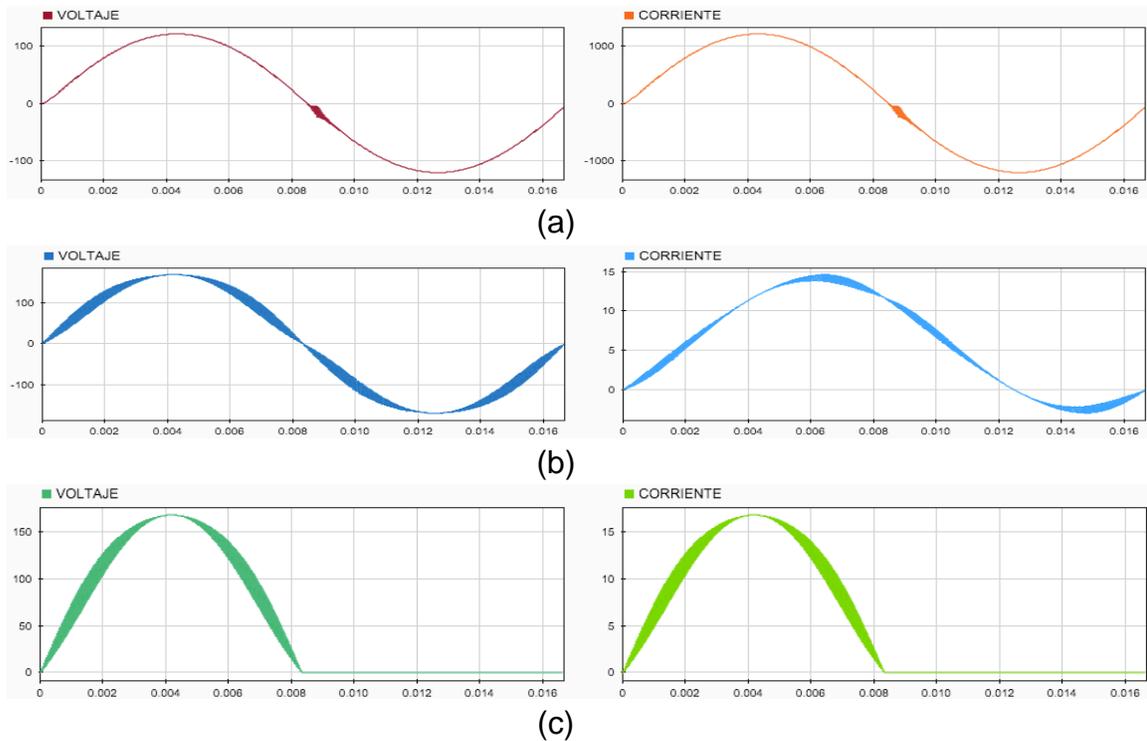


Figura 4.18 Comportamiento del voltaje y corriente de salida agregando el filtro LCL con cargas: (a) Resistencia de  $0.1\Omega$ , (b) Carga RL paralelo  $(7.9 + j20.9)\Omega$  y (c) Rectificador con una R de  $10\Omega$ .  
Fuente: Autores

#### 4.2.2 FILTRO RLC Serie - Pasa Banda

Debido a la presencia de armónicos residuales provocados por la frecuencia de corte tan alta utilizada en el diseño del filtro LCL, es necesario agregar una segunda etapa de filtrado.

El procedimiento utilizado en el diseño, cálculos y simulaciones es similar a lo realizado con el filtro LCL.

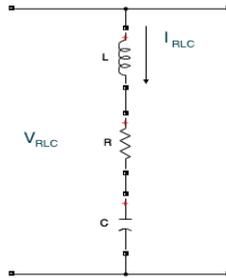


Figura 4.19 Esquema del Filtro RLC  
Fuente: Autores

#### 4.2.2.1 Función de Transferencia y Frecuencia del Filtro RLC.

Para encontrar la función de transferencia se utilizará la relación entre el voltaje  $V_{RLC}$  y la corriente  $I_{RLC}$ .

$$V_{RLC} = V_R + V_L + V_C \quad (5)$$

$$V_{RLC} = I_{RLC}(Z_R + Z_L + Z_C)$$

$$\frac{I_{RLC}}{V_{RLC}} = \frac{1}{(Z_R + Z_L + Z_C)}$$

$$\frac{I_{RLC}}{V_{RLC}} = \frac{1}{R + sL + \frac{1}{sC}}$$

$$\frac{I_{RLC}}{V_{RLC}} = \frac{sC}{sRC + s^2LC + 1}$$

La función de transferencia resultante queda de la forma:

$$F(s) = \frac{sC}{s^2LC + sRC + 1} \quad (6)$$

La frecuencia de resonancia  $\omega_0$  y el factor de calidad  $Q$ , definidos por:

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{1}{L \cdot C}} \quad (7) \quad y \quad Q = \sqrt{\frac{L}{C}} \cdot \frac{1}{R} \quad (8)$$

#### 4.2.2.2 Cálculo del Filtro RLC y Diagrama de Bode

$$C = 2\mu F$$

$$t_{rizado} = 0.001e^{-3} \text{seg}$$

Donde  $t_{rizado}$ , es el tiempo de duración de los armónicos presentes en la tensión de salida del filtro LCL.

$$\omega = 2\pi \cdot f = 2\pi \cdot (1/t_{rizado})$$

$$L = \frac{1}{\omega^2 C} \quad y \quad R = \sqrt{\frac{L}{C}} \cdot \frac{1}{Q}$$

$$L = 1.046e - 6 H = 1\mu H$$

$$R = 0.007 \Omega$$

#### 4.2.2.3 Diagrama de Bode simulados en MATLAB

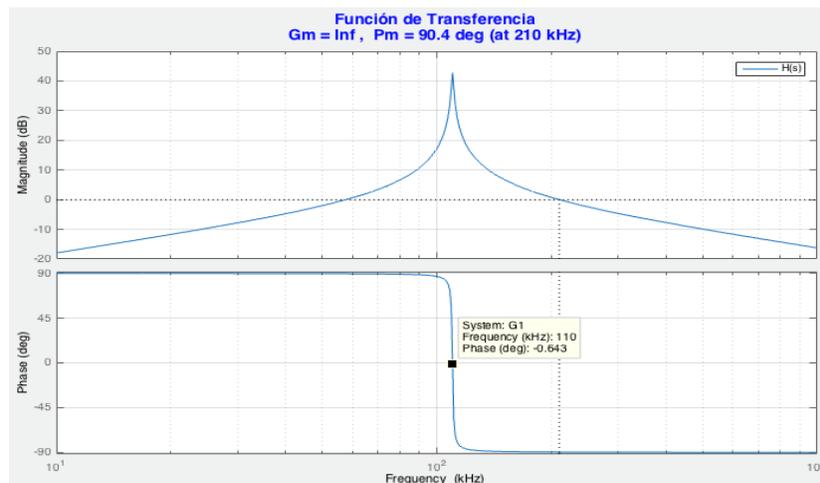


Figura 4.20 Diagrama de Bode del Filtro RLC.

