



UNIVERSIDAD DE PAMPLONA
FACULTAD DE INGENIERÍAS Y ARQUITECTURA

HERRAMIENTA EDUCATIVA PARA EL ANÁLISIS Y GENERACIÓN DE ARMÓNICOS EN REDES ELÉCTRICAS

Autor

JULIETH XIMENA VELANDIA GUTIÉRREZ

**PROGRAMA DE INGENIERIA ELÉCTRICA
DEPARTAMENTO DE INGENIERIAS ELÉCTRICA,
ELECTRÓNICA, SISTEMAS Y TELECOMUNICACIONES
FACULTAD DE INGENIERIAS Y ARQUITECTURAS**



UNIVERSIDAD DE PAMPLONA
PAMPLONA N. DE S. – COLOMBIA,
2020

HERRAMIENTA EDUCATIVA PARA EL ANÁLISIS Y GENERACIÓN DE ARMÓNICOS EN REDES ELÉCTRICAS

Autor

JULIETH XIMENA VELANDIA GUTIÉRREZ

**Trabajo de grado presentado como requisito para optar al título de
INGENIERO ELÉCTRICO**

Director: M. Sc (c) Jesús Enrique Salamanca Jaimes.

Ingeniero Eléctrico

jexuz27@gmail.com

**PROGRAMA DE INGENIERIA ELÉCTRICA
DEPARTAMENTO DE INGENIERIAS ELÉCTRICA,
ELECTRÓNICA, SISTEMAS Y TELECOMUNICACIONES
FACULTAD DE INGENIERIAS Y ARQUITECTURAS
UNIVERSIDAD DE PAMPLONA
PAMPLONA N. DE S. – COLOMBIA,
2020**

**UNIVERSIDAD DE PAMPLONA
FACULTAD DE INGENIERÍAS Y ARQUITECTURA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍAS ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA, SISTEMAS
Y TELECOMUNICACIONES
PROGRAMA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA**

**AUTORIZACIÓN PARA SUSTENTAR
TRABAJO PRESENTADO PARA OPTAR POR EL TÍTULO DE
INGENIERO ELÉCTRICO**

**HERRAMIENTA EDUCATIVA PARA EL ANÁLISIS Y GENERACIÓN DE
ARMÓNICOS EN REDES ELÉCTRICAS**

FECHA DE INICIO DEL TRABAJO: 18 / 09 / 2020

FECHA DE TERMINACIÓN DEL TRABAJO: 18 / 12 /2020

NOMBRES Y FIRMAS DE AUTORIZACIÓN PARA SUSTENTAR

AUTOR: JULIETH XIMENA VELANDIA GUTIÉRREZ.

DIRECTOR: M.SC (C) JESÚS ENRIQUE SALAMANCA JAIMES.

DIRECTOR DE PROGRAMA: M.SC. YESID SANTAFE RAMON.

JURADO CALIFICADOR:

PRESIDENTE: M.SC MARTÍN GALLO NIEVES.

OPONENTE: ING. JHON EDWAR LIZARAZO.

SECRETARIO: M.SC (C) JESÚS ENRIQUE SALAMANCA JAIMES.

PAMPLONA N. DE S. – COLOMBIA,
2020

Dedicatoria

Con especial cariño a mis padres, que me guiaron en todo momento con esfuerzo y dedicación, supieron edificar en mí, los valores necesarios que hoy me permiten alcanzar un logro importante que es fruto de ese esfuerzo, para ustedes con cariño.

AGRADECIMIENTOS

Mi agradecimiento principalmente a Dios quién me lleno de fortaleza y perseverancia para culminar este ciclo y me supo guiar al camino correcto al éxito y a la terminación de la carrera de ingeniería eléctrica.

Un agradecimiento a la Universidad De Pamplona por permitir capacitarme en esta prestigiosa institución y por los conocimientos impartidos.

Un especial agradecimiento al Ing. Jesús Enrique Salamanca Jaimes director del proyecto, por su ayuda constante en la elaboración y culminación del proyecto de grado, por su gran apoyo incondicional y ardua labor con sus consejos y sólidos conocimientos que me enriquecieron personal e intelectualmente.

Agradezco también a todos los profesores, compañeros y personas que en general han estado en este camino aportando un poco de si a la persona en la que me convertí, no tengo palabras para exprésales mis infinitos agradecimientos, a mi familia por estar conmigo en cada paso de mi vida y ayudarme a lograr mis objetivos y saber que la familia es incondicional

A todos ustedes muchas gracias.

TABLA DE CONTENIDO

1. INTRODUCCIÓN	15
2. JUSTIFICACIÓN	16
3. OBJETIVOS	17
3.1 Objetivo general.....	17
3.2 Objetivos específicos	17
4. MARCO TEÓRICO.....	18
4.1 Armónicos.....	18
4.2 Análisis de Fourier	19
4.3 Clasificación de armónicos	20
4.3.1 Orden de los armónicos	20
4.3.2 La frecuencia.....	20
4.3.3 La secuencia	20
4.4 Fuentes de armónicos	21
4.4.1 Sistema de generación fotovoltaico.....	22
4.4.1.1 Aspectos importantes en la generación solar	22
4.4.1.2 Módulos fotovoltaicos	23
4.4.1.3 Inversor.....	24
4.4.2 Regulador de potencia con TRIAC.....	26
4.5 Efectos de los armónicos.....	27
4.5.1 Efectos sobre otros equipos.....	28
4.6 Límites permitidos en el sistema eléctrico.....	29
4.6.1 Límites de tensión armónico recomendados.....	29
4.7 Distorsión armónica	30
4.7.1 El espectro armónico.....	30
5. DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA ELÉCTRICO DE POTENCIA	31
6. MONTAJE DEL DIAGRAMA UNIFILAR EN SIMULINK.....	33
6.1 Generación convencional	33
6.2 Línea de transmisión	34
6.3 Subestación de distribución	35
6.4 Generación fotovoltaica	35

6.5	Carga lineal.....	39
6.6	Carga no lineal.....	39
7.	SIMULACIÓN DEL SISTEMA ELÉCTRICO.....	42
7.1	Todos los componentes y cargas conectadas	42
7.1.1	Efectos de los armónicos en las ondas de la tensión.....	43
7.1.2	Efectos de los armónicos en las ondas de la corriente	44
7.1.3	Calculo de la distorsión armónica de la tensión y la corriente	44
7.2	Los dos generadores y la carga lineal	46
7.2.1	Efectos de los armónicos en las ondas de la tensión.....	47
7.2.2	Efectos de los armónicos en las ondas de la corriente	48
7.2.3	Calculo de la distorsión armónica de la tensión y la corriente	48
7.3	Los dos generadores y la carga no lineal (regulador de potencia)	50
7.3.1	Efectos de los armónicos en las ondas de la tensión.....	51
7.3.2	Efectos de los armónicos en las ondas de la corriente	52
7.3.3	Calculo de la distorsión armónica de la tensión y la corriente	52
7.4	El generador sincrónico con la carga lineal y no lineal	54
7.4.1	Efectos de los armónicos en las ondas de la tensión.....	55
7.4.2	Efectos de los armónicos en las ondas de la corriente	56
7.4.3	Calculo de la distorsión armónica de la tensión y la corriente	56
7.5	El generador sincrónico con la carga lineal	58
7.5.1	Efectos de los armónicos en las ondas de la tensión.....	59
7.5.2	Efectos de los armónicos en las ondas de la corriente	60
7.5.3	Calculo de la distorsión armónica de tensión	60
7.6	El generador sincrónico con la carga no lineal (regulador de potencia) ...	61
7.6.1	Efectos de los armónicos en las ondas de la tensión.....	62
7.6.2	Efectos de los armónicos en las ondas de la corriente	63
7.6.3	Calculo de la distorsión armónica de la tensión y la corriente	63
7.7	Calculo del THD de los generadores	65
7.8	Calculo del factor de potencia.....	68
7.9	Normativa IEEE 519	68
7.10	Soluciones para la mitigación de los armónicos en el sistema	69
7.10.1	Filtro Pasivo	69
7.10.1.1	Filtro pasivo paso bajo	69

7.10.1.2	Filtro pasivo paso alto.....	70
7.10.1.3	Filtro pasivo pasa banda.....	70
7.10.2	Aplicación del filtro pasivo en el sistema de potencia	70
7.10.2.1	Simulación 1	71
7.10.2.2	Simulación 2	74
7.10.2.3	Simulación 3	76
7.10.2.4	Simulación 6	79
8.	GUIA DE FUNCIONAMIENTO	82
8.1	Introducción al entorno MATLAB	82
8.2	Implementación de SIMULINK.....	82
8.2.1	Biblioteca Simscape Electrical	82
8.2.1.1	Funciones y características de los componentes utilizados en la ejecución del proyecto	83
8.3	Pasos para la simulación del programa.....	88
9.	CONCLUSIONES.....	92
10.	RECOMENDACIONES Y TRABAJOS FUTUROS.....	93
11.	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	94
ANEXO A.	Código de generación de pulsos del inversor	96

LISTA DE TABLAS

Tabla 1 Secuencia de los armónicos	21
Tabla 2 Efectos de los armónicos.....	27
Tabla 3 Límites de distorsión armónica total de tensión para usuarios y suministradores ..	29
Tabla 4 Parámetros del bloque de generación convencional	34
Tabla 5 Parámetros del bloque de la subestación.....	35
Tabla 6 Parámetros del panel SunPower SPR-415E-WHT-D	36
Tabla 7 Parámetros de la carga RL y C del generador fotovoltaico	38
Tabla 8 Parámetros del bloque de generación fotovoltaica	38
Tabla 9 Parámetros del bloque de la carga lineal.....	39
Tabla 10 Parámetros del modelo del motor	39
Tabla 11 Parámetros de trenes de pulsos para la activación del TRIAC	40
Tabla 12 Espectro armónico de la corriente y tensión en la carga (Simulación 1).....	46
Tabla 13 Espectro armónico de la corriente y tensión en la carga (Simulación 2).....	50
Tabla 14 Espectro armónico de la corriente y tensión en la carga (Simulación 3).....	54
Tabla 15 Espectro armónico de la corriente y tensión en la carga (Simulación 4).....	58
Tabla 16 Espectro armónico de la corriente y tensión en la carga (Simulación 6).....	65
Tabla 17 Espectro armónico de la tensión en el generador fotovoltaico	67
Tabla 18 Porcentaje de las THD de tensión y corriente de las simulaciones.....	68
Tabla 19 Parámetros del bloque del filtro pasivo.....	71
Tabla 20 Espectro armónico de la tensión en la carga (Simulación 1).....	73
Tabla 21 Espectro armónico de la tensión en la carga (Simulación 2).....	76
Tabla 22 Espectro armónico de la tensión en la carga (Simulación 3).....	78
Tabla 23 Espectro armónico de la tensión en la carga (Simulación 6).....	81
Tabla 24 Componentes de SIMULINK utilizados en el proyecto.....	83

LISTA DE ECUACIONES

Ecuación 1 Expresión de la serie de Fourier	20
Ecuación 2 Orden de armónicos	20
Ecuación 3 Frecuencia del armónico	20
Ecuación 4 Tensión RMS entre 2 fases de la salida del inversor.....	25

LISTA DE FIGURAS

Fig. 1 Onda fundamental sin contenido armónico.	18
Fig. 2 Onda con contenido armónico.	19
Fig. 3 Conexión típica de un sistema fotovoltaico integrado a la red.	22
Fig. 4 Inversor trifásico formado por 3 inversores monofásicos.	24
Fig. 5 Configuración de inversor trifásico.	24
Fig. 6 Tensión de salida del inversor.	25
Fig. 7 Símbolo del TRIAC.	26
Fig. 8 Circuito del regulador con DIAC y TRIAC.	26
Fig. 9 Circuito del regulador con CONTROL y TRIAC.	27
Fig. 10 Componentes armónicas relativas a la fundamental.	30
Fig. 11 Diagrama unifilar del sistema eléctrico de potencia implementado.	32
Fig. 12 Sistema eléctrico de potencia implementado en Simulink.	33
Fig. 13 Señales de salida del generador sincrónico.	34
Fig. 14 Ubicación del bloque de generación fotovoltaica en el sistema.	35
Fig. 15 Subsistema del inversor.	36
Fig. 16 Diagrama de flujo del código para la generación de pulsos.	37
Fig. 17 Señales de salida del generador fotovoltaico.	38
Fig. 18 Subsistema del regulador de potencia.	39
Fig. 19 Subsistema de modelo de un TRIAC.	40
Fig. 20 Señal de salida de la carga RL controlada por el TRIAC.	41
Fig. 21 Simulación de todos los componentes y cargas conectadas.	43
Fig. 22 Perfil de tensión (Simulación 1).	43
Fig. 23 Perfil de corriente (Simulación 1).	44
Fig. 24 Distorsión armónica total de la tensión (Simulación 1).	45
Fig. 25 Distorsión armónica total de la corriente (Simulación 1).	45
Fig. 26 Simulación de los dos generadores y la carga lineal.	47
Fig. 27 Perfil de tensión (Simulación 2).	47
Fig. 28 Perfil de corriente (Simulación 2).	48
Fig. 29 Distorsión armónica total de la tensión (Simulación 2).	49
Fig. 30 Distorsión armónica total de la corriente (Simulación 2).	49
Fig. 31 Simulación de los dos generadores y la carga no lineal (regulador de potencia). ..	51
Fig. 32 Perfil de tensión (Simulación 3).	51
Fig. 33 Perfil de corriente (Simulación 3).	52
Fig. 34 Distorsión armónica total de la tensión (Simulación 3).	53
Fig. 35 Distorsión armónica total de la corriente (Simulación 3).	53
Fig. 36 Simulación del generador sincrónico con la carga lineal y la carga no lineal (regulador de potencia)	55
Fig. 37 Perfil de tensión (Simulación 4).	55
Fig. 38 Perfil de corriente (Simulación 4).	56
Fig. 39 Distorsión armónica total de la tensión (Simulación 4).	57
Fig. 40 Distorsión armónica total de la corriente (Simulación 4).	57
Fig. 41 Simulación del generador sincrónico con la carga lineal.	59

Fig. 42 Perfil de tensión (Simulación 5).	59
Fig. 43 Perfil de corriente (Simulación 5).	60
Fig. 44 Distorsión armónica total de la tensión (Simulación 5).	61
Fig. 45 Distorsión armónica total de la corriente (Simulación 5).	61
Fig. 46 Simulación del generador sincrónico con la carga no lineal (regulador de potencia).	62
Fig. 47 Perfil de tensión (Simulación 6).	62
Fig. 48 Perfil de corriente (Simulación 6).	63
Fig. 49 Distorsión armónica total de la tensión (Simulación 6).	64
Fig. 50 Distorsión armónica total de la corriente (Simulación 6).	64
Fig. 51 Distorsión armónica total de la tensión en el generador sincrónico.	66
Fig. 52 Distorsión armónica total de la tensión en el generador fotovoltaico.	66
Fig. 53 Factor de potencia de la carga.	68
Fig. 54 Disposición circuital de un filtro pasivo paso bajo.	69
Fig. 55 Disposición circuital de un filtro pasivo paso alto.	70
Fig. 56 Disposición de filtro paso banda. a) PA más PB, b) Configuración especial.	70
Fig. 57 Subsistema del filtro pasivo.	71
Fig. 58 Simulación de todos los componentes y cargas conectadas con filtro pasivo.	72
Fig. 59 Perfil de tensión con filtro (Simulación 1).	72
Fig. 60 Distorsión armónica total de la tensión con filtro (Simulación 1).	73
Fig. 61 Simulación de los dos generadores y la carga lineal con filtro pasivo.	74
Fig. 62 Perfil de tensión con filtro (Simulación 2).	75
Fig. 63 Distorsión armónica total de la tensión con filtro (Simulación 2).	75
Fig. 64 Simulación de los dos generadores y la carga no lineal con filtro pasivo.	77
Fig. 65 Perfil de tensión con filtro (Simulación 3).	77
Fig. 66 Distorsión armónica total de la tensión con filtro (Simulación 3).	78
Fig. 67 Simulación del generador sincrónico con la carga no lineal y el filtro pasivo.	79
Fig. 68 Perfil de tensión con filtro (Simulación 6).	80
Fig. 69 Distorsión armónica total de la tensión con filtro (Simulación 6).	80
Fig. 70 Biblioteca Simscape Electrical.	82
Fig. 71 Guía para el funcionamiento - interfaz de Matlab.	¡Error! Marcador no definido.
Fig. 72 Guía para el funcionamiento - Interfaz de Simulink.	88
Fig. 73 Guía para el funcionamiento - Interfaz del montaje en simulink.	89
Fig. 74 Guía para el funcionamiento - Parámetros que se modifican en el generador sincrónico.	90
Fig. 75 Guía para el funcionamiento - Parámetros que se modifican en el generador fotovoltaico.	¡Error! Marcador no definido.
Fig. 76 Guía para el funcionamiento - Parámetros que se modifican en los transformadores.	¡Error! Marcador no definido.
Fig. 77 Guía para el funcionamiento - Parámetros que se modifican en las cargas.	¡Error! Marcador no definido.
Fig. 78 Guía para el funcionamiento - Bloque POWERGUI.	90
Fig. 79 Guía para el funcionamiento - Función FFT Analysis.	91

RESUMEN

En este trabajo se presenta el modelo de una herramienta educativa que permite a los interesados, una fácil comprensión del efecto armónico en la red eléctrica y su implementación en el programa Simulink de Matlab, para la generación de armónicos por las cargas conectadas al sistema. En esta herramienta se desarrolló cada una de las etapas que integran un sistema eléctrico de potencia para llevar a cabo el análisis del comportamiento del sistema, con carga lineal RL y dos cargas no lineales, una de ellas consta del inversor de un sistema de generación fotovoltaica y otra consta de un regulador de potencia con TRIAC para el accionamiento de un modelo de motor representado como una carga RL. Además, se analizan las señales de tensión del sistema y los componentes armónicos en las diferentes etapas del sistema eléctrico de potencia.

1. INTRODUCCIÓN

En la actualidad la preocupación por la calidad del suministro y consumo de energía eléctrica ha aumentado de manera considerable, principalmente por la proliferación de cargas electrónicas - cuyo comportamiento es no lineal - en todos los niveles de potencia: industrial, doméstico y comercial. Esta clase de cargas contribuyen de manera significativa a degradar la calidad de la potencia utilizada, ya que pueden generar distorsiones de tensión y de corriente. Desde un punto de vista relacionado con el costo - beneficio, el uso de esta clase de cargas es indiscutible, ya que proporcionan una mayor flexibilidad en el control de procesos además de la viabilidad económica de su uso [1].

Las distorsiones de la forma de onda se definen como una desviación del estado estable de una sinusoidal con respecto a la frecuencia del sistema, caracterizado por el contenido espectral de la desviación. Los armónicos pueden ser de tensión o corriente, estos se representan como frecuencias múltiplos a la fundamental, originadas por cargas no lineales en un sistema de potencia. Las distorsiones de armónicos tienen un espectro con magnitudes y ángulos de fase de cada componente individual o de cada armónico [2].

Existen fuentes de los armónicos producidos por cargas no lineales que a pesar de ser alimentadas con una tensión sinusoidal absorben una intensidad no sinusoidal, para simplificar este concepto, se considera que las cargas no lineales se comportan como fuente de intensidad que inyectan armónicos en la red. Las cargas armónicas no lineales, se encuentran en los receptores alimentados por electrónica de potencia los mismos que incluyen, variadores de velocidad de motores, rectificadores, convertidores, UPS, fuentes de tensión para las computadoras personales, balastos electrónicos para lámparas fluorescentes entre otros menos comunes como, reactancias saturables, equipos de soldadura de arco, de punto y hornos de arco [2].

En este proyecto se plantea el modelado de dos cargas no lineales, para la simulación de un sistema de potencia con estas cargas conectadas y el cálculo de la distorsión armónica en el sistema, dichas cargas son el inversor de un sistema de generación fotovoltaica y un regulador de potencia mediante la herramienta de Simulink del software Matlab.

2. JUSTIFICACIÓN

En los últimos años, el crecimiento sustancial de los dispositivos electrónicos, destinados a equipar nuestras instalaciones, ha dado lugar a un cambio significativo de los tipos de cargas conectadas al sistema de distribución eléctrico[3]. La calidad de energía es afectada por el aumento de estas cargas no lineales que incrementan las pérdidas de potencia y contaminan las líneas de suministro eléctrico [4]. Estas cargas no lineales afectan principalmente la tensión de operación y la frecuencia, por la presencia de las componentes armónicas. Estos dispositivos, en la actualidad, están equipados con una electrónica que de algún modo u otro consigue proporcionarnos un mayor rendimiento de las tareas, procesos productivos o actividades que se desarrollan [3].

Donde se ve la necesidad de diseñar una herramienta educativa mediante la aplicación del software computacional Simulink de Matlab, que permitirá a los estudiantes y docentes, observar el efecto de los armónicos en las redes eléctricas además de mostrar la distorsión armónica total. Por medio de esta herramienta los interesados podrán comprender de una mejor manera el efecto de los armónicos, permitiéndoles realizar análisis que ayuden a determinar qué acciones correctivas se deberán tener para minimizar o corregir los efectos producidos por la presencia de estas distorsiones suministradas por las diferentes cargas no lineales conectadas al sistema eléctrico, evitando el daño de equipos en la red eléctrica contaminado.

3. OBJETIVOS

3.1 OBJETIVO GENERAL

Diseñar una herramienta educativa para el análisis y generación de armónicos en redes eléctricas en software computacional SIMULINK.

3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Determinar la metodología para la generación de armónicos y evaluación del contenido armónico.
- Diseñar los algoritmos para la generación de armónicos y evaluación del contenido armónico.
- Simular el software diseñado sobre una red eléctrica tipo en SIMULINK.
- Elaborar guías para la utilización de la herramienta educativa.

4. MARCO TEÓRICO

4.1 ARMÓNICOS

Los armónicos son un fenómeno que genera problemas tanto para los usuarios como para la entidad encargada de la prestación del servicio de energía eléctrica ocasionando diversos efectos nocivos en los equipos de la red [5]. Estos armónicos son tensiones y corrientes parásitas presentes en un sistema eléctrico que tienen deformaciones con respecto a la forma de onda sinusoidal, las mismas que resultan del múltiplo entero de la fundamental [6].

Es importante para definir los armónicos, primero establecer la calidad de la onda fundamental de la tensión la cual deberá tener una frecuencia y amplitud constante. En la Fig. 1 se representa gráficamente la forma de onda sin contenido de armónicos, donde la frecuencia es constante de 60 Hz y una amplitud constante de 1 pu [5].

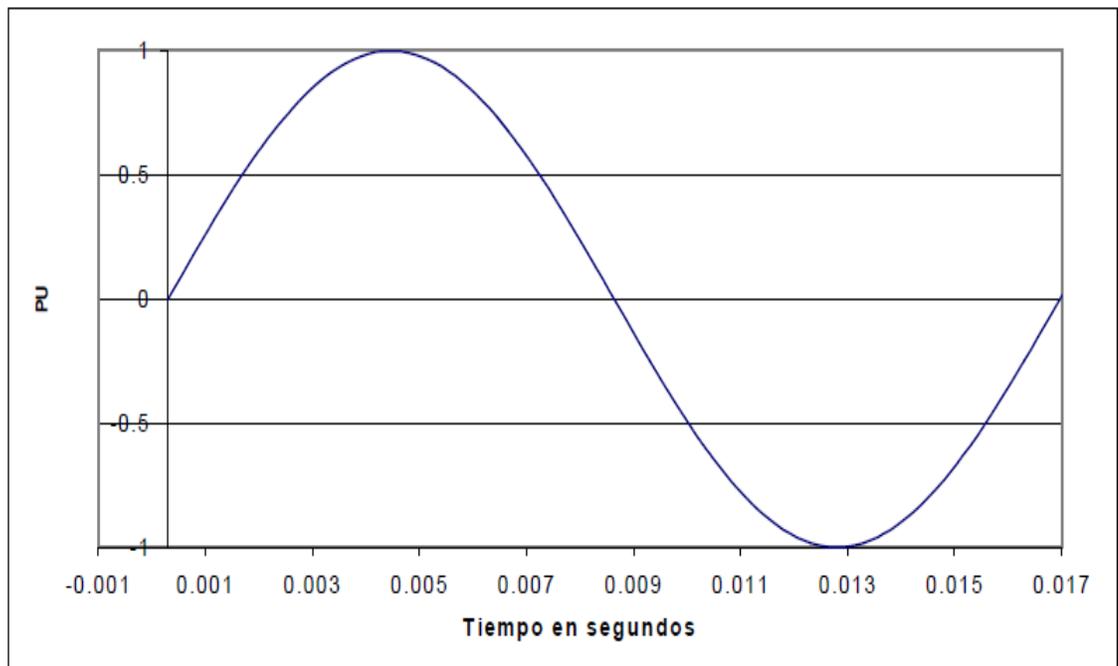


Fig. 1 Onda fundamental sin contenido armónico.

Fuente : Arcila, José Daríel[5]

Cuando una onda periódica no tiene esta forma sinusoidal se dice que tiene contenido armónico, lo cual puede alterar su valor pico o valor RMS causando alteraciones en el funcionamiento normal de los equipos que estén sometidos a esta tensión [5].

La frecuencia de esta onda periódica se denomina frecuencia fundamental y los armónicos son señales cuya frecuencia es múltiplo entero de esta frecuencia. En la Fig. 2 muestra una onda fundamental de tensión con un contenido armónico de 30% del 5° orden, además se puede observar la incidencia del armónico en la onda fundamental de tensión con la onda resultante por el análisis de Fourier [5].

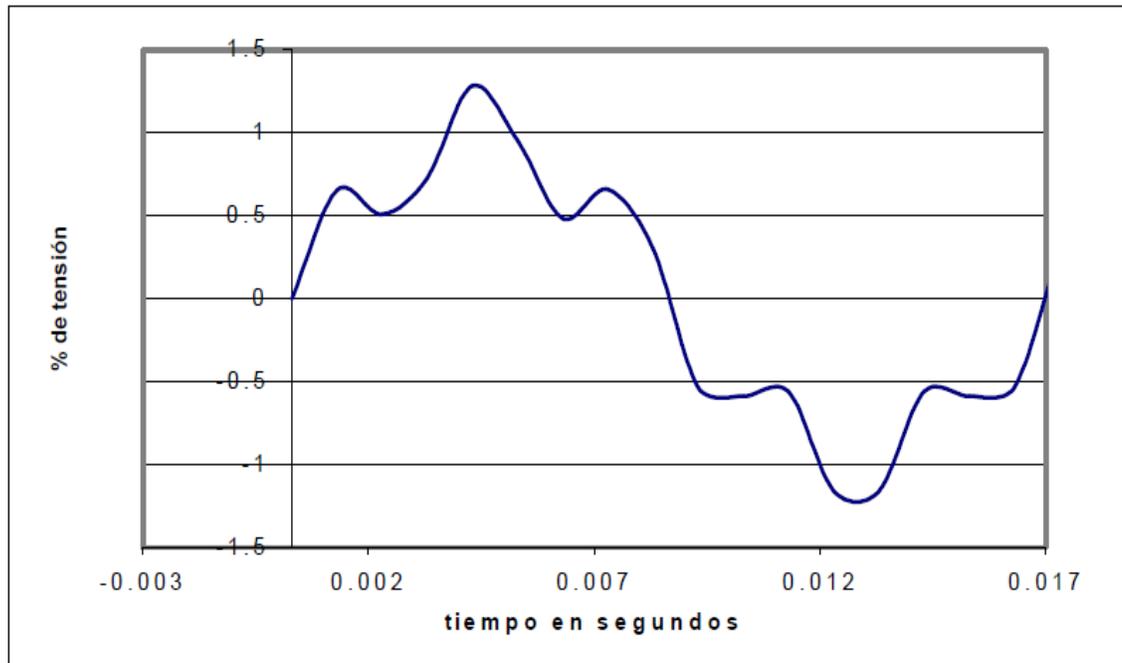


Fig. 2 Onda con contenido armónico.
Fuente : Arcila, José Dariel[5]

Este concepto proviene del teorema de Fourier y define que, bajo ciertas condiciones analíticas, una función periódica cualquiera puede considerarse integrada por una suma de funciones sinusoidales, incluyendo un término constante en caso de asimetría respecto al eje de las abscisas, siendo la primera armónica, denominada también señal fundamental, del mismo período y frecuencia que la función original y el resto serán funciones sinusoidales cuyas frecuencias son múltiplos de la fundamental. Estas componentes son denominadas armónicas de la función periódica original [7].

4.2 ANÁLISIS DE FOURIER

El teorema de Fourier dice que toda onda periódica no sinusoidal puede ser descompuesta como la suma de ondas sinusoidales, mediante la aplicación de la serie de Fourier, siempre y cuando se cumplan las siguientes condiciones[5]:

- Que la integral a lo largo de un periodo de la función sea un valor finito.
- Que la función posea un número finito de discontinuidades en un periodo.
- Que la función posea un número finito de máximos y mínimos en un periodo.

Cualquier función $F(x)$ con periodo $2p$ tiene su representación en series de Fourier de acuerdo con la siguiente expresión [5]:

Ecuación 1 Expresión de la serie de Fourier

$$Y = F(x) = A_0 + \sum_{n=1}^{\infty} [A_n \text{sen}(nx) + B_n \text{cos}(nx)]$$

Con el uso del teorema de Fourier se pueden encontrar los armónicos de las ondas más comunes en los sistemas de potencia, de distribución o industriales [5].

4.3 CLASIFICACIÓN DE ARMÓNICOS

Los armónicos se clasifican por 3 parámetros que definen perfectamente la función del armónico correspondiente en las redes eléctricas [8].

4.3.1 Orden de los armónicos

Partiendo de la frecuencia fundamental de 60 Hz, el número de orden determina el número de veces que la frecuencia del armónico es mayor que la fundamental. La Ecuación 2, define la relación de la frecuencia del armónico F_n y la frecuencia fundamental F_{60} [8].

Ecuación 2 Orden de armónicos

$$n = \frac{F_n}{F_{60}}$$

4.3.2 La frecuencia

La frecuencia del armónico F_n , se define en la Ecuación 3 como el resultado de multiplicar el número de orden del armónico por la frecuencia fundamental. Los armónicos de orden impar son los que se encuentran en las redes eléctricas de la industria, edificios, etc. Los de orden par solo aparecen cuando hay asimetría en la señal eléctrica [8].

Ecuación 3 Frecuencia del armónico

$$F_n = n * F_{60}$$

4.3.3 La secuencia

La secuencia positiva o negativa de los armónicos no determinan un comportamiento concreto de los mismos en las redes eléctricas, son igual de perjudiciales unos que otros. Por lo contrario, los de secuencia cero, al ser su

frecuencia múltiplo de la fundamental, se desplazan por el neutro, haciendo que por el circule la misma o más intensidad que por las fases con el consiguiente calentamiento del mismo, de ahí la necesidad de igualar la sección del neutro a las fases [8].

La Tabla 1 muestra la regla que sigue la secuencia de fases de los diferentes armónicos. La secuencia seguida por los armónicos es importante para analizar sus efectos, solo son válidas cuando el sistema trifásico está balanceado y las formas de onda de las tres fases son idénticas [5].

Tabla 1 Secuencia de los armónicos

N° Armónico	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
Secuencia	+	-	0	+	-	0	+	-	0	+	-	0	+

Dependiendo de su secuencia y rotación, las armónicas presentan diferentes efectos [9] :

- Secuencia [+]: rotación directa, puede producir calentamiento de conductores, rotura de circuitos, etc. [9].
- Secuencia [-]: rotación inversa, produce un freno en el motor, además calentamiento de conductores y por ende problemas en el motor [9].
- Secuencia [0]: no tiene sentido de rotación, pero puede causar calentamiento [9].

4.4 FUENTES DE ARMÓNICOS

Los armónicos son el resultado de cargas no lineales, las cuales ante una señal de tipo sinusoidal presentan una respuesta no sinusoidal [5]. Los equipos o cargas no lineales, basados en electrónica de potencia se utilizan ampliamente en muchas aplicaciones, incluidos equipos industriales, motores y ordenadores personales. Estos equipos causaron una población armónica severa en los sistemas de distribución de energía que distorsionan las formas de onda fundamentales de tensión y corriente. Tiene muchos efectos negativos como problemas de resonancia, sobrecalentamiento de los conductores y funcionamiento incorrecto del dispositivo de protección, lo que eventualmente incrementa los costos de mantenimiento del sistema [10].

La norma IEEE 519-2014, establece que las fuentes comunes de corrientes armónicas en los sistemas de potencia incluyen convertidores electrónicos de potencia, hornos de arco, sistemas VAR estáticos, inversores para generación distribuida, controladores de fase de CA, ciclo convertidores y convertidores de CA-CC. Cada uno de estos dispositivos productores de armónicos puede tener características de emisión de corriente armónica bastante consistentes a lo largo del tiempo o cada uno puede presentar una característica que varía ampliamente según el control del dispositivo, las características del sistema y otras variables [11].

A continuación, se hace referencia a las cargas no lineales que se conectarán en el sistema eléctrico de potencia, modelado para objetivo de este trabajo.

4.4.1 Sistema de generación fotovoltaico

La generación de energía eléctrica, es un proceso demasiado costoso, pero sobre todo es un proceso que agota cada vez más los recursos naturales con los que se cuentan, ahora las tendencias de las empresas generadoras de energía buscan alternativas para la obtención del recurso de una manera mucho más limpia sin ser tan costosa y sobre todo cuidar los recursos que se encuentran en peligro de que se agoten [12].

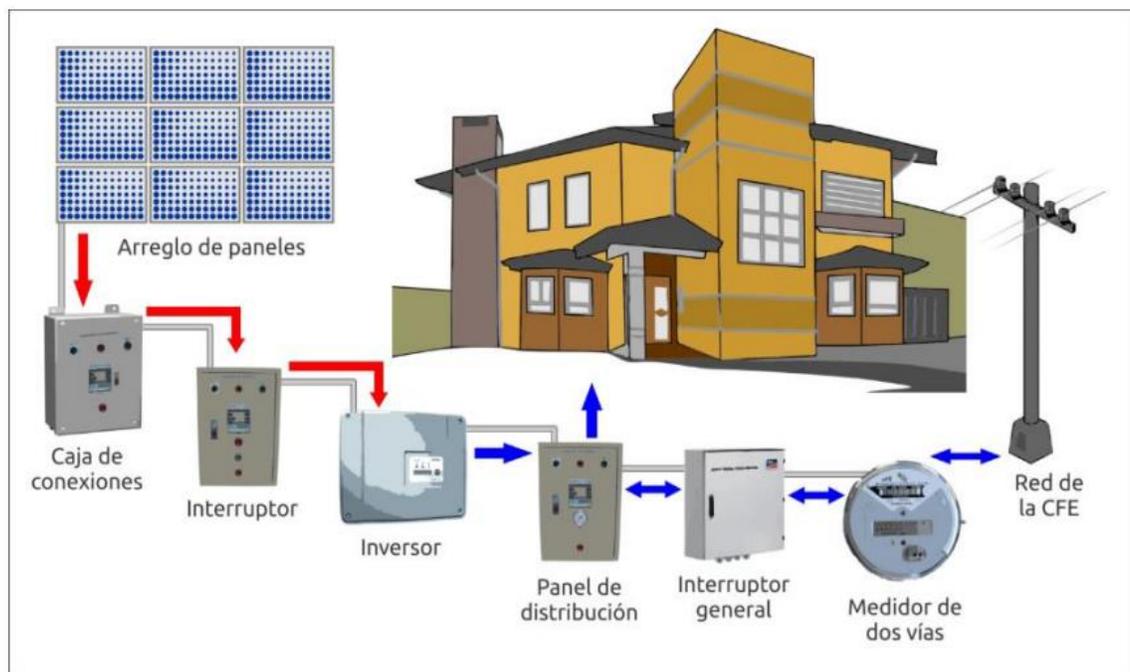


Fig. 3 Conexión típica de un sistema fotovoltaico integrado a la red.
Fuente: Ramos, Humberto; Luna, Rafael[12]

Ante la problemática que implica el uso y agotamiento de los combustibles fósiles para la generación de energía, el tema de las fuentes alternativas de energía ha retomado interés en los últimos años, estas fuentes aprovechan la energía del sol [12].