Fuente: Autores

#### 4.2.2.4 Filtro Simulado en SIMULINK

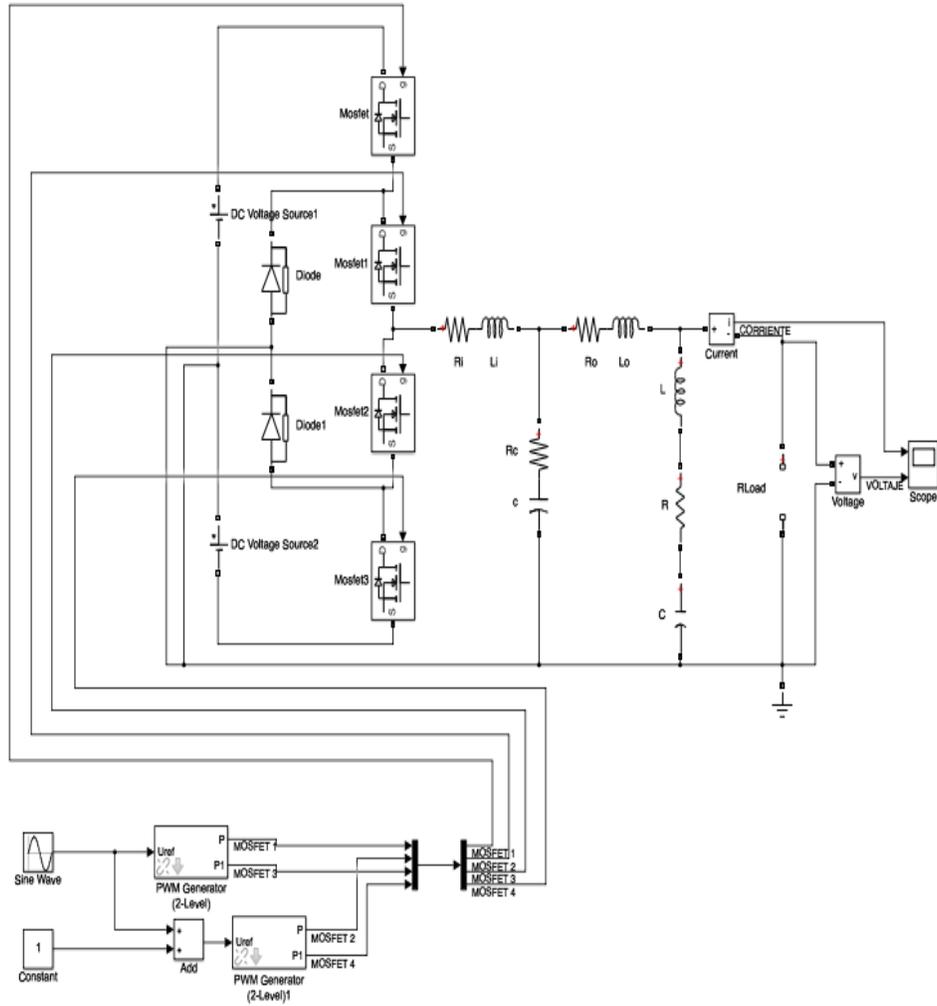


Figura 4.21 Esquema del Inversor con las dos etapas de filtrado, desarrollado y simulado en SIMULINK.

Fuente: Autores

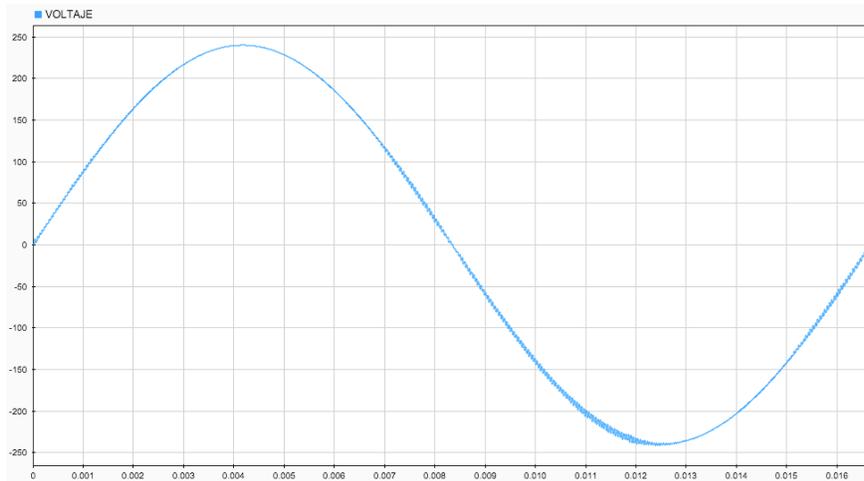
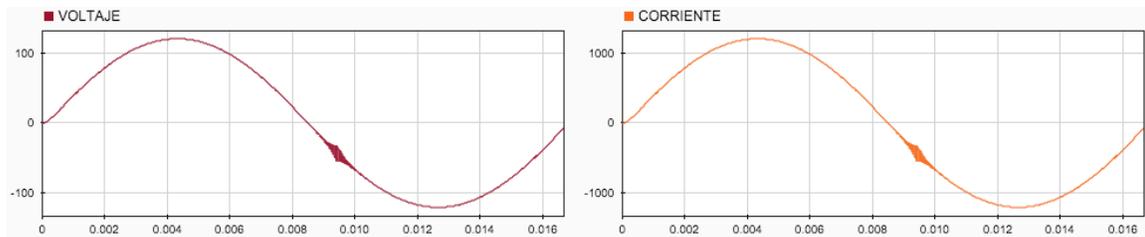


Figura 4.22 Voltaje de Salida del Inversor al aplicar las dos etapas de filtrado.  
Fuente: Autores

Si se compara esta forma de onda con la de la Figura 4.1 se puede observar claramente una mejora al eliminar ciertos armónicos residuales. La frecuencia escogida para esta segunda etapa debe permitir el paso de frecuencias necesarias para la generación de perturbaciones.

En la Figura 4.23 se observa el comportamiento del filtro al variar la carga.



(a)

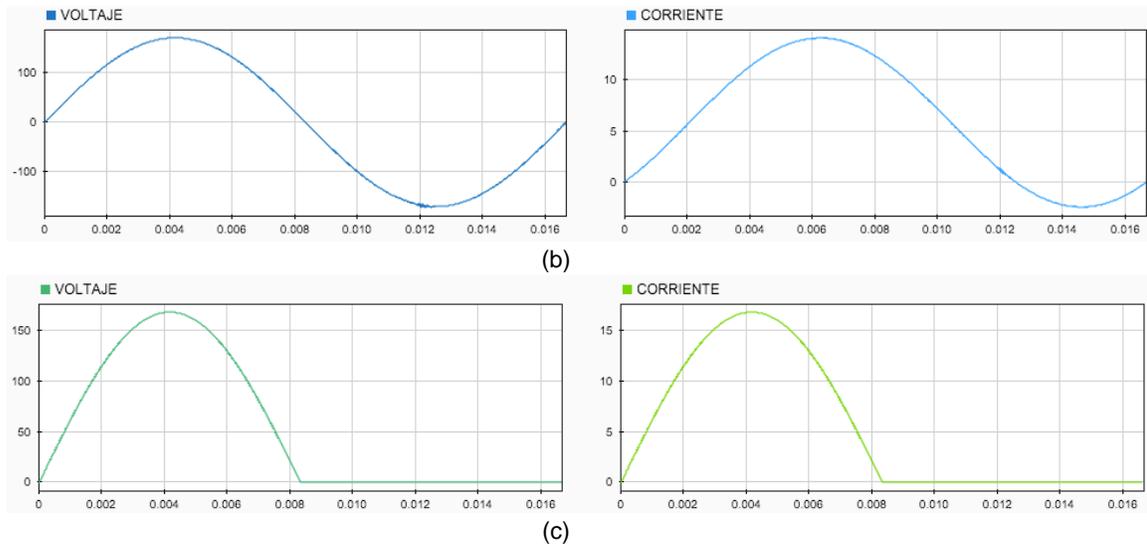


Figura 4.23 Comportamiento del voltaje y corriente de salida agregando los filtros LCL y RLC con cargas: (a) Resistencia de  $0.1\Omega$ , (b) Carga RL paralelo ( $7.9 + j20.9\Omega$ ) y (c) Rectificador con una R de  $10\Omega$ .

Fuente: Autores

### 4.3 GENERACIÓN DE PERTURBACIONES.

Para reproducir las perturbaciones mencionadas en [1], este trabajo propone modificar la señal moduladora usada en el bloque PWM mediante programación en MATLAB. En la Figura 4.24 se muestran el esquema de la señal de referencia modificada para obtener perturbaciones en el voltaje de salida del emulador de red.

El código en MATLAB viene programado en el bloque Matlab-Function, Este código de la perturbación permite modificar: la amplitud (Transitorios), el porcentaje (sobretensión, subtensión, armónicos, ruido), el ciclo de inicio, el tiempo de inicio (entre 0 y 6ms en transitorios), el tiempo o los ciclos de duración a la perturbación, el orden de armónico y, el ángulo de desfase (armónicos).

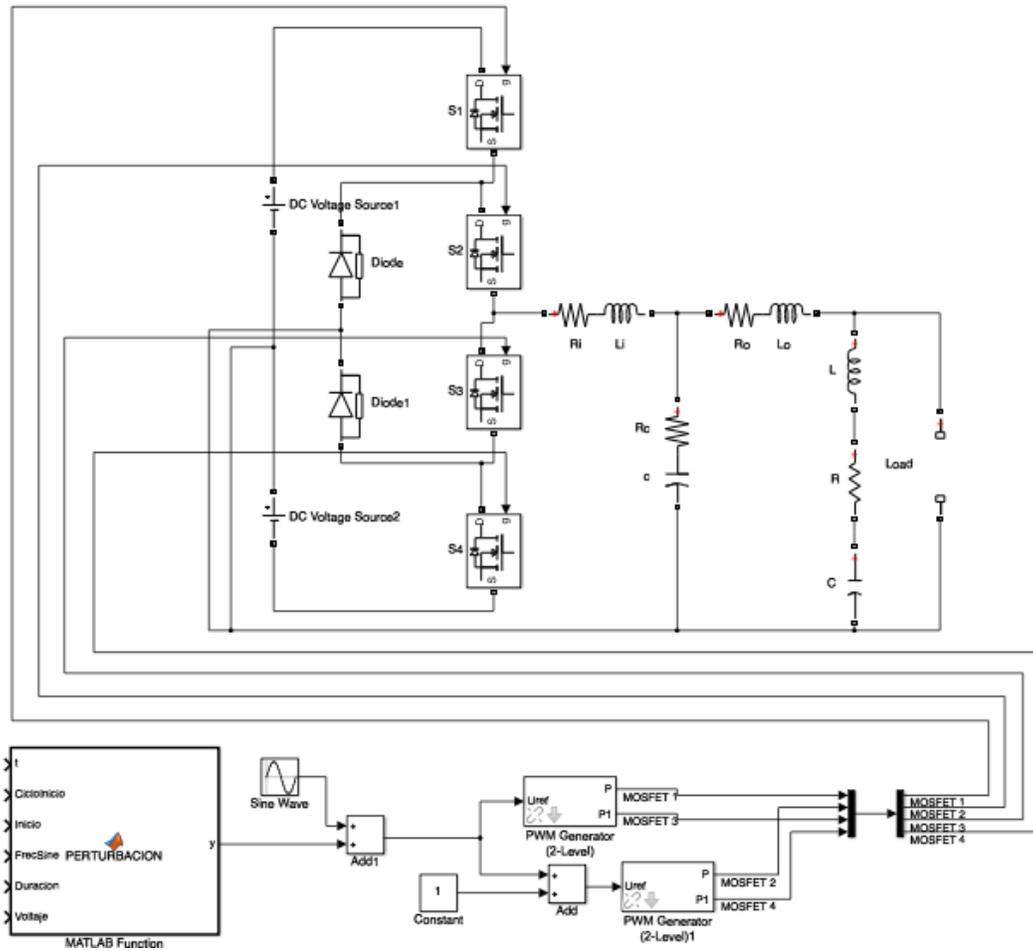


Figura 4.24 Esquema de la adición de las perturbaciones, desarrollado y simulado en SIMULINK.  
Fuente: Autores

La tensión de salida para todas las simulaciones, es de 170(V) de voltaje pico y 60Hz.

En la Figura 4.25 se pueden observar las simulaciones del voltaje de salida del emulador afectado por las distintas perturbaciones programadas, donde:

- a) **Transitorios Impulsivo y Oscilatorio:** En la Figura 4.25 se muestra la simulación de la forma de onda de la tensión a la salida del emulador afectado en por dos transitorios. El Transitorio impulsivo es programado para que suceda en el segundo ciclo después de 0.0042 seg, con un tiempo de duración de 2ms y con una amplitud de 30(V). El Transitorio oscilatorio sucede en el tercer ciclo después de 0.0042 seg, con un tiempo de duración de 4ms y con una amplitud de 30(V).

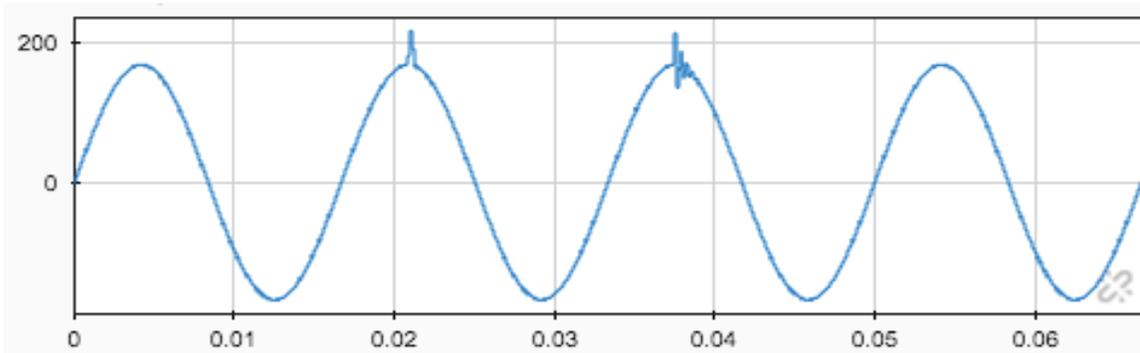


Figura 4.25 Simulación del voltaje de salida afectado por Transitorios.

Fuente: Autores

- b) **Variación de Frecuencia e Interrupción:** En la Figura 4.26 se muestran los efectos de la adición de una variación de frecuencia y una interrupción en la forma de onda de la tensión. La variación de frecuencia esta programada para que inicie en el segundo ciclo, con cinco ciclos de duración y una variación de frecuencia de  $\pm 16 Hz$ . La interrupción se programó de tal forma que inicie luego de la variación de frecuencia en el séptimo ciclo y tenga dos ciclos de duración.

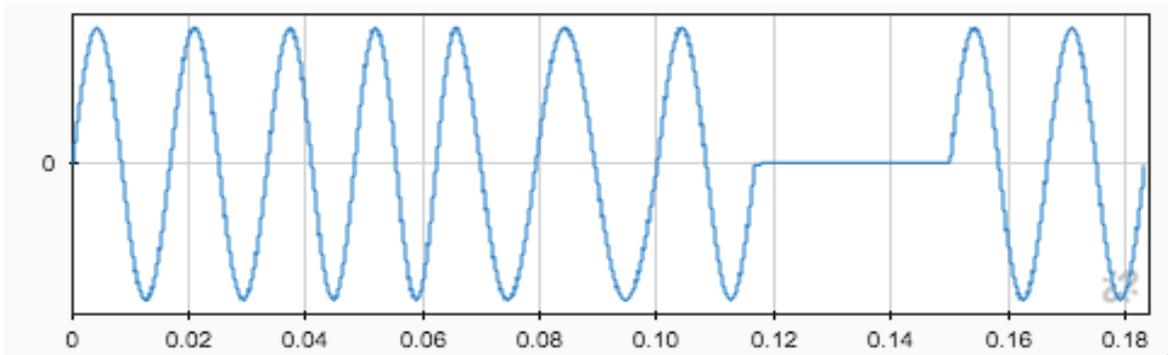


Figura 4.26 Simulación del voltaje de salida afectado por una variación de frecuencia y una interrupción.

Fuente: Autores

- c) **Sobretensión:** El comportamiento de la sobretensión esta programado de forma que inicie en el cuarto ciclo después de 0.004 seg, con una duración de 6 ciclos y un porcentaje del +20% de amplitud. En la Figura 4.27 se puede observar como se generan transitorios al momento de la aparición de la sobretensión, efecto similar al que generalmente se tiene en la red de distribución eléctrica.

d)

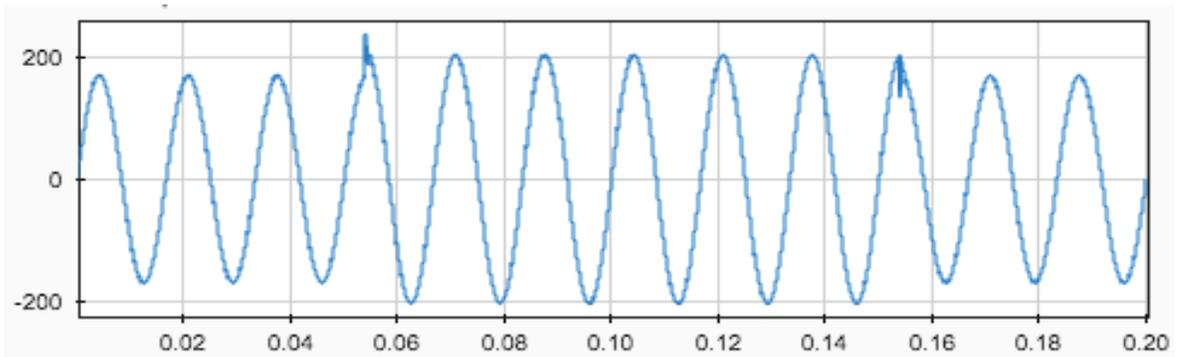


Figura 4.27 Simulación del voltaje de salida afectado por una Sobretensión.

Fuente: Autores

- e) **Subtensión:** En la Figura 4.28 se observa una subtensión o caída de tensión que inicia en el cuarto ciclo de duración después de 0.004 seg, con una duración de 6 ciclos y un porcentaje del -20% de amplitud. El efecto de aparición de transitorios es similar al de la sobretensión.