4.4.1.1 Aspectos importantes en la generación solar

- **LA RADIACIÓN SOLAR:** es reflejada, dispersada y absorbida por los diferentes elementos que constituyen la atmósfera. Estos elementos son: O₂, CO₂, O₃, N₂, H₂O y partículas de polvo [12].

- **HORAS PICO SOLARES:** Se puede definir como HPS (Horas Pico Solares) a la captación de energía a solar disponible en que los paneles pueden aportar energía a los sistemas de consumo inclusive con luz solar difusa, pero a menores cantidades, en comparación a momentos de gran luminosidad solar [12].
- **CELULA FOTOVOLTAICA:** El tipo de célula fotovoltaica más común es la célula de silicio cristalino. Sus propiedades de conductividad eléctrica están situadas a medio camino entre los materiales conductores y los aislantes [12].
- **EFEECTO FOTOVOLTAICO:** se produce cuando el material de la celda solar absorbe parte de los fotones del sol. El fotón absorbido libera a un electrón que se encuentra en el interior de la celda. Ambos lados de la celda están conectados por un cable eléctrico, así que se genera una corriente eléctrica [12].

4.4.1.2 Módulos fotovoltaicos

Un módulo fotovoltaico consiste en la conexión de células en serie-paralelo hasta obtener unos valores de tensión y corriente que se desean. Una vez obtenido el arreglo es encapsulado de tal forma que quede protegido de los elementos atmosféricos que le puedan afectar cuando esté trabajando en la intemperie [12].

Parámetros y características

- **Corriente de Corto Circuito (I_{sc}):** La corriente de corto circuito ocurre cuando la impedancia es aproximadamente cero y se calcula cuando la tensión en el módulo PV es cero voltios, la corriente de corto circuito ocurre al principio de la polarización de la celda y representa el valor máximo de corriente en el cuadrante de potencia (IV), la corriente de corto circuito es la corriente total producida en la celda solar mediante irradiación solar [12].
- **Tensión de Circuito Abierto (V_{oc}):** La tensión de circuito abierto (V_{oc}) es la tensión que se mide a través del panel cuando no pasa corriente por el panel; es decir, sin carga conectada en la salida. El tensión V_{oc} se define igualmente como el tensión máximo en el cuadrante de potencia (I-V) [12].
- **Potencia Máxima (P_{max}):** Desde la curva característica (I-V) es fácil calcular la potencia máxima que desarrolla el modulo fotovoltaico, la potencia en los puntos I_{sc} y V_{oc} es cero Watts, si se utiliza la ecuación $P= IV$. La potencia máxima ocurre entre estos dos puntos, cuando la corriente y el tensión tienen un valor de I_{MP} y V_{MP} , respectivamente [12].

4.4.1.3 Inversor

Por este término se interpretará aquel equipo capaz de transformar la energía continua en alterna. El principio de funcionamiento se basa en la conducción de un interruptor durante un semiperíodo, instante durante el cual se le aplica a la carga una tensión igual a $V_s/2$, junto con la imposición de una conducción alternada y no simultánea de ambos interruptores [13].

Los inversores trifásicos se utilizan en aplicaciones de mayor potencia, están formados por tres inversores monofásicos independientes conectados a la misma fuente, como se muestra en la Fig. 4. La única exigencia será el desfase de 120° de las señales de disparo de cada inversor con respecto a los demás, para conseguir una tensión equilibrada a la salida [13].

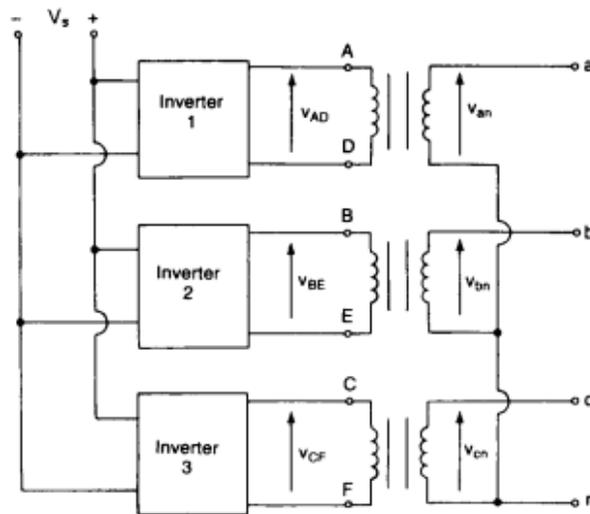


Fig. 4 Inversor trifásico formado por 3 inversores monofásicos.
Fuente: Novoa, A Quezada [13]

Se puede obtener otra configuración de inversor, en la que se reduzcan el número de semiconductores a utilizar, esta concepción se muestra a continuación en la Fig. 5. El funcionamiento de este inversor trifásico se caracteriza por dos modos de funcionamiento distintos en función del intervalo de conducción de cada interruptor [13].

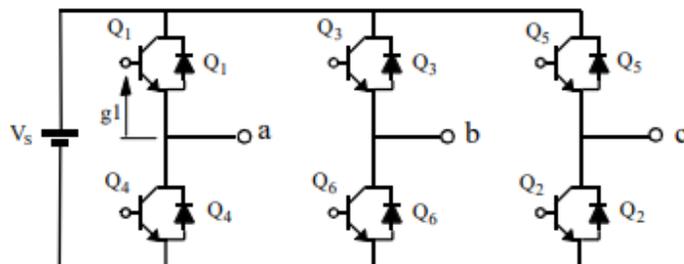


Fig. 5 Configuración de inversor trifásico.
Fuente: Novoa, A Quezada [13]

La tensión RMS entre dos fases se puede expresar como [13]:

Ecuación 4 Tensión RMS entre 2 fases de la salida del inversor

$$V_L = \sqrt{\frac{2}{2\pi} * \int_0^{2\pi} V_s^2 d(\omega t)} = \sqrt{\frac{2}{3}} * V_s = 0.85 * V_s$$

Durante cada modo de operación uno de los tres terminales está abierto y los otros dos conectados a la fuente de continua. La tensión del terminal abierto dependerá de las características de la carga y es impredecible [13].

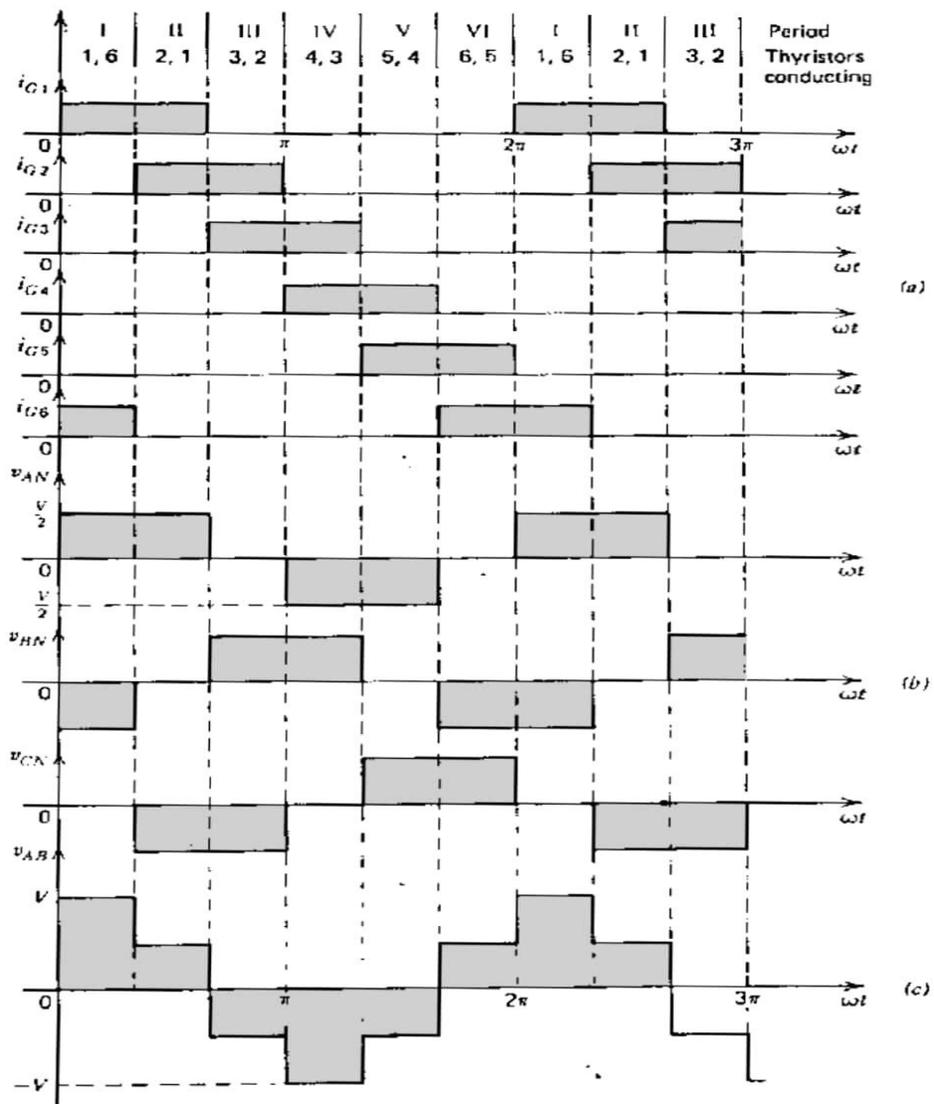


Fig. 6 Tensión de salida del inversor.
Fuente: Novoa, A Quezada [13]

4.4.2 Regulador de potencia con TRIAC

El triac (Tríodo de corriente alterna) es un componente con tres terminales y derivado del tiristor, que puede considerarse eléctricamente como dos tiristores en anti-paralelo. Como se muestra en la Fig. 7 los electrodos a los que se aplica tensión principal a controlar se les denomina ánodo (A_1 - A_2); al electrodo de control se le denomina puerta (G) [14].



Fig. 7 Símbolo del TRIAC
Fuente: Practica 7 [14]

El principal empleo del triac es como regulador de la potencia media entregada a una carga, pero debido a sus características de conducción bidireccional. Para controlar la potencia entregada a la carga por un TRIAC se hace por variación del ángulo de conducción [14].

En el circuito de la Fig. 8 su funcionamiento es bastante sencillo. En el semiciclo positivo, el condensador se carga a través de $R + P$ con la misma polaridad que la tensión entre ánodos. Cuando se alcanza la tensión de disparo del DIAC, permitiendo que el condensador se descargue y produciendo un impulso de corriente que dispara al TRIAC, la tensión de este último cae prácticamente a cero, aplicando, por lo tanto, toda la tensión de red a la carga. Durante el semiciclo negativo el funcionamiento es idéntico al descrito anteriormente, con las polaridades invertidas. Por otra parte el retraso introducido por el circuito $R - C$ puede ser variado mediante P y con ellos, la potencia media que recibe la carga [14].

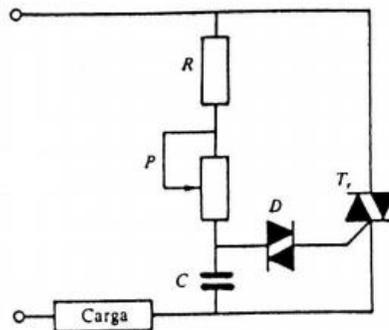


Fig. 8 Circuito del regulador con DIAC y TRIAC.
Fuente: Practica 7 [14]

Los circuitos de regulación de potencia por variación del ángulo de conducción basan su funcionamiento en el retardo sistemático de la señal de disparo en el electrodo de puerta (G) como se puede ver en la Fig. 9 , donde se ejecuta el control el cual puede ser un generador de pulsos que cumpla la misma función del DIAC [14].

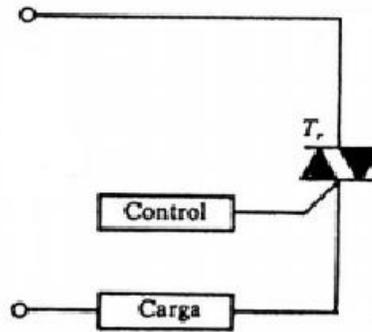


Fig. 9 Circuito del regulador con CONTROL y TRIAC.
Fuente: Practica 7 [14]

4.5 EFECTOS DE LOS ARMÓNICOS

Dentro de la amplia gama de perturbaciones existente en la red, los armónicos producen, en los componentes o elementos, los siguientes efectos[3]:

Tabla 2 Efectos de los armónicos

Componente / Elemento	Problema	Efecto
Conductor	Aumento de la corriente Aumento de la resistencia Aumento de pérdidas térmicas (efecto Joule)	Calentamiento de cables Disparo de protecciones
Conductor de neutro	Circulación de armónicos múltiplos de 3 Retorno por el conductor de neutro	Sobre intensidad de la corriente circulando por el neutro Calentamiento en el neutro Degradación prematura del conductor de neutro Tensión neutro-tierra Disparo de protecciones
Condensadores	Resonancia en paralelo con el sistema Amplificación de los armónicos	Calentamiento Envejecimiento prematuro de condensadores Destrucción de condensadores

Transformadores	Circulación de corrientes armónicas por los devanados	Sobrecalentamiento de los devanados. Pérdida de aislamiento térmico por calentamiento. Pérdidas en el cobre y en el hierro (Histéresis y Foucault) Disminución del rendimiento. Sobredimensionado del transformador. Saturación del transformador (crea mayor distorsión)
Motores	Circulación de corrientes armónicas por los devanados	Sobrecalentamiento de los devanados Pérdida de aislamiento térmico por calentamiento Pérdidas en el cobre y en el hierro (Histéresis y Foucault) Disminución del rendimiento Vibraciones en el eje, desgaste mecánico en rodamientos y excentricidad Reducción del par
Grupo electrógeno	Sistema blando, con mayor impedancia que la red Tensión distorsionada	Dificultad de sincronización automática y posterior conmutación
Equipos de medida y control	Medidas no validas Errores en procesos de control	Error en equipos que toman como referencia el paso por cero de la onda Saturación de transformadores de medida y/o protección Valores de magnitudes incorrectas

4.5.1 Efectos sobre otros equipos

Los equipos electrónicos sensitivos son susceptibles a operación incorrecta a causa de los armónicos. En algunos casos estos equipos dependen de la determinación precisa del cruce por cero del tensión u otros aspectos de la forma de onda del mismo, por lo que condiciones de distorsión pueden afectar su operación adecuada [6].

En lo que respecta a equipo de medición e instrumentación, éstos son afectados por las componentes armónicas, principalmente si se tienen condiciones de resonancia que causen altos tensión armónicos en los circuitos. Para el caso de medidores se pueden tener errores positivos o negativos, dependiendo del tipo de medidor y de las armónicas involucradas [6].

4.6 LIMITES PERMITIDOS EN EL SISTEMA ELÉCTRICO

Para realizar una medición de la calidad de energía en el sistema eléctrico es importante considerar las normas nacionales e internacional, debido a que no establecen límites.

La norma IEEE 519 sobre control de armónicos, establece los límites de distorsión que los armónicos pueden producir se miden en la frontera entre la empresa suministradora de energía y el usuario. Aunque existen varios índices para establecer el grado de contaminación armónica en un punto de frontera, los índices más usados son la distorsión armónica individual y la distorsión armónica total tanto en tensión como en corriente [11].

4.6.1 Límites de tensión armónico recomendados.

En el PCC, los propietarios u operadores del sistema deben limitar los armónicos de tensión de línea a neutro de la siguiente manera[11]:

- Diario: Los valores de percentil 99 de muy corto tiempo (3 s) deben ser inferiores a 1,5 veces los valores dados en la
- Tabla 3 [11].
- Semanal: Los valores de percentil 95 de tiempo corto (10 min) deben ser menores que los valores dados en la
- Tabla 3 [11].

Todos los valores deben expresarse en porcentaje de la tensión de frecuencia de potencia nominal en el PCC. La

Tabla 3 se aplica a los armónicos de tensión cuyas frecuencias son múltiplos enteros de la frecuencia de la red[11].

Tabla 3 Límites de distorsión armónica total de tensión para usuarios y suministradores

Tensión del bus V en PCC	Armónico individual (%)	Distorsión armónica total - THD (%)
$V \leq 1.0kV$	5.0	8.0
$1kV < V \leq 69kV$	3.0	5.0
$69kV < V \leq 161kV$	1.5	2.5
$161 kV < V$	1.0	1.5

4.7 DISTORSIÓN ARMÓNICA

Cuando la tensión o la corriente de un sistema eléctrico tienen deformaciones con respecto a la forma de onda sinusoidal, se dice que la señal está distorsionada. La distorsión puede deberse a: Fenómenos transitorios y Condiciones permanentes [7].

Cuando se hacen mediciones de las ondas de corriente o tensión utilizando analizadores de armónicas, el equipo efectúa integraciones mediante la técnica de la transformada rápida de Fourier. La distorsión armónica total es la relación entre el contenido armónico de la señal y la primera armónica o fundamental. Su valor se ubica entre 0% e infinito. [7]

4.7.1 El espectro armónico

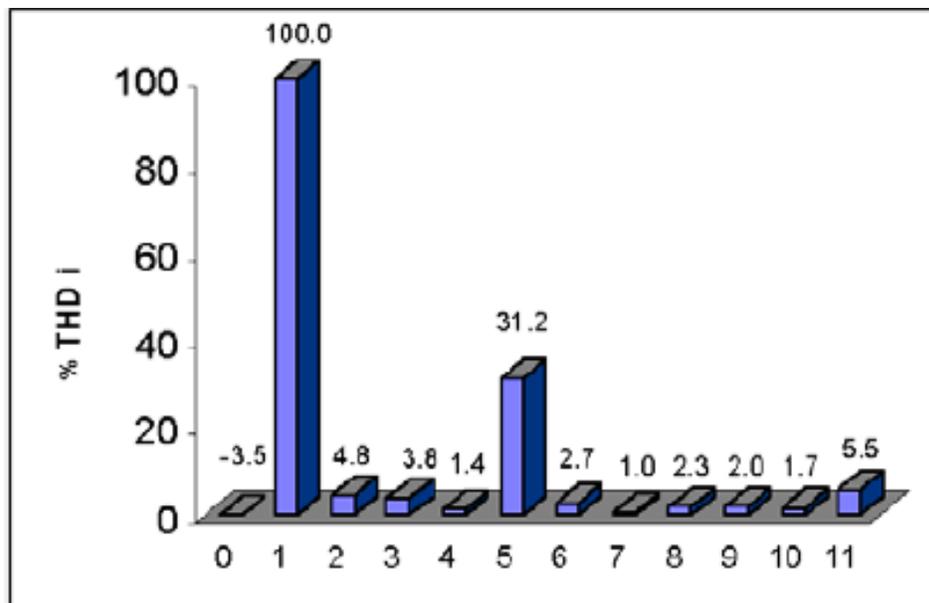


Fig. 10 Componentes armónicas relativas a la fundamental.

Fuente: Téllez, Eugenio[7]

El espectro armónico es la descomposición de una señal en sus armónicos en el dominio de la frecuencia. Así se representa en un diagrama de barras el porcentaje de cada una de las señales armónicas, cuya suma produce la señal total analizada.[8]

5. DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA ELÉCTRICO DE POTENCIA

En este capítulo se establece la metodología para la generación de armónicos, en el cual se presenta el diagrama unifilar del sistema eléctrico de potencia utilizado. Donde este diagrama se puede observar en la Fig. 11 que cuenta con dos bloques de generación con su respectivo transformador, uno de ellos es un generador sincrónico de forma convencional a 200MVA , 20kV y 60Hz, que llega a una barra donde se deriva la alimentación hacia un transformador de 200 MVA, 20kV / 240kV, en conexión estrella – estrella aterrizada. El secundario del transformador, se conecta a una barra donde se deriva la alimentación para el bloque subestación de distribución por medio de la línea de transmisión de 120 km. En esta subestación se encuentra un transformador reductor de 200KVA, 240kV / 13.8Kv, en conexión estrella – estrella aterrizada. Donde el secundario del transformador es la salida del sistema de potencia. Además, se tiene otro bloque de generación el cual es un generador fotovoltaico que está conformado por paneles SUNPOWER SPR-415E_WHT_D, en configuración de 7 módulos en serie y 88 en paralelo. En salida de este generador se conecta un inversor de 6 pulsos para la conversión DC – AC, el cual representa una carga no lineal al sistema de potencia. Donde se deriva la alimentación a un transformador de 200KVA, 13.8kV / 249V en conexión delta – estrella aterrizada.

Por otra parte, en el sistema se encuentran conectadas 2 dos modelos de cargas, una de ellas es una carga lineal RL de la cual se espera que su consumo de potencias no altere el factor de potencia a gran mediada y se mantenga entre los límites de 0.8 – 0.9; la otra es una carga no lineal que se integra por un TRIAC que permitirá controlar la potencia entregada a un modelo de motor representado por una carga RL, por medio de la variación del ángulo de conducción. De esta manera se establecen los equipos o cargas que me generan armónicos en el sistema de potencia, como consiguiente donde se permitirá analizar el efecto producido por cada una de estas cargas no lineales independientes o en conjunto en el sistema.

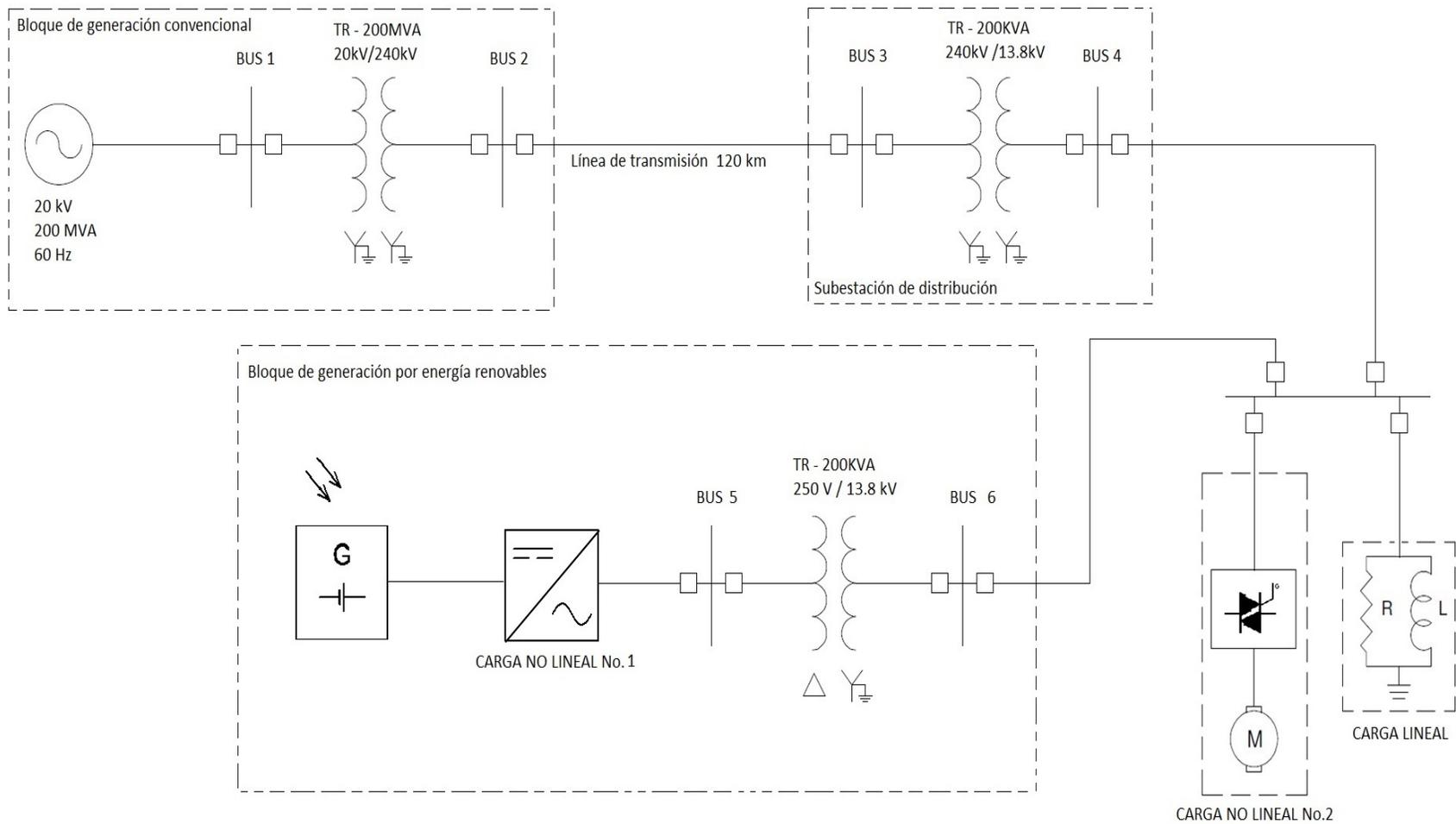


Fig. 11 Diagrama unifilar del sistema eléctrico de potencia implementado
Fuente: Autor

6. MONTAJE DEL DIAGRAMA UNIFILAR EN SIMULINK

En este capítulo se presenta el diagrama unifilar del sistema eléctrico de potencia implementado, el cual se muestra en la Fig. 12 donde se puede observar que se conforma por un generador sincrónico, transformadores trifásicos, línea de transmisión en modelo pi, diferentes cargas conectadas al sistema, además de los barrajes del sistema que nos permitirá tomar las medidas de tensión y corriente que hace parte del sistema eléctrico de potencia.

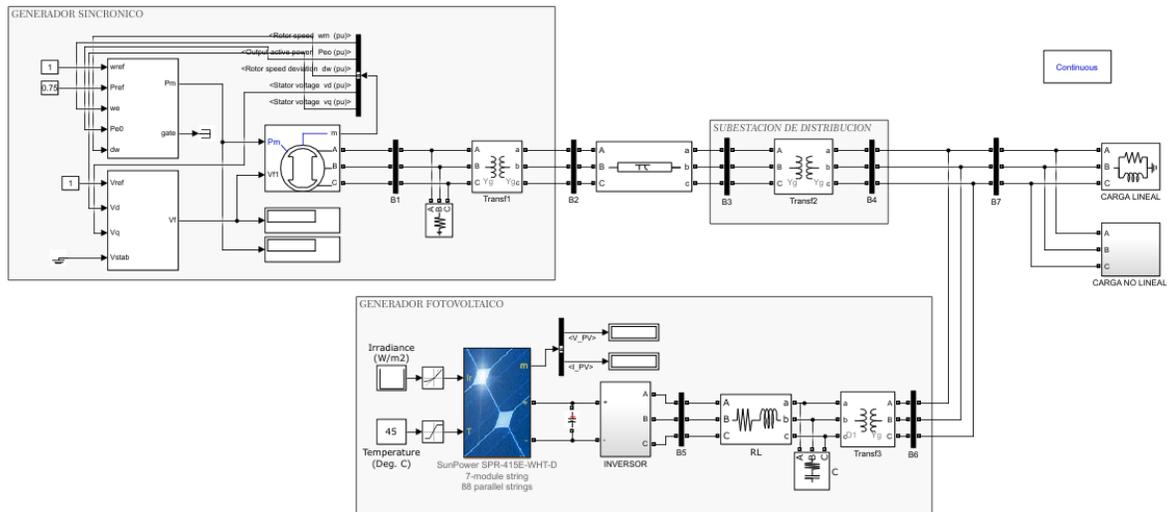


Fig. 12 Sistema eléctrico de potencia implementado en Simulink.

Fuente: Autor

En la realización del montaje del sistema, se hizo necesario agregar bloques de medición que se representan como barras, para poder obtener las señales de salida de la corriente y tensión permitiendo el análisis del sistema. En los siguientes apartados se describe cada uno de los bloques mostrados en la de manera detallada.

6.1 GENERACIÓN CONVENCIONAL

El primer bloque que se puede observar en el sistema de la Fig. 12 se integra por un generador, el cual consta de una máquina sincrónica, con una turbina hidráulica y un bloque de excitación del sistema. Las diferentes variables eléctricas y mecánicas que interactúan dentro del generador hidráulico se divide en tres sistemas los cuales son la máquina sincrónica, regulador de tensión y regulador de velocidad [15]. Además, se tiene entre la barra (B1) y el transformador (Transf1) una resistencia a tierra, esta permite la conexión del generador sincrónico y el transformador, debido a que estos dos equipos no se permiten conectar en serie. Por otra parte, se tiene el transformador elevador (Transf1) en conexión estrella – estrella aterrizada el cual está alimentado por el generador sincrónico por medio de la barra (B1). El lado secundario del transformador alimenta la barra (B2) la cual es la salida de este bloque.

Parámetros de los equipos de este bloque en el sistema:

Tabla 4 Parámetros del bloque de generación convencional

	Tensión L-L (RMS)	Potencia
Generador sincrónico	20 kV	200MVA
Transformador (Transf 1)	Primario: 20kV	200MVA
	Secundario: 240kV	
Resistencia aterrizada	20 kV	200MW

En la Fig. 13 se tiene la onda de salida de tensión y corriente del generador sincrónico en donde se puede observar un disturbio por el arranque al inicio de la simulación, una vez que entra en régimen permanente es una onda sinusoidal.

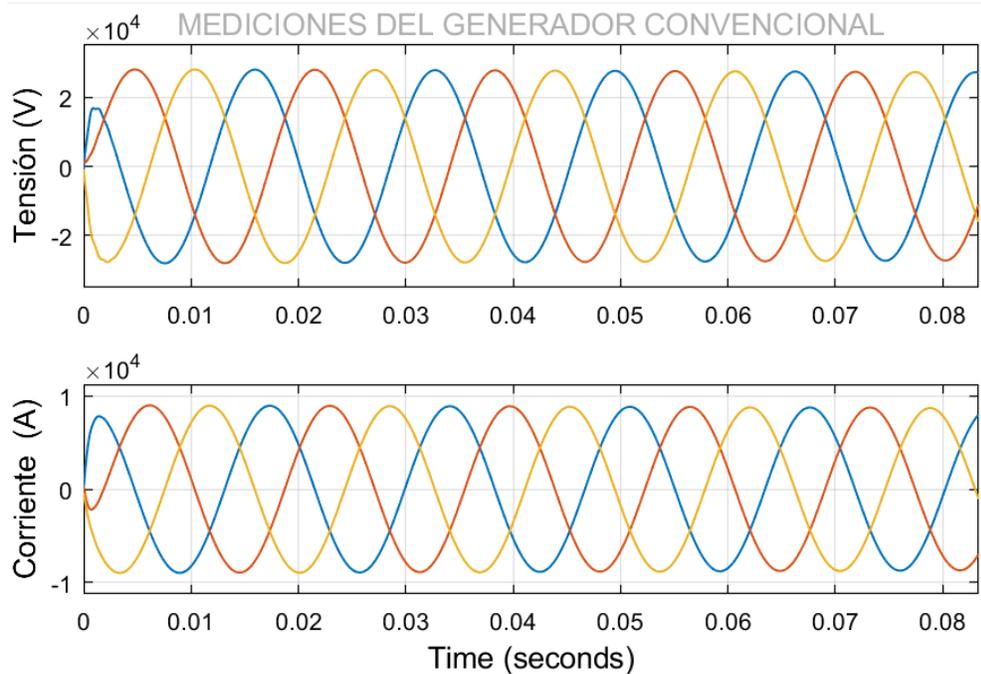


Fig. 13 Señales de salida del generador sincrónico.
Fuente: Autor

6.2 LÍNEA DE TRASMISIÓN

En el bloque de la línea de transmisión se modela como un circuito equivalente pi como se muestra en la Fig. 12, donde los parámetros de este bloque son los predeterminados, lo que se ingresó a este bloque fue la longitud de la línea a 120km, además, de la frecuencia del sistema que es de 60 Hz. Esta línea es la encargada del transporte de energía eléctrica del generador hacia la subestación de distribución, la cual es alimentada por la barra (B2) para finalmente conectarse con la barra (B3) de la subestación.

6.3 SUBESTACIÓN DE DISTRIBUCIÓN

En el bloque de la subestación de distribución se tiene un transformador reductor (Tranf2) en conexión estrella – estrella aterrizada. El cual esta alimentado por el modelo de la línea de transmisión por medio la barra (B3). Por el lado secundario del transformador se alimenta la barra (B4), la cual entrega las señales de salida a la carga como se muestra en la Fig. 12.

Tabla 5 Parámetros del bloque de la subestación

	Tensión L- L (RMS)	Potencia
Transformador (Transf 2)	Primario: 240kV	200kVA
	Secundario: 13.8kV	

6.4 GENERACIÓN FOTOVOLTAICA

Este bloque de generación fotovoltaica como se muestra en la Fig. 14 se integra de un modelo de PV Array la cual implementa una matriz de paneles fotovoltaicos. Dicha matriz está formada por cadenas de 88 paneles conectados en paralelo y cada cadena consta de 7 paneles conectados en serie. Además, de un inversor de 6 pulsos y el transformador elevador de salida en conexión delta – estrella aterrizada.

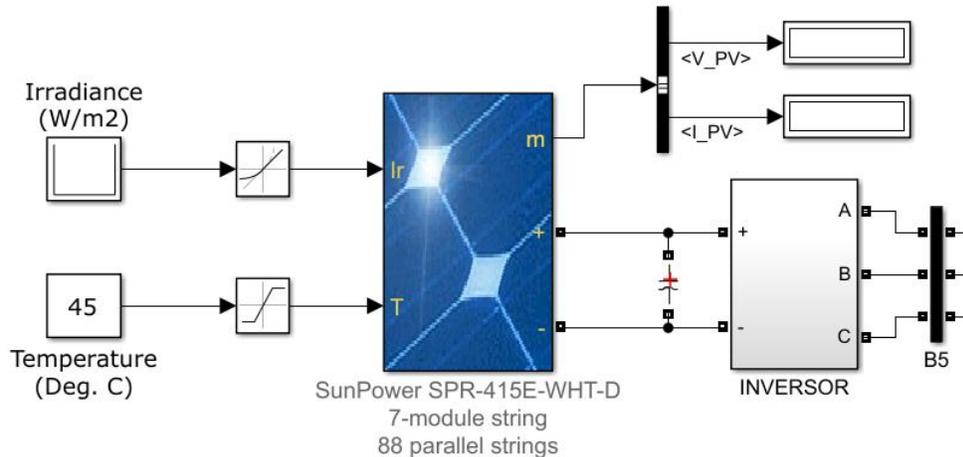


Fig. 14 Ubicación del bloque de generación fotovoltaica en el sistema.
Fuente: Autor

El modelo de estos paneles es SunPower SPR-415E-WHT-D, por lo que se tiene la Tabla 6 donde se muestra parámetros eléctricos y mecánicos del panel, que nos permiten establecer la temperatura para el correcto funcionamiento de este, así como la irradiancia. En Simulink estos parámetros de entrada al sistema se hace mediante un modelo de rampa para mayor proximidad del cambio climático (temperatura del ambiente).

Tabla 6 Parámetros del panel SunPower SPR-415E-WHT-D

Eléctricos	
Potencia en STC (W)	415 W
Potencia en PTC (W)	385.2 W
Vmp: voltaje a máxima potencia (V)	72.9 V
Imp.: Corriente a máxima potencia (A)	5.69 A
Voc: Voltaje de circuito abierto (V)	85.3 V
Isc: corriente de cortocircuito (A)	6.09 A
Temperatura nominal de la celda de funcionamiento	45.8 °C
Irradiación	1000 w/m2
Mecánicos	
Longitud	2067.0mm
Ancho	1046.0 mm
Área del modulo	2.16 m2

El modelo del inversor se encuentra entre el panel solar y la barra (B5) como se muestra en la Fig. 14. Este inversor está conformado dentro de un subsistema, donde se encuentra los 6 pulsos del inversor como se muestra en la Fig. 15 donde se tiene las entradas (+, -) del panel solar, además de los IGBT que nos permiten hacer el cambio de señal DC – AC por medio de una generación de pulsos para activación de estos mismos, teniendo como salida las 3 señales AC del sistema.