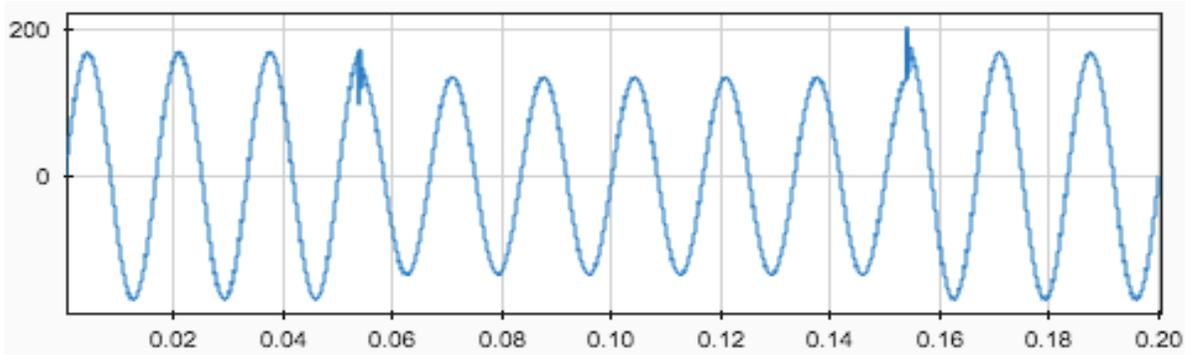


Figura 4.28 Simulación del voltaje de salida afectado por una Subtensión.  
Fuente: Autores

- f) **Armónicos y Ruido:** La Figura 4.29 se observa la tensión de salida afectada por un séptimo armónico desfasado  $10^\circ$  que inicia en el segundo ciclo de 3 ciclos de duración y un ruido que aparece en el quinto ciclo con una duración de dos ciclos.

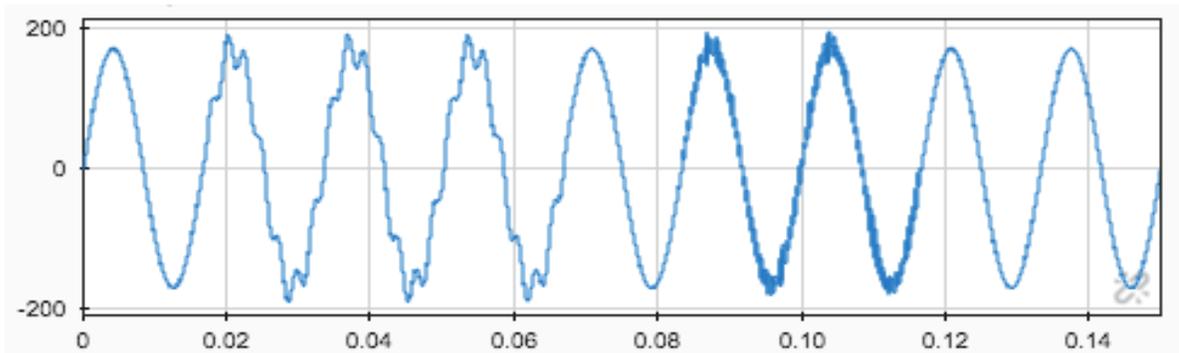


Figura 4.29 Simulación del voltaje de salida afectado por Armónicos y Ruido.  
Fuente: Autores

- g) Flicker:** Una fluctuación de voltaje de  $\pm 40V$  respecto al voltaje de salida de  $170V$  programada para que inicie en el segundo ciclo y que tenga 16 ciclos de duración se muestra en la Figura 4.30.

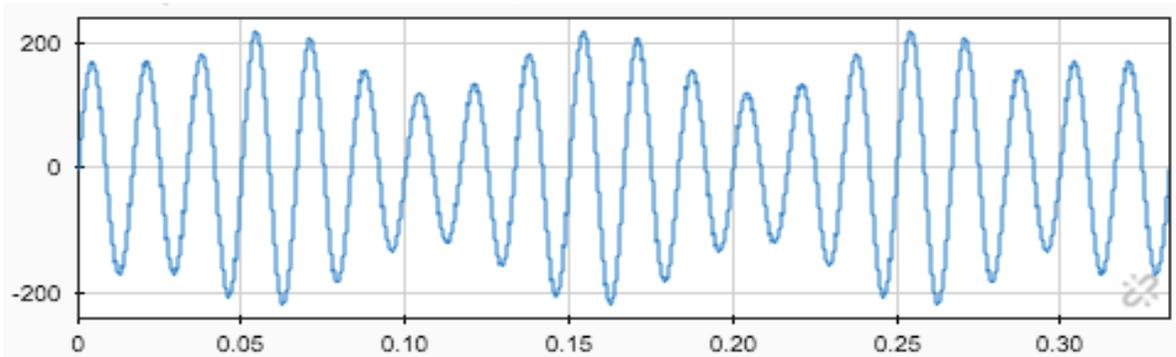


Figura 4.30 Simulación del voltaje de salida afectado por una fluctuación de voltaje.

Fuente: Autores

#### 4.4 COMPENSACIÓN DE NO IDEALIDADES

Como no idealidades se plantean dos casos: el primero es la existencia de una resistencia interna y una reactancia inductiva generalmente presentes en un generador síncrono, mientras el segundo caso se trata el conocido tiempo muerto que se presenta como el tiempo de espera en la conmutación de un interruptor respecto a otro. Ambas no idealidades producen pérdidas en el voltaje de salida.

Para la emulación de resistencia y reactancia no se realizará ninguna compensación ya que interesa ver el efecto de ellas en el emulador.

Para el tiempo muerto, en cambio, se realiza la compensación para recuperar el voltaje perdido. Esta compensación se da al realizar un offset a la señal de referencia tanto para el semiciclo positivo como para el negativo.

Para la emulación de este fenómeno se realiza la medición de la corriente que circula por la carga conectada al emulador, la cual permite calcular el voltaje consumido por la resistencia y reactancia del generador. El voltaje

calculado es retroalimentado a la señal moduladora para modificar su amplitud, simulando el efecto deseado.

En la Figura 4.31 se simula el voltaje de salida con transitorios y en esta se puede observar el efecto al considerar una resistencia de  $0.8\Omega$  y una reactancia inductiva de  $0.7\Omega$ .

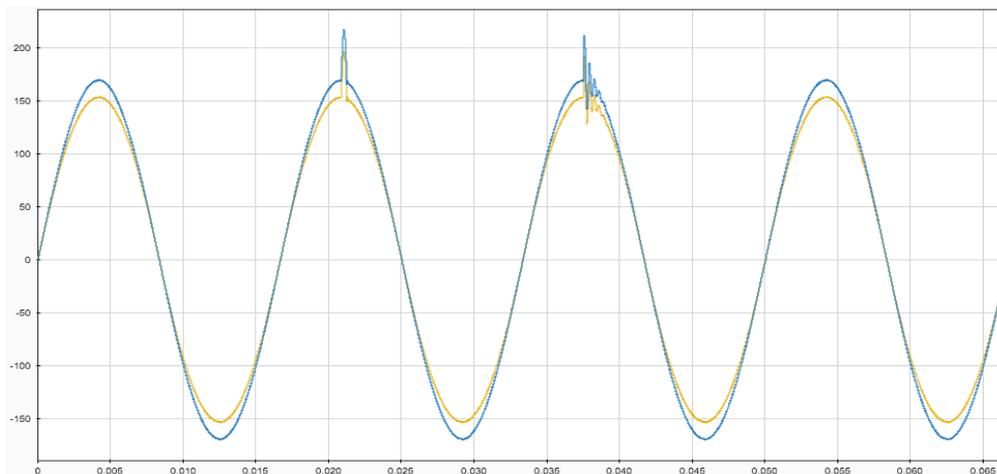


Figura 4.31 Emulación de Resistencia y Reactancia Inductiva del Generador: Azul - sin considerar y Amarillo - considerando estos parámetros.

Fuente: Autores

La adición y compensación del tiempo muerto  $t_m = 1e^{-6}seg$  son simulados en la Figura 4.32. Donde se puede observar como aumenta el voltaje de salida al realizar la compensación.

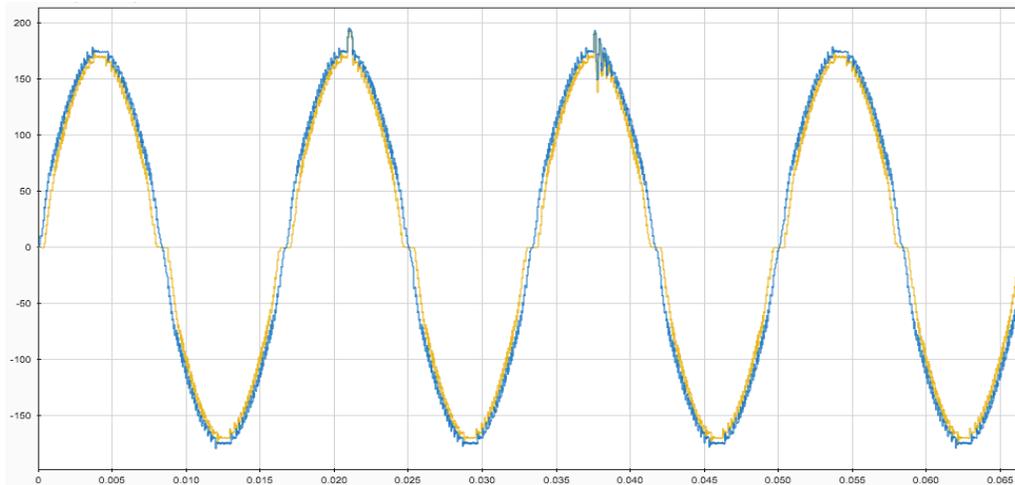


Figura 4.32 Emulación del Tiempo Muerto: Azul - Compensado y Amarillo - sin compensar.  
Fuente: Autores

#### 4.5 SIMULACIONES DEL COMPORTAMIENTO DEL EMULADOR CON VARIACIÓN DE CARGA.

Las siguientes simulaciones son para comprobar el funcionamiento del emulador considerando todos los aspectos antes mencionados. Para ello se hace uso de distintas cargas para la simulación de cada perturbación. Por motivos de visualización se desfasa  $90^\circ$  entre cada voltaje de salida simulado.