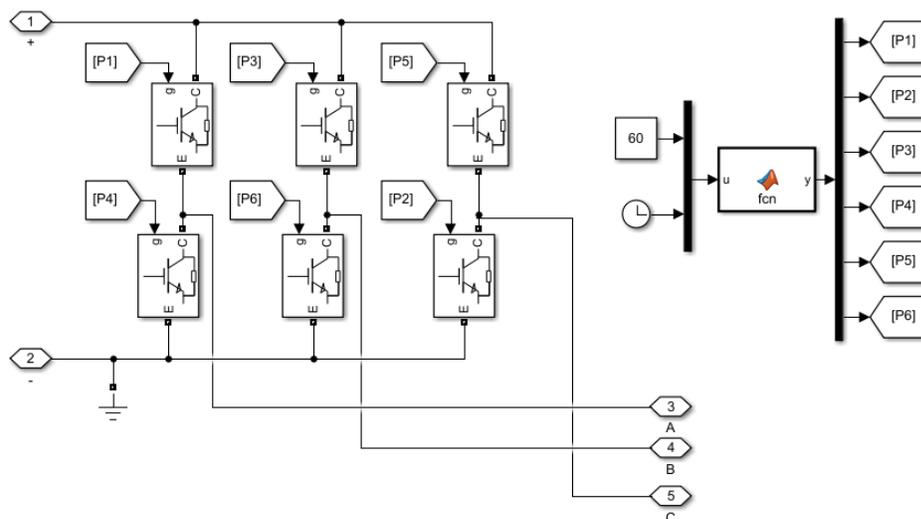


Fig. 15 Subsistema del inversor.
Fuente: Autor

El código en Matlab para la generación de los pulsos se encuentra en el ANEXO A donde se ingresa el tiempo y la frecuencia del sistema, una forma de representación gráfica del algoritmo, se muestra en la Fig. 16 donde se observa cada uno de los pasos a seguir.

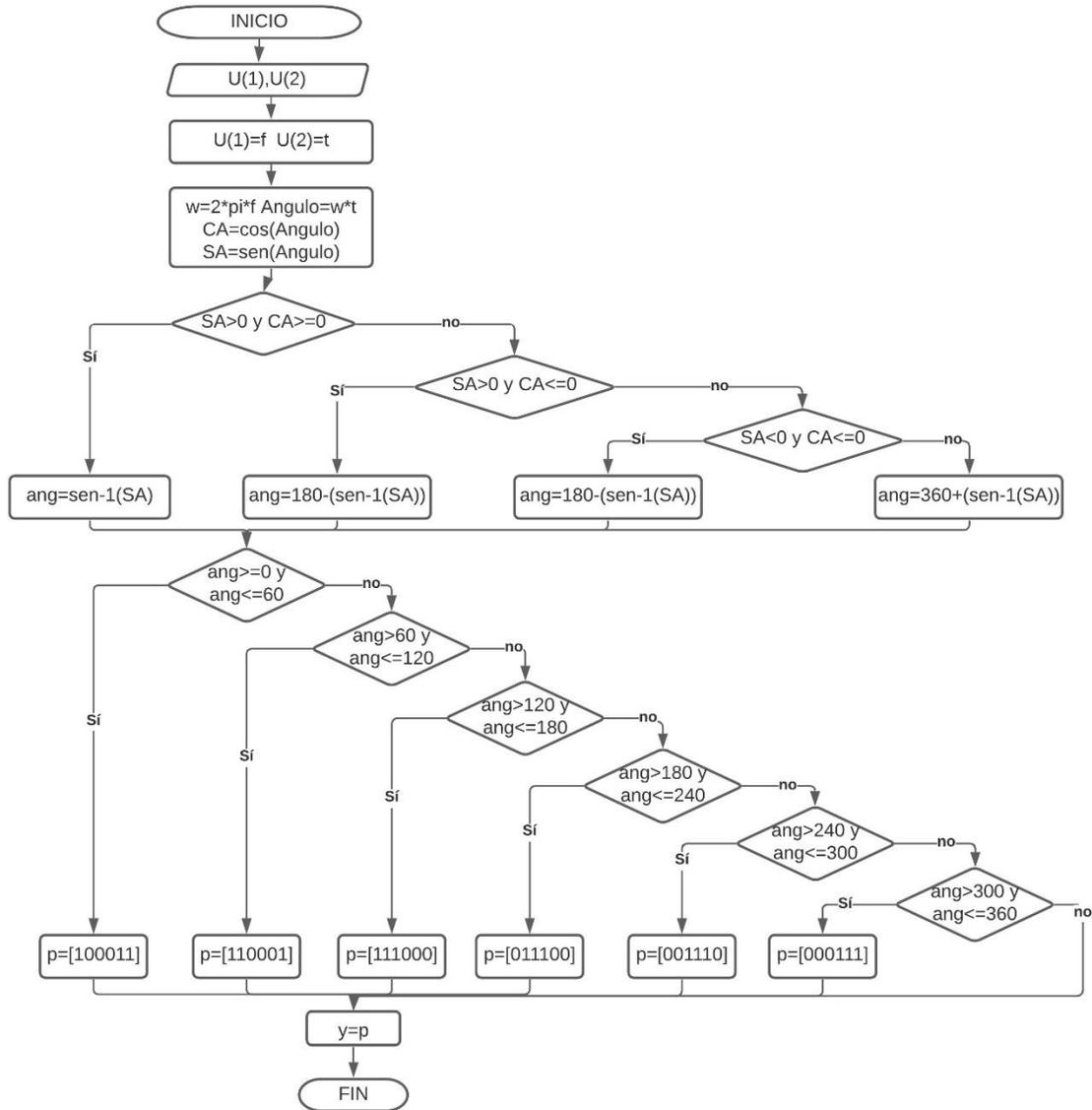


Fig. 16 Diagrama de flujo del código para la generación de pulsos
Fuente: Autor

En el modelo del transformador elevador de salida esta alimentado en el lado secundario, por el inversor del sistema de generación fotovoltaica por medio de la barra (B5). Por el lado primario del transformador se alimenta la barra (B6), la cual entrega las señales de salida a la carga como se muestra en la Fig. 12.

Además, entre la barra (B5) y el transformador (Transf3) están conectadas unas cargas RL (en serie internamente) y C (en delta internamente) que cumplen con la función de dar estabilidad a la tensión y la corriente que es entregada al sistema, cuyos parámetros se muestran en la Tabla 7.

Tabla 7 Parámetros de la carga RL y C del generador fotovoltaico

Carga RL	Resistencia (Ohms)	Inductancia (H)	
	4.6818x10-04	1.2419x10-04	
Carga C	Tensión línea – línea (Vrms)	Potencia Activa (W)	Potencia Reactiva – capacitancia (VAR)
	249.848	400	20000

Los parámetros de salida en este bloque por los equipos que conforman el generador fotovoltaico:

Tabla 8 Parámetros del bloque de generación fotovoltaica

	Tensión línea – línea (RMS)	Potencia
Generador (Paneles Solares)	510 V	255kVA
Transformador (Transf 3)	Primario: 13.8kV	200kVA
	Secundario: 249.848V	

En la Fig. 13 se tiene la onda de salida de tensión y corriente del generador fotovoltaico en donde se puede observar una onda cuadrada debido a la activación de los IGBT del inversor.

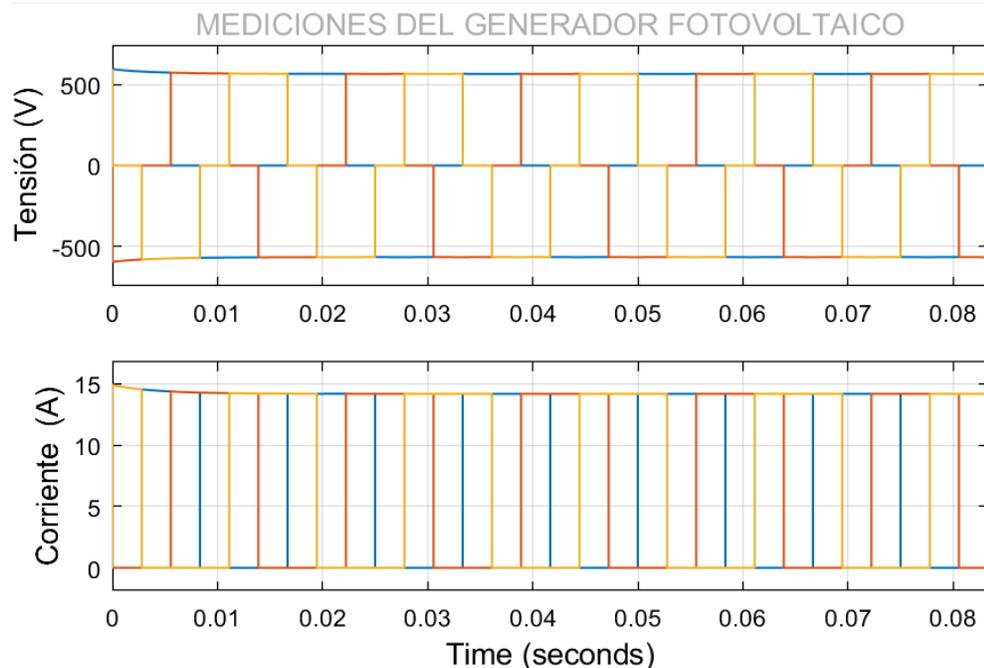


Fig. 17 Señales de salida del generador fotovoltaico.
Fuente: Autor

6.5 CARGA LINEAL

En el modelo de la carga lineal de la Fig. 12, se conecta a la barra (B7), donde se alimentan diferentes cargas del tipo lineal. Estas cargas se representan como una sola carga lineal la cual se conforma por una resistencia y una inductancia cuyos parámetros se encuentran en la Tabla 9.

Tabla 9 Parámetros del bloque de la carga lineal

	Tensión línea – línea (RMS)	Potencia Activa	Potencia Reactiva
Carga lineal	13.8kV	400kW	39.9kVAR

6.6 CARGA NO LINEAL

Este modelo de carga no lineal es una de las responsables de generar los armónicos que afectan al sistema eléctrico de la Fig. 12. Donde el regulador de potencia se encuentra conectado al sistema eléctrico de potencia a la barra (B7), por medio de esta carga no lineal se representa el control de potencia entregada a un motor, modelado como un circuito RL. Este modelo de regulador de potencia está dentro de un subsistema en simulink como se muestra en la Fig. 18, el cual está integrado por la carga RL que es el modelo del motor, además por un TRIAC que nos permitirá controlar la potencia entregada a la carga, mediante la variación del ángulo de conducción.

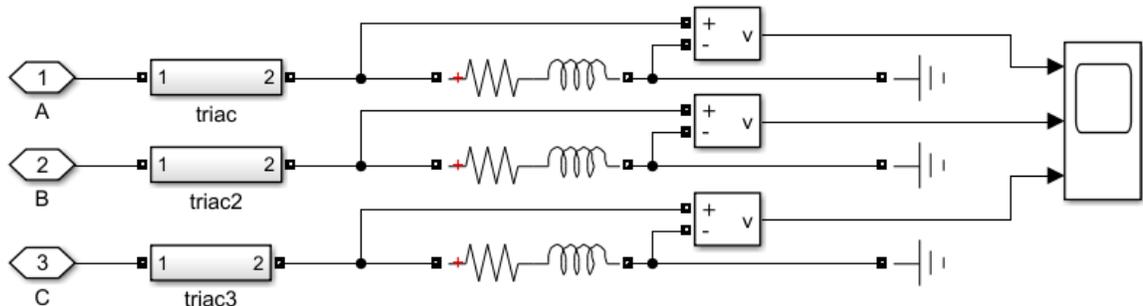


Fig. 18 Subsistema del regulador de potencia.

Fuente: Autor

Los parámetros implementados en el modelo del motor representado como una carga RL se muestran en la Tabla 10:

Tabla 10 Parámetros del modelo del motor

	Tensión línea – línea (RMS)	Potencia Activa	Potencia Reactiva
Modelo del motor (RL)	13.8kV	100kW	100 VAR

Debido que en Simulink no existe un modelo de TRIAC, este se elabora dentro de un subsistema en el cual se encuentran conectados dos tiristores en anti-paralelo como se muestra en la Fig. 19. Donde el tren de pulsos implementado para activar la puerta del TRIAC, cumple la misma función que un DIAC, este tren de pulsos tiene entre sus parámetros la frecuencia del sistema y el ángulo de disparo.

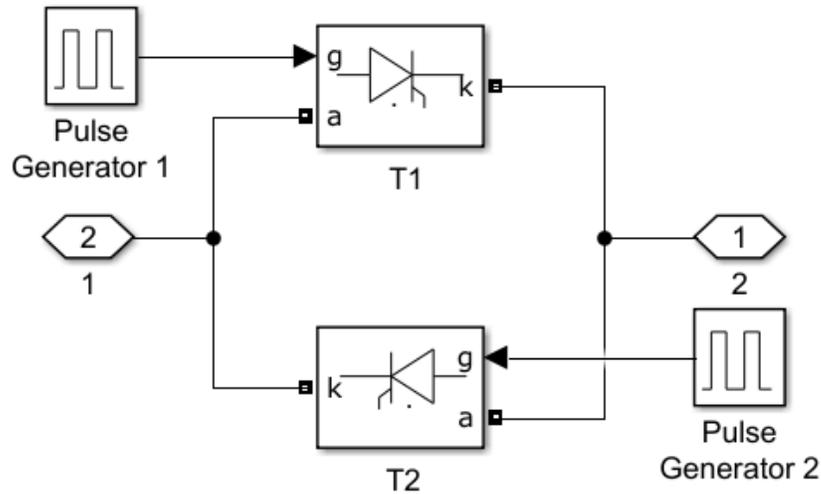


Fig. 19 Subsistema de modelo de un TRIAC.
Fuente: Autor

Los parámetros de los trenes de pulsos que se tienen en la Fig. 19, donde el ángulo de disparo esta denotado por la sigla A que se encuentran en la Tabla 11.

Tabla 11 Parámetros de trenes de pulsos para la activación del TRIAC

FASES	N° DEL TREN	Amplitud	Periodo (seg)	Ancho del pulso (%)	Retardo de fase (seg)
A	1	1	1/60	5	$(A*1/60)/360$
	2	1	1/60	5	$((180+A)*1/60)/360$
B	1	1	1/60	5	$((A+120)*1/60)/360$
	2	1	1/60	5	$((180+(A+120))*1/60)/360$
C	1	1	1/60	5	$((A-120)*1/60)/360$
	2	1	1/60	5	$((180+(A-120))*1/60)/360$

La señal de salida en la carga RL donde se muestra el disparo de las fases se puede observar en la Fig. 20.

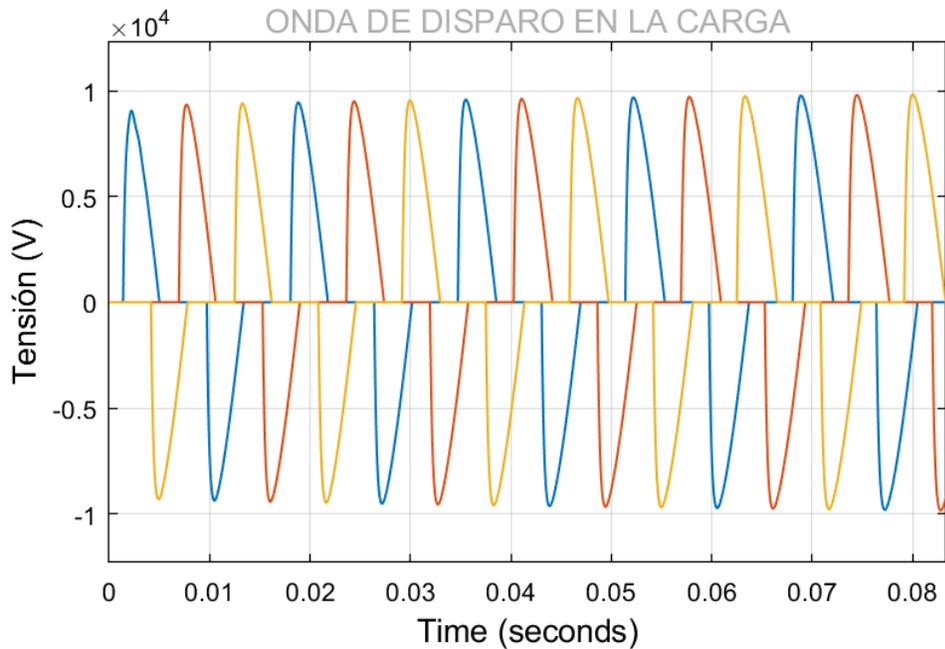


Fig. 20 Señal de salida de la carga RL controlada por el TRIAC
Fuente: Autor

Como se puede observar en este capítulo se realizó el diseño y montaje del circuito representando un sistema eléctrico de potencia, donde se encuentran los diferentes componentes del sistema, cargas lineales y los bloques que generan el contenido armónico como lo son las cargas no lineales (inversor – regulador de potencia) que afectan a la red eléctrica, cada uno de los componentes tienen características y parámetros definidos que permiten verificar el correcto funcionamiento del sistema junto a la generación de los armónicos y la evaluación del contenido armónico la cual se realizará mediante la función “FFT analysis” del bloque POWERGUI, lo que permite una mayor precisión en los cálculos, para verificar el cumplimiento del sistema con la normativa IEEE 519 – 2014.