Las características de perturbaciones, los valores del tiempo muerto y de la resistencia y reactancia del generador son tomados de las simulaciones anteriores.

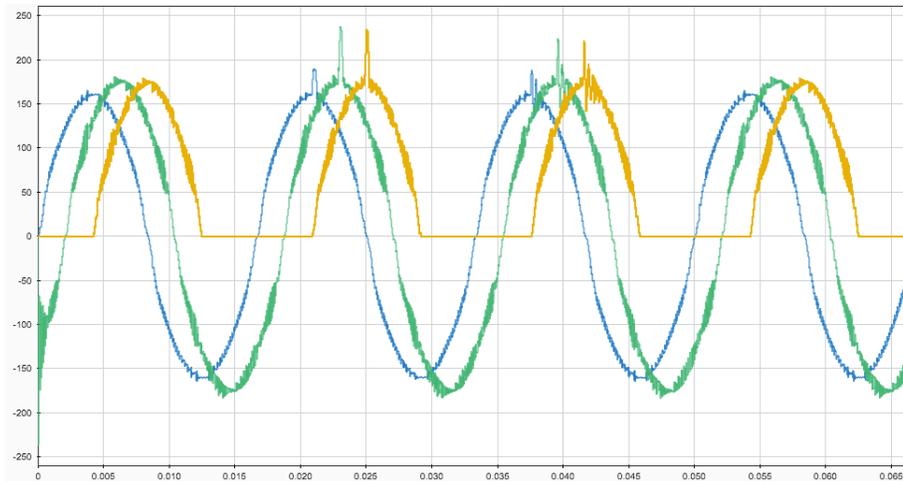


Figura 4.33 Simulación del Voltaje de Salida de emulador con Transitorios: Azul - Carga R 10Ω, Verde – Carga RL Paralelo (7.9+ j20.9)Ω y, Amarillo – Carga Rectificador con R100Ω.  
Fuente: Autores

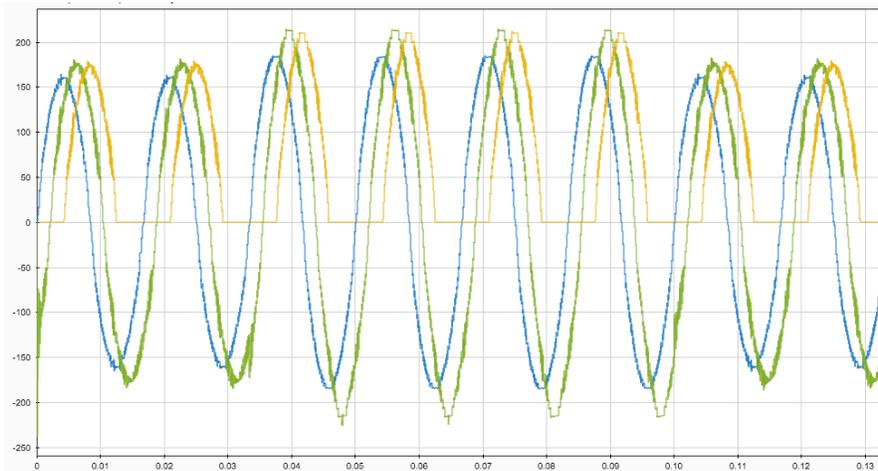


Figura 4.34 Simulación del Voltaje de Salida de emulador con Sobretensión: Azul - Carga R 10Ω, Verde – Carga RL Paralelo (7.9+ j20.9)Ω y, Amarillo – Carga Rectificador con R100Ω.  
Fuente: Autores

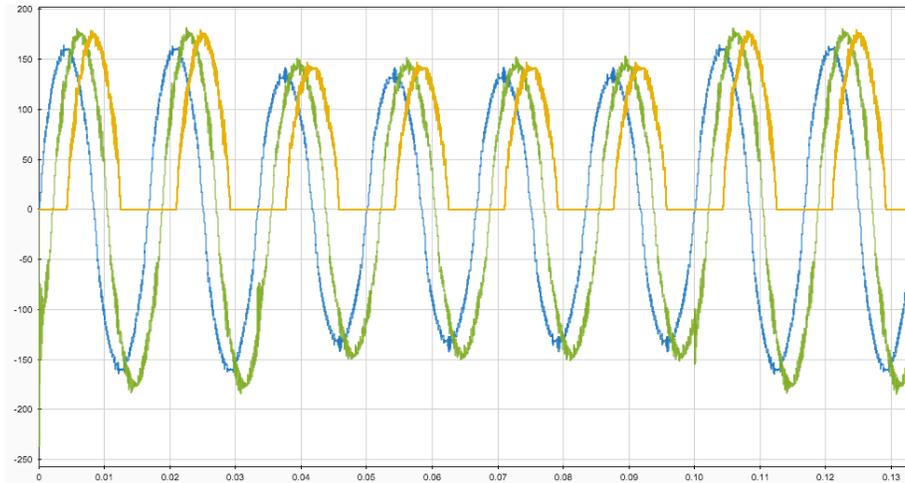


Figura 4.35 Simulación del Voltaje de Salida de emulador con Subtensión: Azul - Carga R 10Ω, Verde – Carga RL Paralelo (7.9+ j20.9)Ω y, Amarillo – Carga Rectificador con R100Ω.  
Fuente: Autores

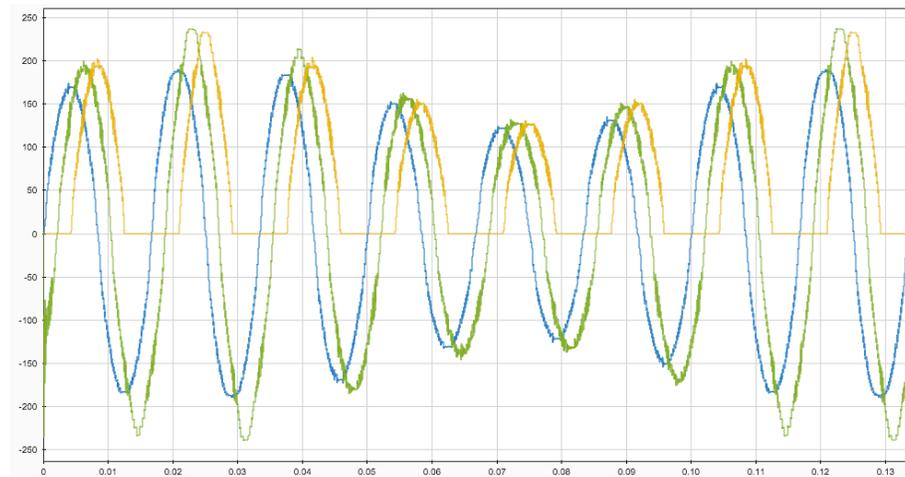


Figura 4.36 Simulación del Voltaje de Salida de emulador con Fluctuación de Voltaje: Azul - Carga R 10Ω, Verde – Carga RL Paralelo (7.9+ j20.9)Ω y, Amarillo – Carga Rectificador con R100Ω.  
Fuente: Autores

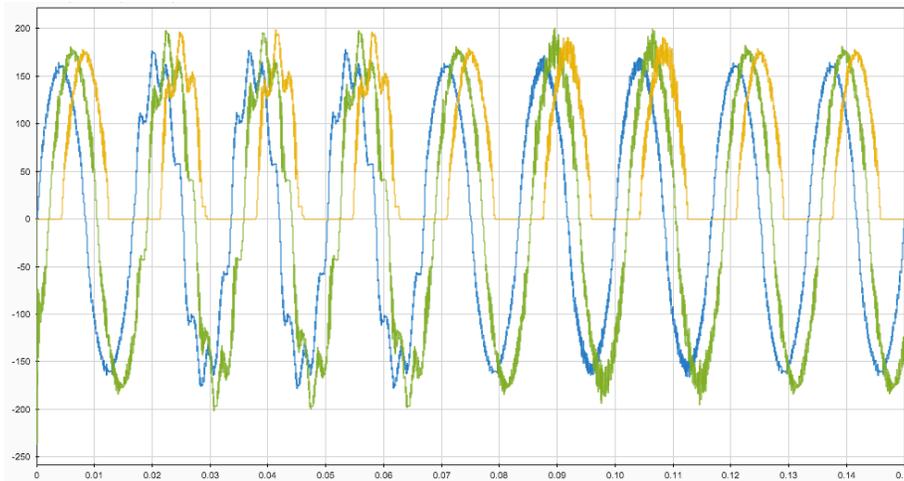


Figura 4.37 Simulación del Voltaje de Salida de emulador con Armónicos y Ruido: Azul - Carga R 10Ω, Verde – Carga RL Paralelo (7.9+ j20.9)Ω y, Amarillo – Carga Rectificador con R100Ω.  
Fuente: Autores