7. SIMULACIÓN DEL SISTEMA ELÉCTRICO

Una vez descrito el sistema eléctrico utilizado y su montaje en el programa simulink de Matlab, en este capítulo se presentan los resultados durante las simulaciones realizadas con el programa desarrollado. Donde se plantean seis escenarios, los cuales mostraran el comportamiento del sistema eléctrico para así poder diferenciar el efecto que tienen los armónicos generados por las cargas no lineales conectas al sistema, además, conocer que carga no lineal inyecta más contenido de armónico. Estos escenarios se dividen en dos grupos dependiendo de la conexión de los generadores:

En el primer grupo se encuentran los dos generadores funcionando, donde el generador fotovoltaico, representa una carga no lineal debido a que tiene conectado el inversor, en este grupo se presentan 3 escenarios que son:

- Todos los componentes y cargas conectadas
- Los dos generadores y la carga lineal
- Los dos generadores y la carga no lineal (regulador de potencia)

En el segundo grupo se encuentra solo el generador sincrónico conectado, el cual es la única fuente de alimentación del sistema y en este se presentan 3 escenarios que son:

- El generador sincrónico con la carga lineal y la carga no lineal (regulador de potencia) conectadas
- El generador sincrónico con la carga lineal
- El generador sincrónico con la carga no lineal (regulador de potencia)

A continuación, se explicarán las características de cada uno de los escenarios de las simulaciones planteadas, donde estas simulaciones del sistema se realizarán en 5 ciclos y el análisis del contenido armónico se realizará hasta el armónico 50, por lo cual se establece que este cálculo se hace después del segundo ciclo por un periodo de 3 ciclos, esto debido a que al inicio del sistema es desbalanceado. Otro aspecto a considerar es que en la carga no lineal que se integra por el TRIAC y la carga controlada, donde se establece un ángulo de disparo del TRIAC de 30° .

7.1 TODOS LOS COMPONENTES Y CARGAS CONECTADAS

En esta sección, se realiza la simulación N°1, donde se presenta el análisis de los parámetros eléctricos del sistema mostrado en el diagrama de bloques desarrollado en simulink de la Fig. 21 donde se encuentran operando las dos cargas no lineales, donde una de ellas esta conecta en el generador fotovoltaico que es el inversor del sistema, la otra es el regulador de potencia por medio de TRIAC para una carga RL, conectado en paralelo con la carga lineal RL.

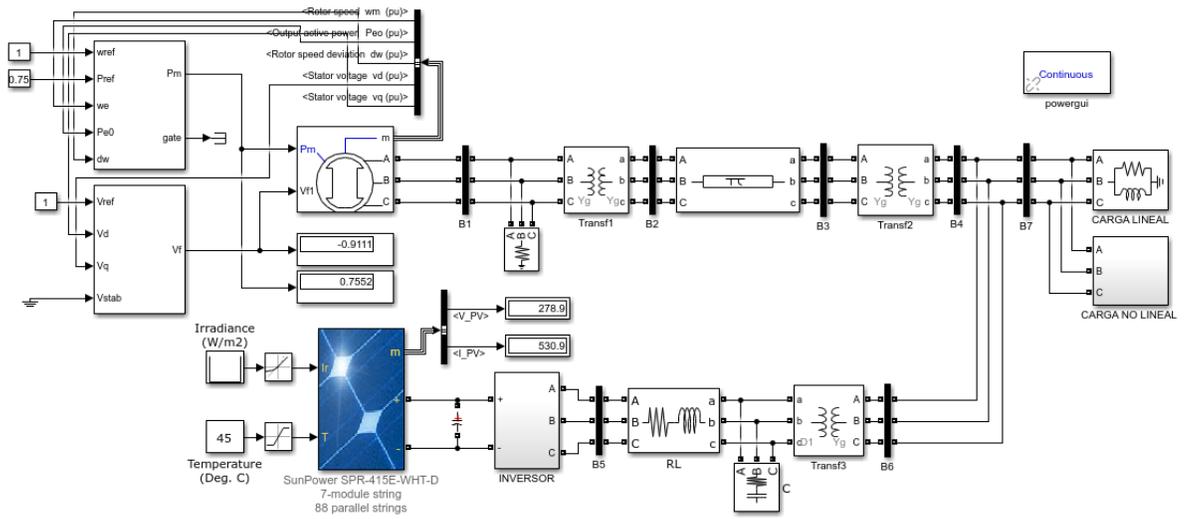


Fig. 21 Simulación de todos los componentes y cargas conectadas.

Fuente: Autor

7.1.1 Efectos de los armónicos en las ondas de la tensión

En la Fig. 22, se muestran las gráficas de tensión eléctrica de las tres fases obtenidas a través del bloque de medición B7 de la carga mostrado en la Fig. 21. Donde se observa que la señal NO es sinusoidal y su valor máximo es 19.5kV de línea –línea, su valor RMS es de 13.79kV.

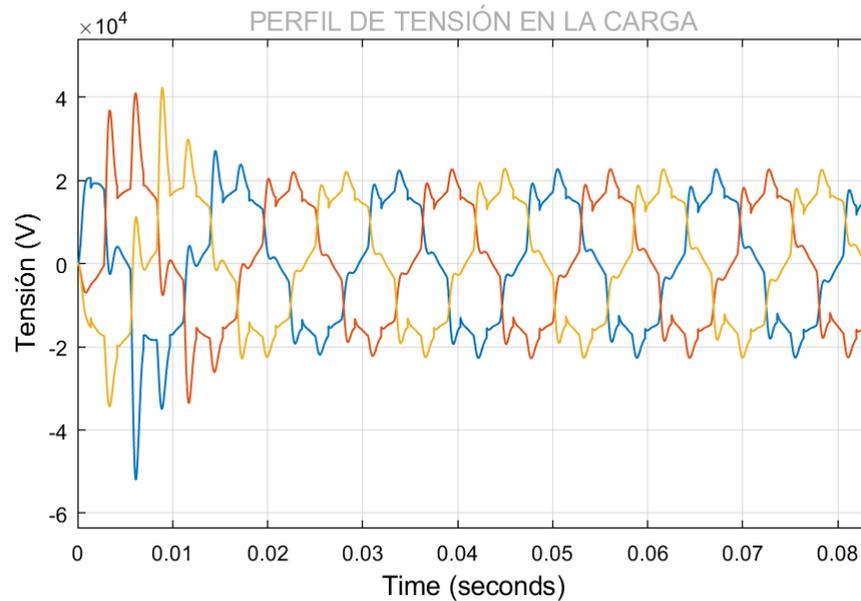


Fig. 22 Perfil de tensión (Simulación 1).

Fuente: Autor

7.1.2 Efectos de los armónicos en las ondas de la corriente

En la Fig. 23, se muestra la señal de corriente obtenida en el punto de medición B7 de la Fig. 21, la cual es obtenida en las terminales de la carga, donde se puede observar que esta señal NO es sinusoidal y su valor máximo es de 27.93 A de línea – línea, su valor RMS es de 19.75A.

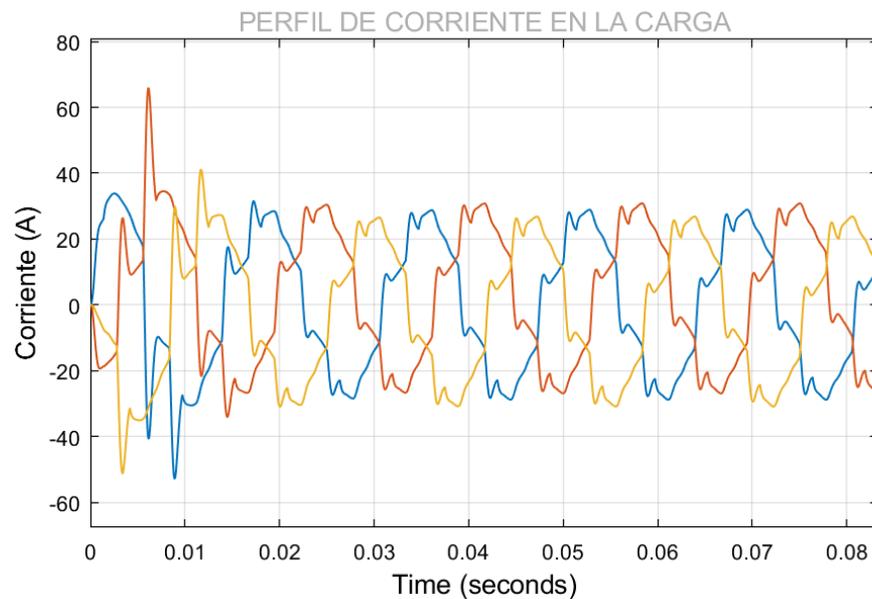


Fig. 23 Perfil de corriente (Simulación 1).
Fuente: Autor

7.1.3 Cálculo de la distorsión armónica de la tensión y la corriente

En las Fig. 24 y Fig. 25 se muestran los espectros del cálculo de la distorsión armónica (THD) de la tensión y corriente por medio de la función FFT Analysis (La transformada rápida de Fourier), del bloque Powergui, donde se puede observar que el cálculo se realizó hasta el armónico N°50, además del % de los armónicos que influyen la señal, por otra parte se tiene las señales de entrada que corresponden a las ondas de salida de la carga de la fase A, donde se evidencia que corresponde a 5 ciclos de la señal, en la cual la parte roja de la señal que son 3 ciclos, representa la zona a evaluar la distorsión.

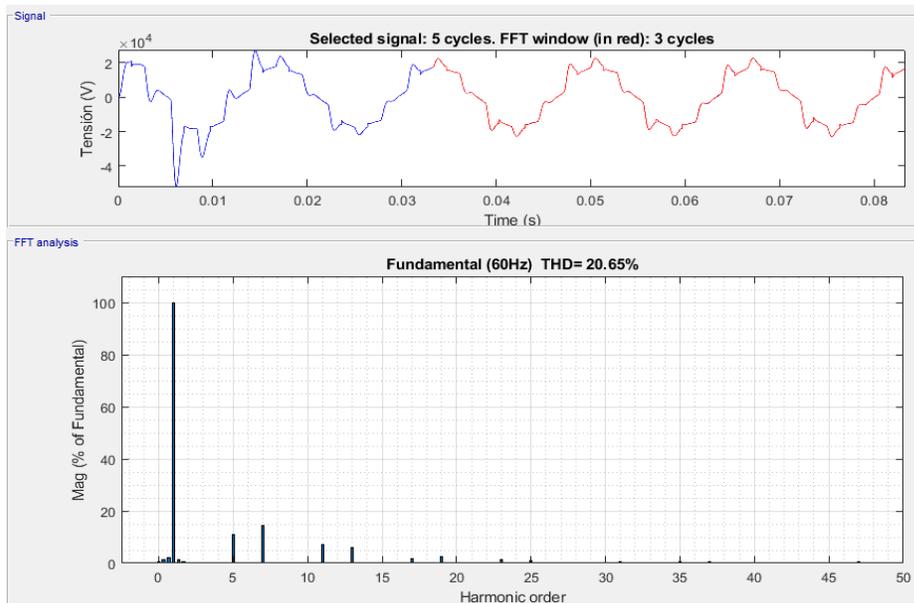


Fig. 24 Distorsión armónica total de la tensión (Simulación 1).
Fuente: Autor

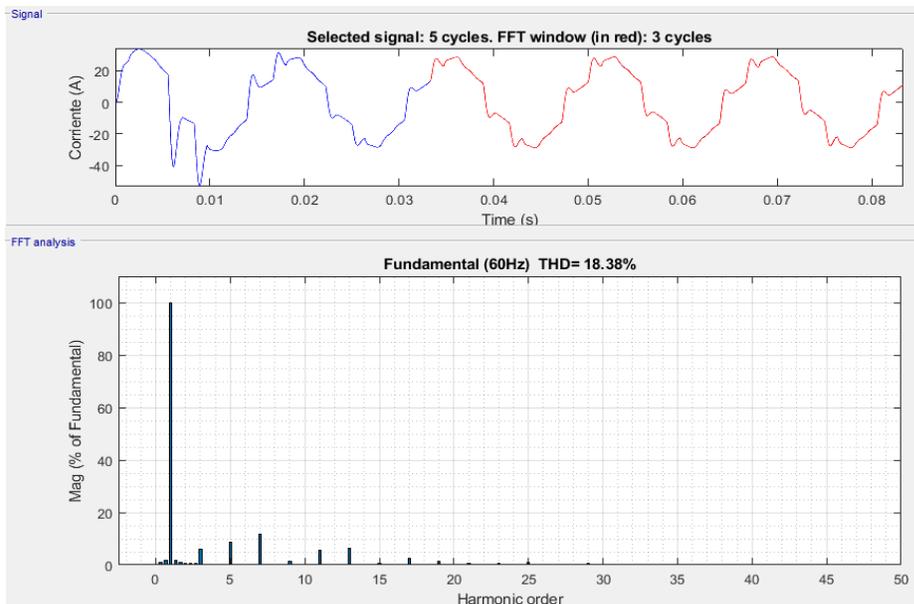


Fig. 25 Distorsión armónica total de la corriente (Simulación 1).
Fuente: Autor

Para reforzar los resultados de la THD mostrados en las Fig. 24 y Fig. 25, se presenta la Tabla 12 donde se muestra las componentes armónicas hasta el orden N° 25 presentes en las señales del sistema, así como en % de los armónicos individuales.

Tabla 12 Espectro armónico de la corriente y tensión en la carga (Simulación 1).

SIMULACIÓN 1		TENSIÓN	CORRIENTE
ORDEN	FRECUENCIA (HZ)	%	%
0	0	0.54	0.20
1	60	100	100
2	120	0.30	0.54
3	180	0.19	6.05
4	240	0.02	0.15
5	300	10.95	8.55
6	360	0.06	0.04
7	420	14.36	11.83
8	480	0.04	0.03
9	540	0.05	1.22
10	600	0.06	0.03
11	660	7.05	5.77
12	720	0.06	0.08
13	780	5.79	6.17
14	840	0.07	0.08
15	900	0.02	0.42
16	960	0.06	0.07
17	1020	1.82	2.43
18	1080	0.04	0.06
19	1140	2.33	1.51
20	1200	0.04	0.06
21	1260	0.01	0.39
22	1320	0.03	0.05
23	1380	1.32	0.76
24	1440	0.03	0.04
25	1500	1.06	1.07

Como se puede observar en esta simulación el sistema está altamente distorsionado, donde inicialmente es más notorio debido a que el generador sincrónico requiere un corto tiempo para estabilizarse al igual que el generador fotovoltaico, por otra parte, se puede decir que es más evidente el disturbio de la generación fotovoltaica a comparación de la carga no lineal (regulador de potencia). Además, los armónicos que más afectan a las señales son los de orden 5th – 7th – 11th – 13th, debido a que su porcentaje (%) es más alto.

7.2 LOS DOS GENERADORES Y LA CARGA LINEAL

En esta parte, se realiza la simulación N°2, donde se presenta el análisis del diagrama de bloques desarrollado en simulink de la Fig. 26, el cual tiene conectado al sistema la carga lineal RL, así como el generador fotovoltaico que representa una carga no lineal por el inversor del sistema.

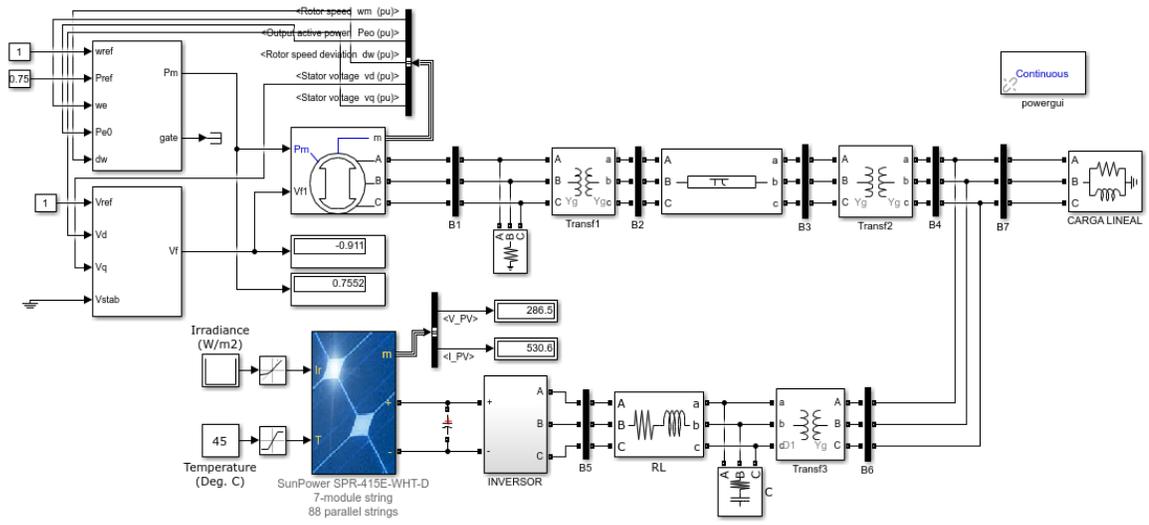


Fig. 26 Simulación de los dos generadores y la carga lineal.
Fuente: Autor

7.2.1 Efectos de los armónicos en las ondas de la tensión

En la Fig. 27, se muestran las gráficas de tensión eléctrica de las tres fases. Donde se puede observar que la señal NO es sinusoidal y su valor máximo es 20.28kV de línea –línea, su valor RMS es de 14.34kV.

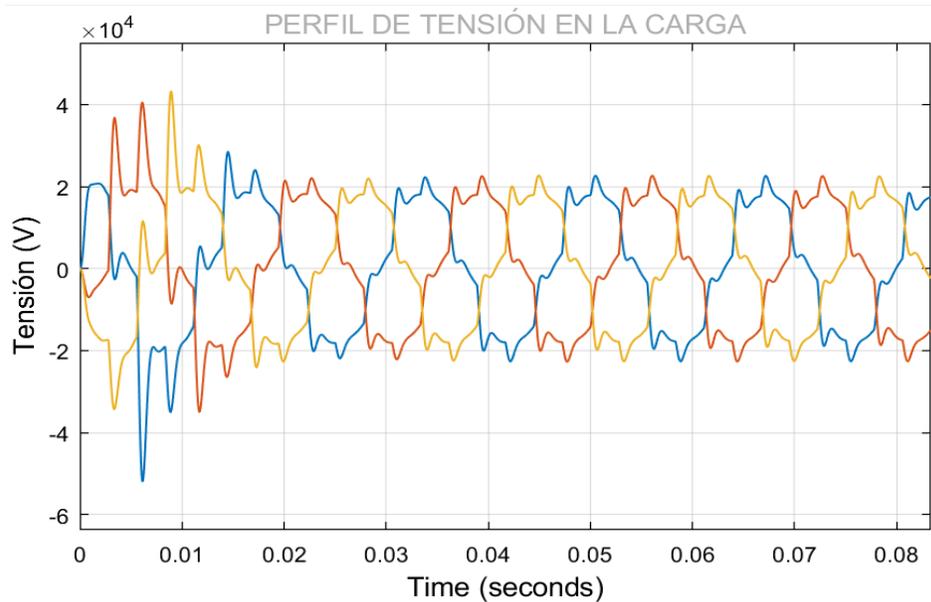


Fig. 27 Perfil de tensión (Simulación 2).
Fuente: Autor

7.2.2 Efectos de los armónicos en las ondas de la corriente

En la Fig. 28, se muestra la señal de corriente obtenida en el punto de medición B7 donde estas señales son obtenidas en las terminales de la carga, además en Fig. 28 se puede observar que esta señal NO es sinusoidal y su valor máximo es de 24.79 A de línea – línea, su valor RMS es de 17.53A.

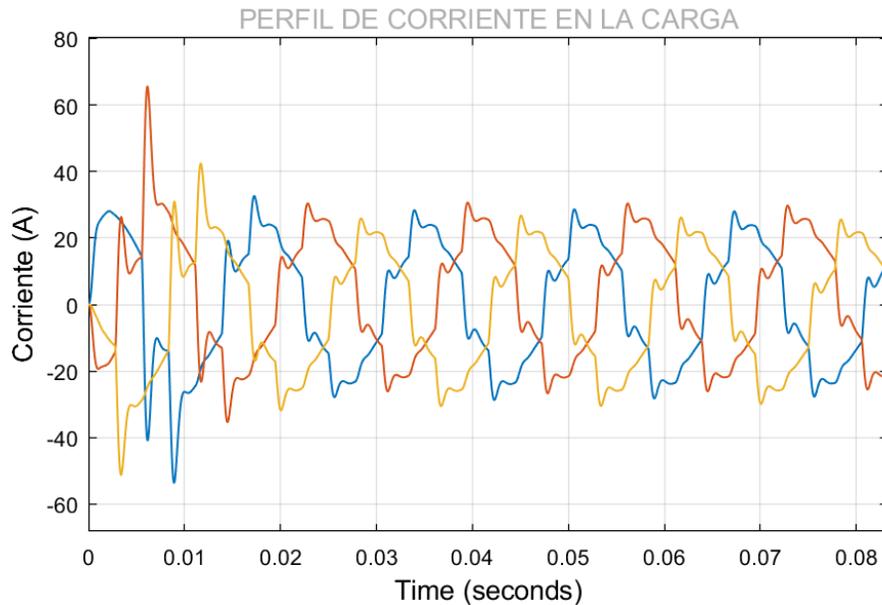


Fig. 28 Perfil de corriente (Simulación 2).
Fuente: Autor

7.2.3 Calculo de la distorsión armónica de la tensión y la corriente

Las distorsiones provocadas por los armónicos de las gráficas Fig. 27 y Fig. 28 de tensión y corriente se muestran en las Fig. 29 y Fig. 30 respectivamente, donde se muestran los espectros del cálculo de la distorsión armónica (THD) hasta el armónico N°50, calculado por el bloque Powergui mediante la función FFT Analysis, además se muestra el % de los armónicos que influyen la señal, por otra parte se tiene las señales de entrada que corresponden a las ondas de salida de la carga de la fase A, donde se evidencia que corresponde a 5 ciclos de la señal, en la cual la parte roja de la señal que son 3 ciclos, representa la zona a evaluar la distorsión.

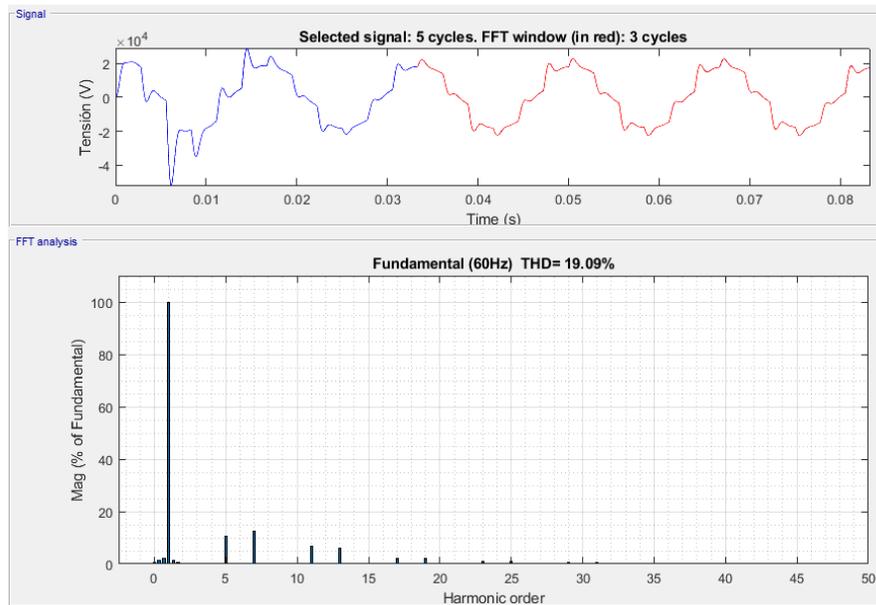


Fig. 29 Distorsión armónica total de la tensión (Simulación 2).
Fuente: Autor

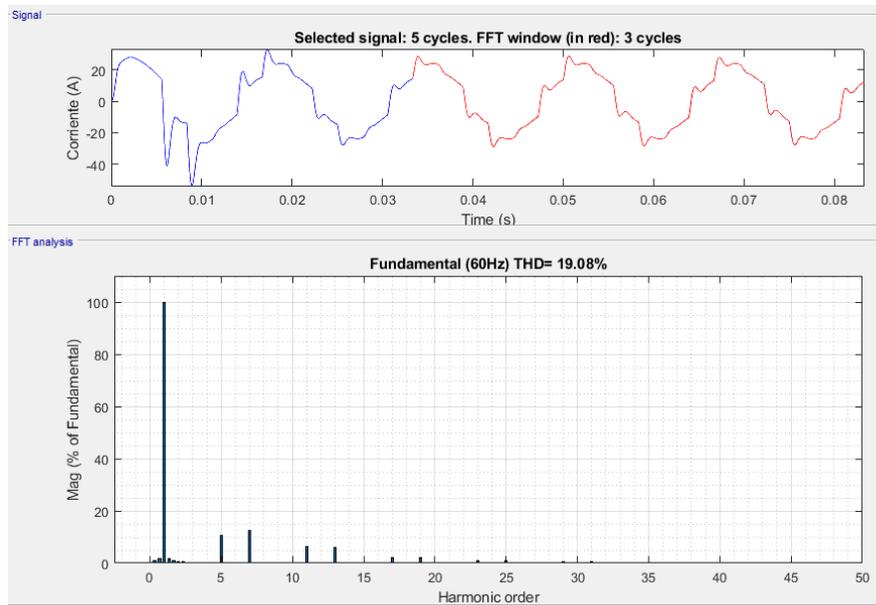


Fig. 30 Distorsión armónica total de la corriente (Simulación 2).
Fuente: Autor

Para reforzar los resultados de la THD mostrados en las Fig. 29 y Fig. 30, se presenta la Tabla 13 donde se muestra las componentes armónicas hasta el orden N° 25 presentes en las señales del sistema, así como en % de los armónicos individuales.

Tabla 13 Espectro armónico de la corriente y tensión en la carga (Simulación 2).

SIMULACIÓN 2		TENSIÓN	CORRIENTE
ORDEN	FRECUENCIA (HZ)	%	%
0	0	0,52	0.19
1	60	100	100
2	120	0,3	0.53
3	180	0,14	0.32
4	240	0,03	0.19
5	300	10,58	10.62
6	360	0.08	0.09
7	420	12.62	12.56
8	480	0.03	0.07
9	540	0.03	0.09
10	600	0.04	0.05
11	660	6.57	6.51
12	720	0.05	0.09
13	780	5.99	5.95
14	840	0.04	0.07
15	900	0.02	0.05
16	960	0.03	0.06
17	1020	2.18	2.14
18	1080	0.03	0.06
19	1140	2.06	2.03
20	1200	0.02	0.05
21	1260	0.02	0.04
22	1320	0.02	0.04
23	1380	0.91	0.88
24	1440	0.02	0.04
25	1500	0.88	0.86

En esta simulación el sistema está menos distorsionado a comparación del apartado 7.1, esto es debido a la desconexión de la carga no lineal del regulador de potencia que acciona un modelo de un motor representado como una carga RL. Además, se presenta un perfil de tensiones balanceado, pero con una tensión en las terminales de salida del sistema elevada debido a que se tiene un sistema en donde la potencia generada es mayor a la potencia consumida. Además, igualmente que la simulación 1 del apartado 7.1 los armónicos que más afectan a las señales son los de orden 5th – 7th – 11th – 13th, debido a que su porcentaje (%) es más alto.

7.3 LOS DOS GENERADORES Y LA CARGA NO LINEAL (REGULADOR DE POTENCIA)

En esta sección, se realiza la simulación N°3, donde se presenta el análisis de las dos cargas no lineales conectadas al sistema como se muestra en el diagrama de bloques desarrollado en simulink de la Fig. 31.

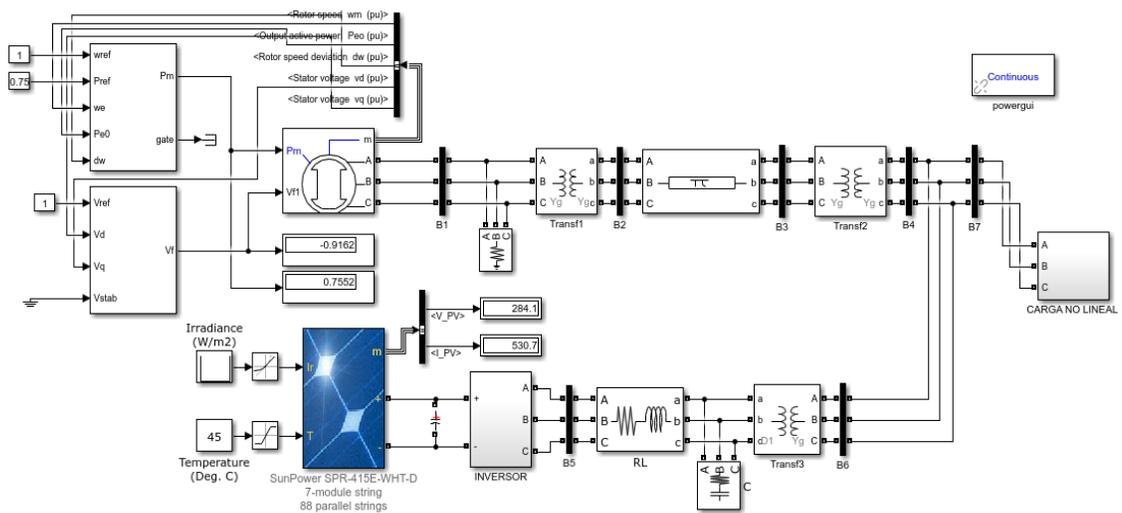


Fig. 31 Simulación de los dos generadores y la carga no lineal (regulador de potencia).

Fuente: Autor

7.3.1 Efectos de los armónicos en las ondas de la tensión

Las gráficas de tensión eléctrica de las tres fases obtenidas a través del bloque de medición B7 de la carga se muestran en la Fig. 32, donde se observa que la señal NO es sinusoidal y su valor máximo es 21.76kV de línea –línea, su valor RMS es de 15.39kV.

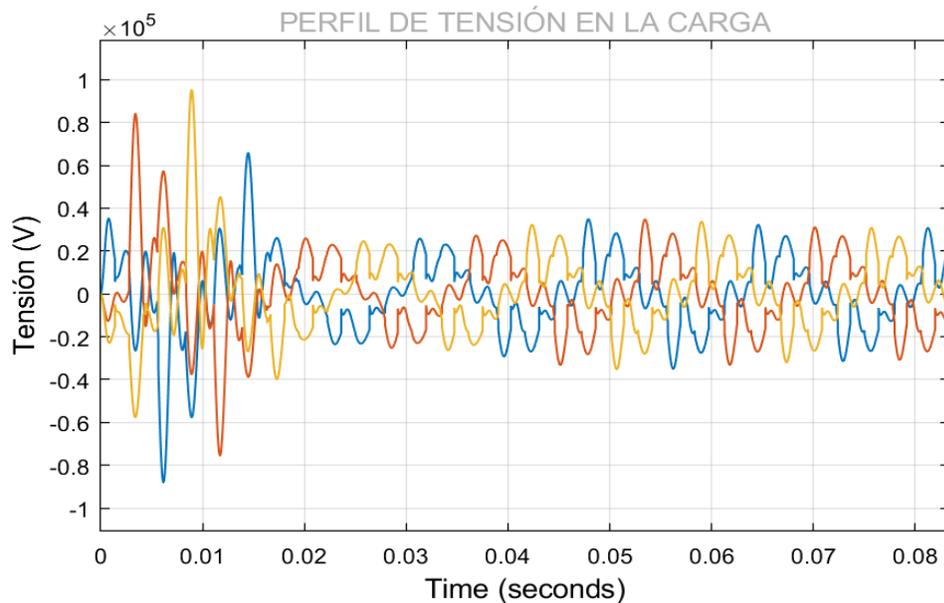


Fig. 32 Perfil de tensión (Simulación 3).

Fuente: Autor

7.3.2 Efectos de los armónicos en las ondas de la corriente

En la Fig. 33, se muestra la señal de corriente obtenida en el punto de medición B7, la cual es obtenida en las terminales de la carga, donde se puede observar que esta señal NO es sinusoidal y su valor máximo es de 14.99A de línea – línea, su valor RMS es de 10.6A.

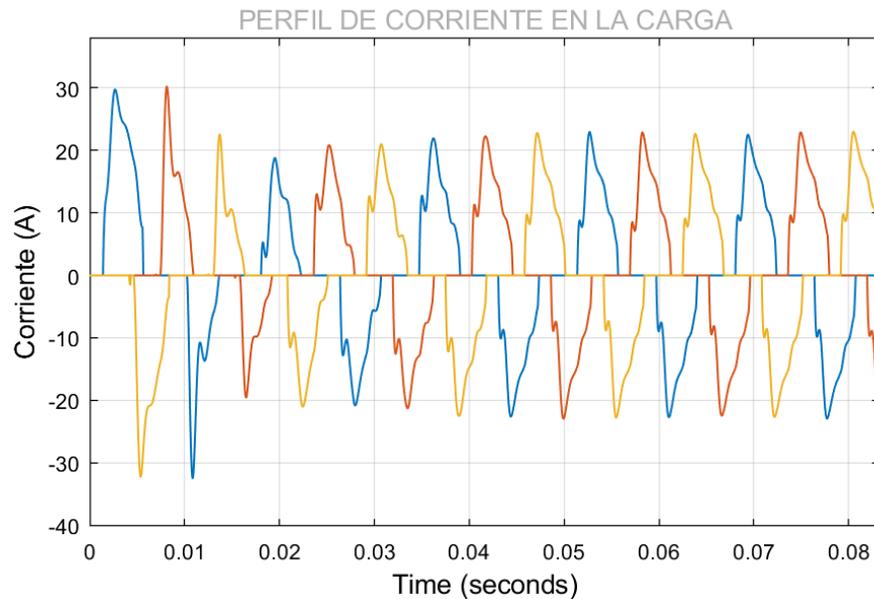


Fig. 33 Perfil de corriente (Simulación 3).
Fuente: Autor

7.3.3 Calculo de la distorsión armónica de la tensión y la corriente

En las Fig. 34 y Fig. 35 se muestran los espectros del cálculo de la distorsión armónica (THD) de la tensión y corriente por medio de la función FFT Analysis (La transformada rápida de Fourier), del bloque Powergui, donde se puede observar que el cálculo se realizó hasta el armónico N°50, además del % de los armónicos que influyen la señal, por otra parte se tiene las señales de entrada que corresponden a las ondas de salida de la carga de la fase A, donde se evidencia que corresponde a 5 ciclos de la señal, en la cual la parte roja de la señal que son 3 ciclos, representa la zona a evaluar la distorsión.

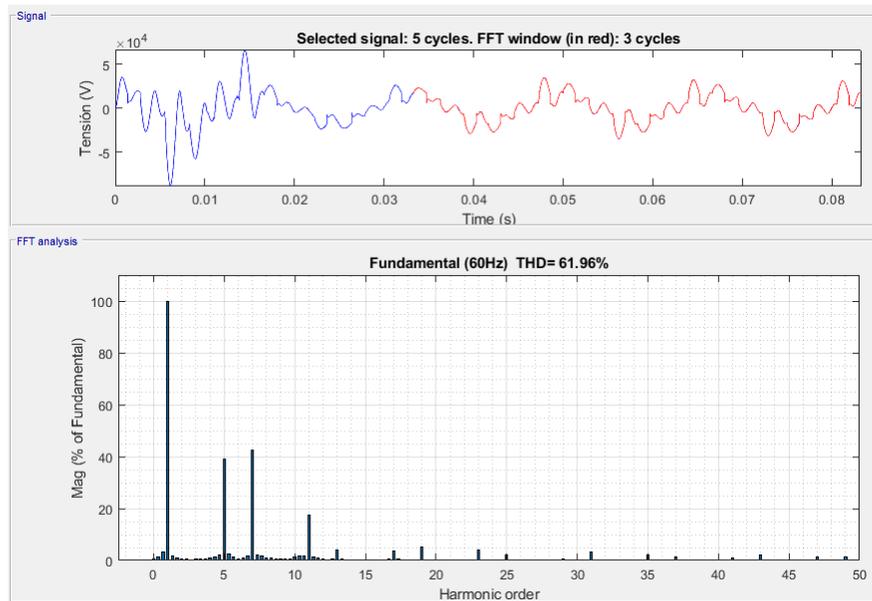


Fig. 34 Distorsión armónica total de la tensión (Simulación 3).
Fuente: Autor

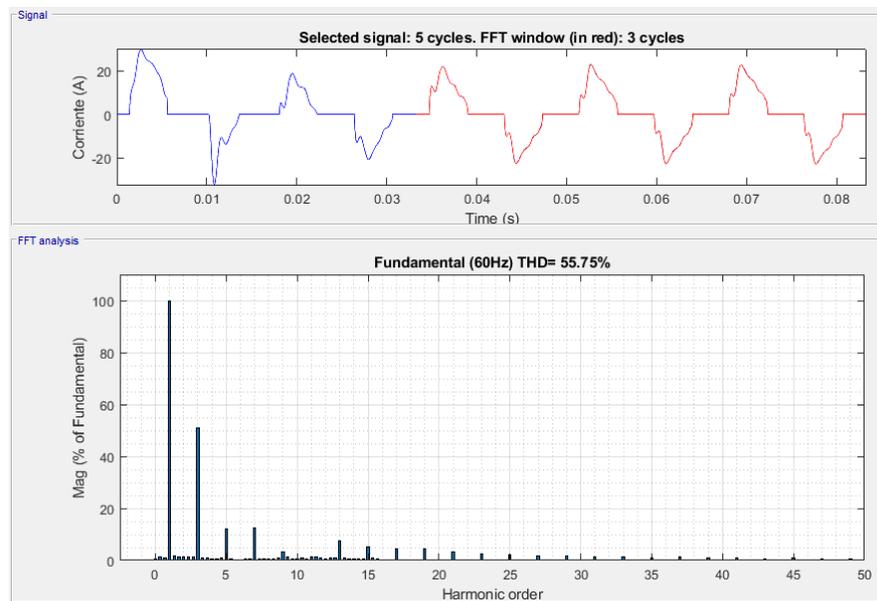


Fig. 35 Distorsión armónica total de la corriente (Simulación 3).
Fuente: Autor

Para reforzar los resultados de la THD mostrados en las Fig. 34 y Fig. 35, se presenta la Tabla 14 donde se muestra las componentes armónicas hasta el orden N° 25 presentes en las señales del sistema, así como en % de los armónicos individuales.