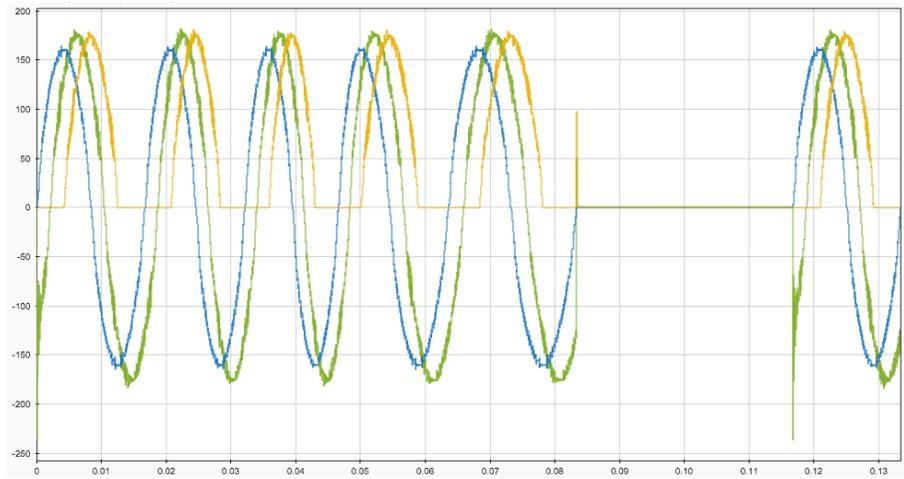


Figura 4.38 Simulación del Voltaje de Salida de emulador con Variación de Frecuencia e Interrupción: Azul - Carga R 10Ω, Verde – Carga RL Paralelo (7.9+ j20.9) Ω y, Amarillo – Carga Rectificador con R100Ω.  
Fuente: Autores

#### 4.6 ESTIMACIÓN DE COSTOS DE IMPLEMENTACIÓN.

Con las simulaciones realizadas se ha podido observar un adecuado funcionamiento del diseño del emulador, por lo se puede hacer una estimación del costo que tomaría realizar la implementación circuital del proyecto.

La consulta del costo de cada componente se lo puede hacer en las referencias [25] y [26].

Los componentes para cada etapa del emulador se describen a continuación:

- Etapa de Potencia: MOSFETs, Inductores, Resistencia y Condensadores.
- Etapa de Control: Tarjeta que permita realizar la programación de perturbaciones y retroalimentación de corriente.

En la Figura 4.39 se observa el costo de adquisición de los componentes MOSFETs y la tarjeta de control. Las características principales de los componentes se detallan en la Tabla 4.4. La consulta de costos de los componentes está realizada en [25].

El costo de los componentes pasivos necesarios para la etapa potencia tomados de [26] se muestran en la Figura 4.40 y sus datos se detallan en la Tabla 4.4.

Índice	Cantidad	Imagen	Número de pieza	Descripción	Referencia del cliente	Cantidad disponible	Cantidad en espera	Precio unitario	Precio total
<input checked="" type="checkbox"/> 1	<input type="text" value="4"/>		<a href="#">JPZ60R099C7XKSA1-ND</a>	MOSFET N-CH 600V 22A TO247-4	<input type="text"/>	4 Inmediata	0	8.28000	\$33.12
<input checked="" type="checkbox"/> 2	<input type="text" value="1"/>		<a href="#">296-42484-ND</a>	LAUNCH PAD C2000	<input type="text"/>	0 Inmediata	1 <a href="#">Tiempo de entrega</a>	30.08000	\$30.08
								Subtotal	\$63.20
								Envío	<a href="#">Calcular</a>
								Impuestos de venta 	Desconocido
								Total	Desconocido

Figura 4.39 Costos de MOSFET N y Tarjeta de Control.

Fuente: [24]

Borrar	Detalle de los productos	N.º de artículo del cliente:	Cantidad pedida	Precio (USD)	Ext. (USD)
<input type="checkbox"/>	<b>Mouser N.º:</b> 512-RHRG3060CC <a href="#">QuickView</a> <b>Fabricante:</b> RHRG3060CC <b>N.º:</b> <b>Fabricante:</b> Fairchild Semiconductor <b>Desc.:</b> Diodos - Propósito general, Energía, Conmutación 30A 600V <b>RoHS:</b> En conformidad con la RoHS	<input type="text"/>	<input type="text" value="2"/> <b>Disponibilidad</b> 2 Se envía ahora	\$3.75	\$7.50
<input type="checkbox"/>	<b>Mouser N.º:</b> 588-TGHGCR0100FE <a href="#">QuickView</a> <b>Fabricante:</b> TGHGCR0100FE <b>N.º:</b> <b>Fabricante:</b> Ohmite <b>Desc.:</b> Resistores de detección de corriente - a través de orificio .01ohm 100watt 1% High Power <b>RoHS:</b> En conformidad con la RoHS	<input type="text"/>	<input type="text" value="4"/> <b>Disponibilidad</b> 4 Se envía ahora	\$23.98	\$95.92
<input type="checkbox"/>	<b>Mouser N.º:</b> 80-C4BSNBX4200ZALJ <a href="#">QuickView</a> <b>Fabricante:</b> C4BSNBX4200ZALJ <b>N.º:</b> <b>Fabricante:</b> Kemet <b>Desc.:</b> Capacitores de películas 1000volts 2uF 5% 1000volts 2uF 5% <b>RoHS:</b> En conformidad con la RoHS <b>Información:</b> Ver información adicional del producto	<input type="text"/>	<input type="text" value="2"/> <b>Disponibilidad</b> 2 Se envía ahora	\$11.20	\$22.40
<input type="checkbox"/>	<b>Mouser N.º:</b> 710-7443310100 <a href="#">QuickView</a> <b>Fabricante:</b> 7443310100 <b>N.º:</b> <b>Fabricante:</b> Wurth Electronics <b>Desc.:</b> Inductores fijos WE-HCC HCur Cube1210 100kHz 10mA <b>RoHS:</b> En conformidad con la RoHS	<input type="text"/>	<input type="text" value="1"/> <b>Opción de embalaje:</b> Cinta cortada <b>Disponibilidad</b> 1 Se envía ahora	\$3.02	\$3.02
<input type="checkbox"/>	<b>Mouser N.º:</b> 871-B82559A7103A025 <a href="#">QuickView</a> <b>Fabricante:</b> B82559A7103A025 <b>N.º:</b> <b>Fabricante:</b> EPCOS / TDK <b>Desc.:</b> Inductores fijos 10uH 24A 7% 23.5x23.5mm SMD <b>RoHS:</b> En conformidad con la RoHS	<input type="text"/>	<input type="text" value="2"/> <b>Opción de embalaje:</b> Cinta cortada <b>Disponibilidad</b> 2 Se envía ahora	\$10.13	\$20.26

Al enviar su pedido, usted acepta estos <a href="#">términos y condiciones</a> . Para obtener más información acerca de la disponibilidad, haga clic en el N.º de artículo de Mouser.	<b>TOTAL DE LA MERCADERÍA : \$149.10</b> <b>GASTOS DE ENVÍO : \$35.00</b> <b>TOTAL DEL PEDIDO : \$184.10</b>
--	--

Figura 4.40 Costos de Componentes Pasivos de la etapa de Potencia  
Fuente: [25]

Componente	Tipo	Tipo Montaje	Fabricante	Características Electricas		Precio (USD)
				Vdss	600V	
MOSFET N	Canal N, oxido Metalico	Orificio Pasante	Infineon Technologies	Id	22A	8.28
LAUNCH PAD C2000	DSP, C28x	Fija	Texas Instruments			30.08
Condensador	Dielectrico Polypropylene		Kernet	VAC	600V	11.20
				Capacitancia	2 $\mu$ F	
Inductor	Power Inductor/100KHz	Fijo	Wurth Electronics	Cm $\acute{a}$ x	21A	3.02
				Inductancia	1 $\mu$ H	
Inductor	Power Inductor	Fijo	EPCOS/TKD	Cm $\acute{a}$ x	24A	10.13
				Inductancia	10 $\mu$ H	
Resistencias	Precision Current Sense Resistor		Ohmite	P	100W	23,98
				Resistencia	0.01 $\Omega$	
Diodos			Fairchild Semiconductor	Ti max	600v	3.75
				If	30A	

Tabla 4.4 Características de los componentes necesarios para la implementación circuital.

Fuente: Autores

Cantidad	Componente	Precio (USD)	Precio
4	MOSFET N	\$ 8,28	\$ 33,12
1	LAUNCH PAD C2000	\$ 30,08	\$ 30,08
2	Condensador	\$ 11,20	\$ 22,40
1	Inductor	\$ 3,02	\$ 3,02
2	Inductor	\$ 10,13	\$ 20,26
4	Resistencias	\$ 23,98	\$ 95,92
2	Diodos	\$ 3,75	\$ 7,50
		Subtotal	\$ 212,30
		Envio	\$ 58,78
		Total	\$ 271,08

Tabla 4.5 Precio de los componentes necesarios para la implementación circuital.

Fuente: Autores

El precio de los componentes para la implementación circuital alcanzan los \$ 271,08 incluyendo gastos de envío. Los precios dados en la Tabla 4.5 pueden variar si es que se realiza una compra con más números de componentes.

Hay que aclarar que el costo final de construcción puede variar debido que en este trabajo no se considera el costo que tomaría la fabricación del PCB ni el diseño de la misma. Así también al momento de la construcción pueden presentarse parámetros que no se pueden ver en el diseño del emulador en SIMULINK, como el mal funcionamiento de los interruptores para lo que se incluiría una etapa de detección y corrección de fallas de estos dispositivos [27].

## CAPITULO 5. CONCLUSIONES RECOMENDACIONES

Y

- Disponer un emulador de tensión de red permitirá realizar pruebas de funcionamiento no solo a sistemas inversores para los cuales se realizó este proyecto sino también a sistemas que se conectan a la red, de tal forma que se pueda observar en un ambiente controlado cómo reaccionan estos sistemas a distintos tipos de perturbaciones que generalmente se presentan en la red sin presentar riesgos de daño en los equipos o en el personal.
- De las topologías estudiadas se optó por la Neutral Point Clamped ó Punto Neutro Aterrado, debido a las características y ventajas que posee. Una de las principales ventajas es que tiene el punto medio conectado a tierra, pudiendo tener en la salida del inversor 3 niveles de tensión  $+V_D$ ,  $-V_D$  y 0.
- La primera etapa de filtrado permite eliminar los armónicos generados en la modulación PWM, para su diseño se debe de tener en cuenta una frecuencia de corte en el rango de los kHz debido a que las perturbaciones a reproducir en la salida del emulador tienen tiempos de ocurrencia excesivamente pequeños (en el rango de los milisegundos e incluso nanosegundos). Debido al uso de esta elevada frecuencia de corte el voltaje de salida al implementar esta etapa de filtrado continúa presentando armónicos residuales, es por esto, que es necesario implementar una segunda etapa de filtrado donde la frecuencia de corte permita el paso de las frecuencias necesarias para las perturbaciones. Para escoger una adecuada frecuencia de corte es necesario ir simulando el comportamiento del voltaje de salida con las perturbaciones de menor duración. Los filtros LCL y RLC ocupados en la primera y segunda etapa, respectivamente, son usados debido a su baja tasa de distorsión armónica, menor tamaño y peso respecto a otros filtros.
- El método ocupado en este trabajo para la generación de anomalías en la red, consistió en modificar la señal de referencia programándola para que presente las perturbaciones, las características de las perturbaciones fueron tomadas de la norma de la IEEE std 1159 - 2009. La perturbación adecuada

para realizar pruebas de funcionamiento del emulador es el transitorio impulsivo debido a su corto periodo de duración y a su elevada amplitud.

- Al empezar este proyecto se tomó por objetivo general el diseño de un emulador que permita generar una tensión equivalente a la red con el agregado de perturbaciones. Conforme se lo fue desarrollando surgieron temas que requirieron un estudio adicional para complementar y elevar el valor del proyecto como, por ejemplo, la influencia del tiempo muerto insertado por el modulador PWM por la conmutación en los MOSFETs y los parámetros de resistencia y reactancia inductiva presentes en generadores. Estos fenómenos fueron simulados y compensados con una respuesta satisfactoria del emulador.
- Para comprobar el funcionamiento del emulador fue necesario realizar varias pruebas al vacío y ante la presencia de diferentes tipos de cargas, donde las características del comportamiento del emulador estuvieron en el rango deseado.
- Así este proyecto comprobó la idea de generación de perturbaciones modificando la señal de referencia PWM, lo que permite pensar en su posible implementación circuital con un relativo bajo coste de construcción. Hay que aclarar que el costo calculado es solo una aproximación del costo real de implementación, ya que no se consideran aspectos como la construcción de la tarjeta impresa PCB y sistemas de ventilación y refrigeración.

## REFERENCIAS

- [1] “Atlas Solar de Ecuador con fines de generación eléctrica” CONELEC Consejo Nacional de Electricidad, Corporación para la Investigación Energética, Quito 2008.
- [2] “Energía solar mundial y de la UE”, The Sustainable Solar Energy Initiative for Europe, EU ProSun.
- [3] Información Estadística Julio 2015, CONELEC Consejo Nacional de Electricidad.
- [4] Gimeno Sales, Francisco J, “Convertidores Electrónicos: Energía solar fotovoltaica, aplicaciones y diseño”, Editorial de la Universidad Politécnica de Valencia, España 2011.
- [5] Elías Castells, “Energías renovables”, Ediciones Díaz de Santos, 2012.
- [6] Pedro Fernández Díez, “Energía Maremotérmica”, Departamento De Ingeniería Eléctrica Y Energética, Universidad de Cantabria.
- [7] Creus, Antonio “Energías renovables”, Editorial Cano Pina, Segunda Edición, 2009.
- [8] Tobajas, Manuel Carlos, “Instalaciones solares fotovoltaicas”, Editorial Cano Pina, 2012.
- [9] Proyecto EnDev/GIZ, “Manual de instalación de un sistema fotovoltaico domiciliario”, Proyecto Energía - Desarrollo y Vida, Lima, 2013.
- [10] Carpio Ibáñez, José Camiña & Juan Torres, “Alimentación de Cargas Críticas y Calidad de la Energía Eléctrica”, Universidad Nacional de Educación a Distancia UNED, 2013.
- [11] Oriol Boix, Felipe Córcoles, Luis Sainz & Frances Suelves, “Tecnología Eléctrica”, Escuela Técnica Superior de Barcelona, Ediciones Cano Pina, 2009.

- [12] Torresi & Alberto A, “*Sobretensiones: coordinación de la aislación*”, Jorge Sarmiento Editor – Universitas, 2003.
- [13] Martínez Velasco & Juan A, “*Coordinación de aislamiento en redes eléctricas de alta tensión*”, McGraw-Hill España, 2003.
- [14] Joseph Seymour & Terry Horsley, “*Los siete tipos de problemas en el sistema eléctrico*”, informe interno N°18, APC Legendary Reliability.
- [15] Anibal Vargas Lopez, “*Subtensiones y su impacto económico en la calidad de energía e industria Guatemalteca*”, Universidad de San Carlos de Guatemala, Facultad de Ingeniería, 2005.
- [16] Jara Christian, Pablo Galarza “*Simulación y evaluación de sistemas fotovoltaicos residenciales conectados a la red eléctrica*”, Universidad Politécnica Salesiana, Dic 2015, <http://dspace.ups.edu.ec/handle/123456789/11353>.
- [17] Rashid, M. H., Gonzalez, M. H., & Fernandez, “*Electrónica de potencia: circuitos, dispositivos y aplicaciones*”, Pearson Education P. A. (2004).
- [18] IEEE *Grid Converters for Photovoltaic and Wind Power Systems*. Remus Teodorescu, Marco Liserre and Pedro Rodríguez
- [19] Alzate Gómez, Alfonso, Trejos G., Luz Adriana, “*Simulación De Un Inversor Trifásico Multinivel Con Fijación Por Diodos Usando Simulink De Matlab*”, Scientia Et Technica 2010.
- [20] IEEE Recommending Practice for monitoring electric power quality, IEEE POWER & Energy society, IEEE std 1159 - 2009.
- [21] Akira Nabae, Iso Takahashi, Hirofumi Akagi, “A new neutral point clamped PWM Inverter”, IEEE Transactions on Industry Applications, September/October 1981.
- [22] A.Reznik, M. Godoy, Ahmed Al-Durra, M. Muyeen, “LCL Filter Design and Performance Analysis for Grid Interconnected Systems”, IEEE Transactions on Industry Applications, 2014.

[24] Julio Viola, José Restrepo, Flavio Quizhpi, José Aller, "Predictive control of a three phase power converter coupled with LCL filter", Industrila Technology (ICIT)

[25] Página de compra de componentes electrónicos <http://www.digikey.com>

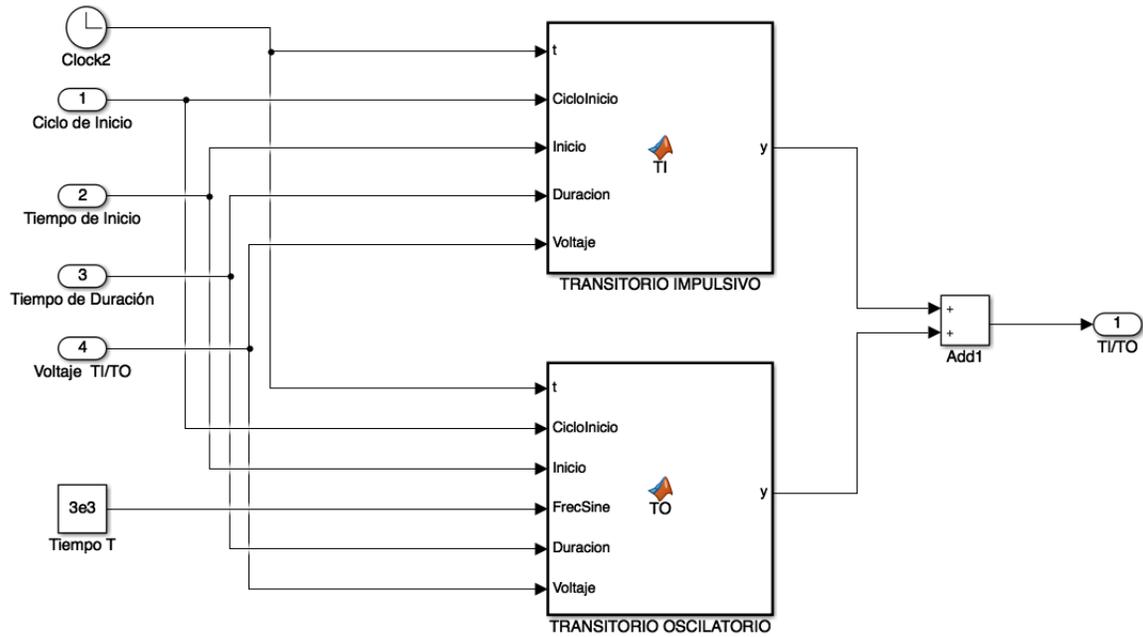
[26] Página de compra de componentes electrónicos <http://www.mouser.com>

[27] Alexis llanos, David Saavedra, "*Detección de fallas y corrección en tiempo real de un inversor trifásico multinivel de dos etapas controlado por modulación vectorial*", Universidad Politécnica Salesiana, Enero 2014.

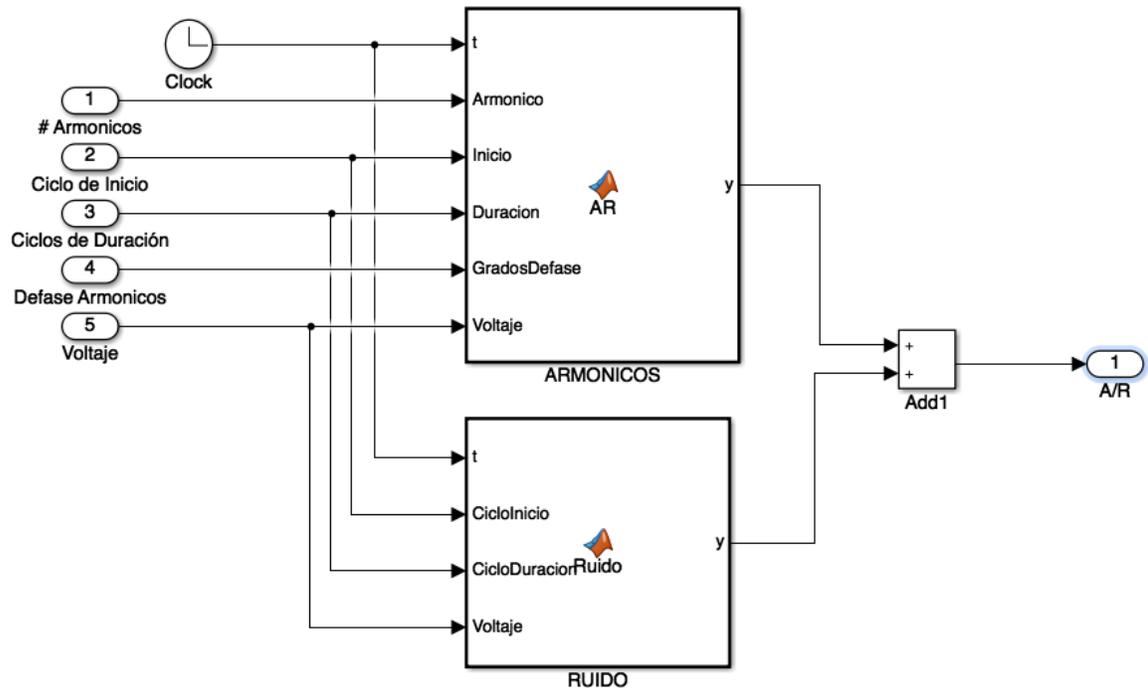
# ANEXOS



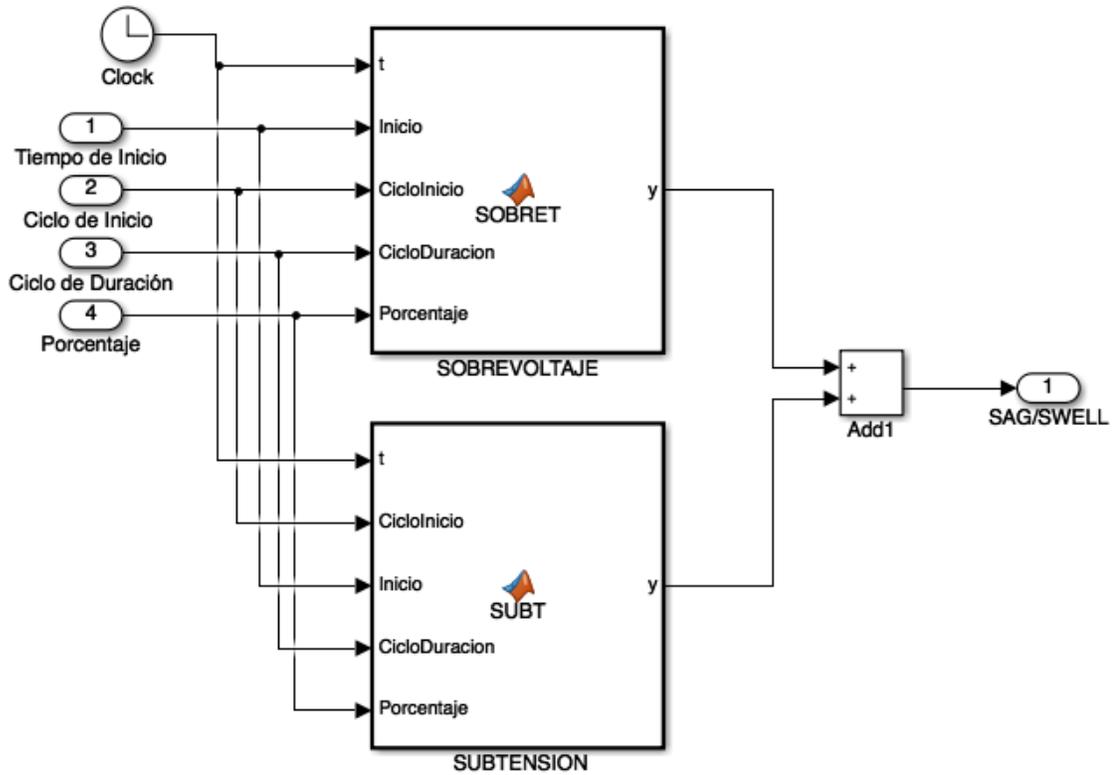
**ANEXO II. DIAGRAMA DE BLOQUES DE PERTURBACIONES EN SIMULINK DE MATLAB® - TRANSITORIOS.**



**ANEXO III. DIAGRAMA DE BLOQUES DE PERTURBACIONES EN SIMULINK DE MATLAB® - ARMÓNICOS Y RUIDO .**



**ANEXO IV. DIAGRAMA DE BLOQUES DE PERTURBACIONES EN SIMULINK DE MATLAB® - SOBRETENSIONES Y SUBTENSIONES.**



**ANEXO V. DIAGRAMA DE BLOQUES DE PERTURBACIONES EN SIMULINK DE MATLAB® - FLUCTUACIÓN DE VOLTAJE.**