Tabla 14 Espectro armónico de la corriente y tensión en la carga (Simulación 3).

SIMULACIÓN 3		TENSIÓN	CORRIENTE
ORDEN	FRECUENCIA (HZ)	%	%
0	0	0.50	0.63
1	60	100	100
2	120	0.67	1.23
3	180	0.43	51
4	240	0.84	0.59
5	300	39.18	12.16
6	360	0.51	0.32
7	420	42.57	12.32
8	480	1.12	0.51
9	540	0.77	3.42
10	600	1.19	0.06
11	660	17.62	1.32
12	720	0.43	0.76
13	780	4.01	7.52
14	840	0.12	0.54
15	900	0.04	5.10
16	960	0.21	0.36
17	1020	3.84	4.43
18	1080	0.25	0.08
19	1140	5.16	4.57
20	1200	0.08	0.16
21	1260	0.05	3.21
22	1320	0.02	0.03
23	1380	4.05	2.67
24	1440	0.09	0.14
25	1500	2.18	2.25

En esta simulación el sistema está mucho más distorsionada a comparación del apartados 7.1 y 7.2, esto es debido que en el sistema se encuentran conectadas las dos cargas no lineales, una aspecto para tener en cuenta es que la distorsión de la corriente se ve más afecta por la carga no lineal la cual es el regulador de potencia. Además, igualmente que la simulación 1 y 2 los armónicos que más afectan a las señales son los de orden 5th – 7th – 11th – 13th adicional se tienen de los armónicos 17th – 19th – 20th.

7.4 EL GENERADOR SINCRÓNICO CON LA CARGA LINEAL Y NO LINEAL

En este caso, se realiza la simulación N°4, donde se utiliza el circuito mostrado en la Fig. 36 que muestra el diagrama desarrollado en simulink. La carga no lineal conectada es el regulador de potencia por medio de TRIAC para una carga RL, conectado en paralelo con la carga lineal RL.

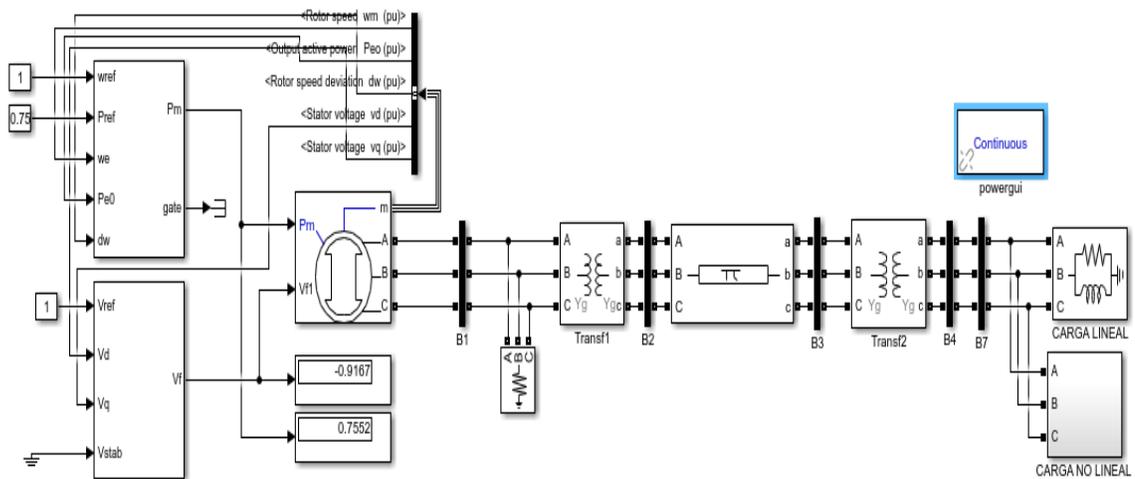


Fig. 36 Simulación del generador sincrónico con la carga lineal y la carga no lineal (regulador de potencia)
Fuente: Autor

7.4.1 Efectos de los armónicos en las ondas de la tensión

En la Fig. 37, se muestran las gráficas de tensión eléctrica de las tres fases, se observa que la señal NO es puramente sinusoidal y su valor máximo es 16.602kV de línea –línea, su valor RMS es de 11.74kV.

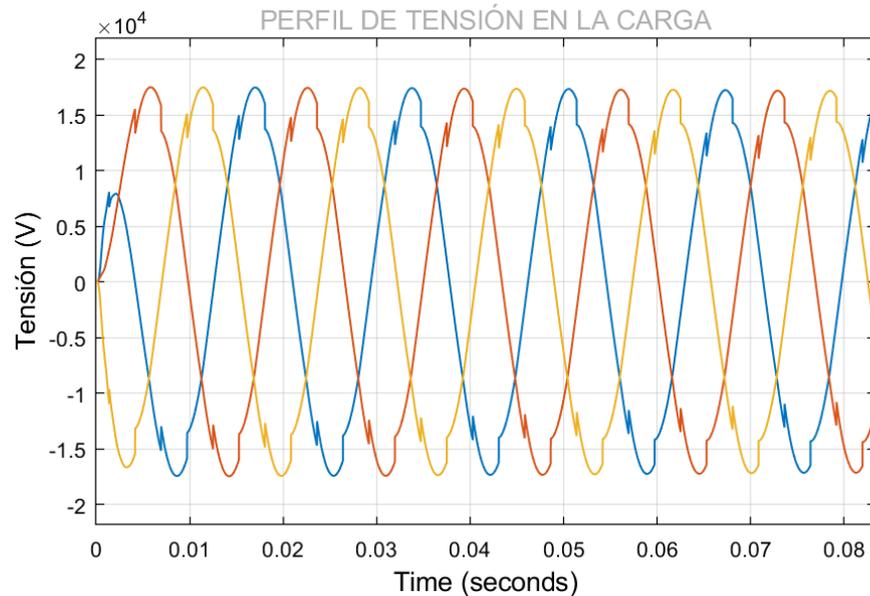


Fig. 37 Perfil de tensión (Simulación 4).
Fuente: Autor

7.4.2 Efectos de los armónicos en las ondas de la corriente

En la Fig. 38, se muestra la señal de corriente obtenida en el punto de medición B7, donde se puede observar que esta señal NO es completamente sinusoidal y su valor máximo es de 23.98A de línea – línea, su valor RMS es de 16.96A.

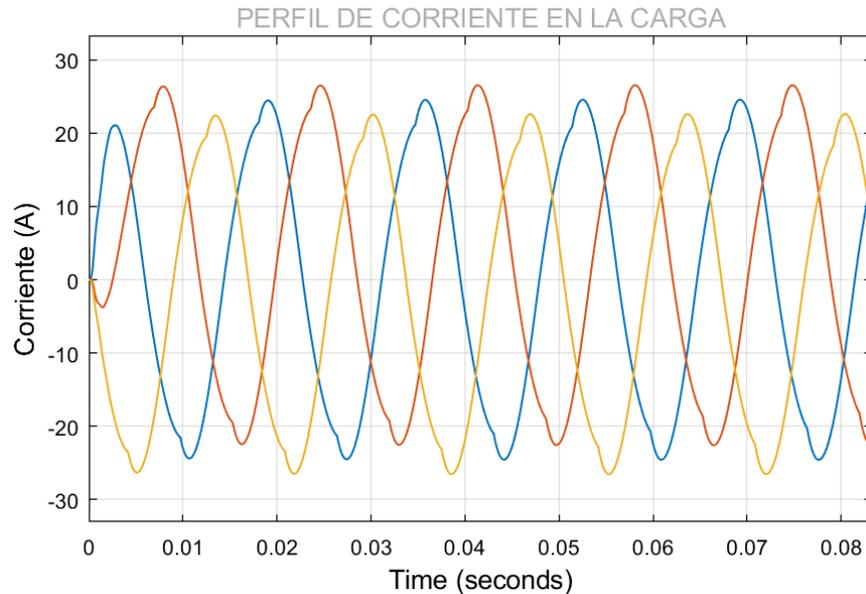


Fig. 38 Perfil de corriente (Simulación 4).
Fuente: Autor

7.4.3 Calculo de la distorsión armónica de la tensión y la corriente

Las distorsiones provocadas por los armónicos de tensión y corriente se muestran en las Fig. 39 y Fig. 40 respectivamente, donde se muestran los espectros del cálculo de la distorsión armónica (THD) hasta el armónico N°50, calculado por el bloque Powergui mediante la función FFT Analysis, además se muestra el % de los armónicos que influyen la señal, por otra parte se tiene las señales de entrada que corresponden a las ondas de salida de la carga de la fase A, donde se evidencia que corresponde a 5 ciclos de la señal, en la cual la parte roja de la señal que son 3 ciclos, representa la zona a evaluar la distorsión.

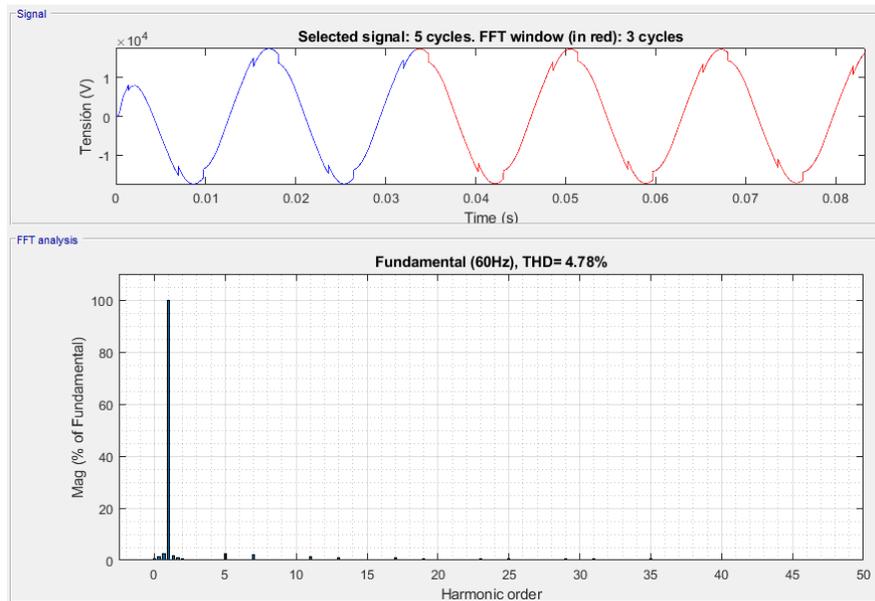


Fig. 39 Distorsión armónica total de la tensión (Simulación 4).
Fuente: Autor

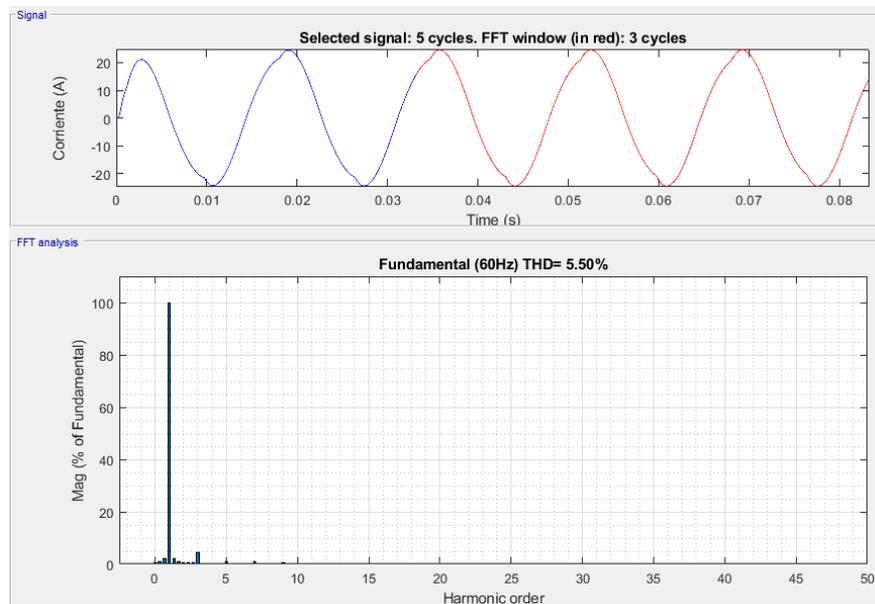


Fig. 40 Distorsión armónica total de la corriente (Simulación 4).
Fuente: Autor

Para reforzar los resultados de la THD mostrados en las Fig. 39 y Fig. 40, se presenta la Tabla 15 donde se muestra las componentes armónicas hasta el orden N° 25 presentes en las señales del sistema, así como en % de los armónicos individuales.

Tabla 15 Espectro armónico de la corriente y tensión en la carga (Simulación 4).

SIMULACIÓN 4		TENSIÓN	CORRIENTE
ORDEN	FRECUENCIA (HZ)	%	%
0	0	0,61	0,42
1	60	100	100
2	120	0,53	0,76
3	180	0,24	4,54
4	240	0,16	0,23
5	300	2,45	1,08
6	360	0,08	0,15
7	420	2,16	0,86
8	480	0,06	0,13
9	540	0,05	0,58
10	600	0,05	0,1
11	660	1,18	0,35
12	720	0,05	0,08
13	780	1,14	0,22
14	840	0,03	0,07
15	900	0,03	0,09
16	960	0,02	0,06
17	1020	0,92	0,12
18	1080	0,03	0,05
19	1140	0,75	0,13
20	1200	0,02	0,05
21	1260	0,02	0,13
22	1320	0,02	0,04
23	1380	0,6	0,1
24	1440	0,02	0,04
25	1500	0,55	0,05

Esta simulación está menos distorsionada a comparación de la primera etapa de las simulaciones debido que, en esta segunda etapa de las simulaciones del sistema, solo se conecta el generador sincrónico como fuente de alimentación, por lo que la mayor fuente de armónicos es el inversor por parte del generador fotovoltaico. Además, en el sistema se encuentran conectadas la carga lineal RL y la carga no lineal la cual es el regulador de potencia. Además, en esta simulación los porcentajes de distorsión individual de los armónicos está mucho más bajo que las anteriores simulaciones.

7.5 EL GENERADOR SINCRÓNICO CON LA CARGA LINEAL

En esta sección, se realiza la simulación N°5, donde se presenta el análisis de los parámetros eléctricos del sistema mostrado en el diagrama de bloques desarrollado en simulink de la Fig. 41 operando con la carga lineal solamente.

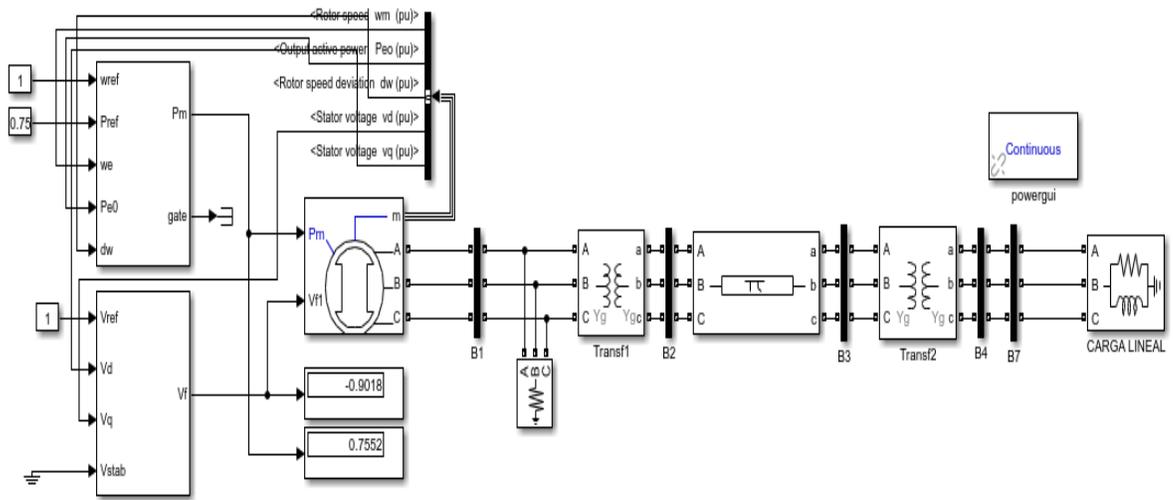


Fig. 41 Simulación del generador sincrónico con la carga lineal.
Fuente: Autor

7.5.1 Efectos de los armónicos en las ondas de la tensión

En la Fig. 42, se muestran las señales de tensión eléctrica de la carga, donde se puede observar que esta señal es puramente sinusoidal y su valor máximo es de 17.32Kv de línea – línea, su valor RMS es de 12.24Kv.

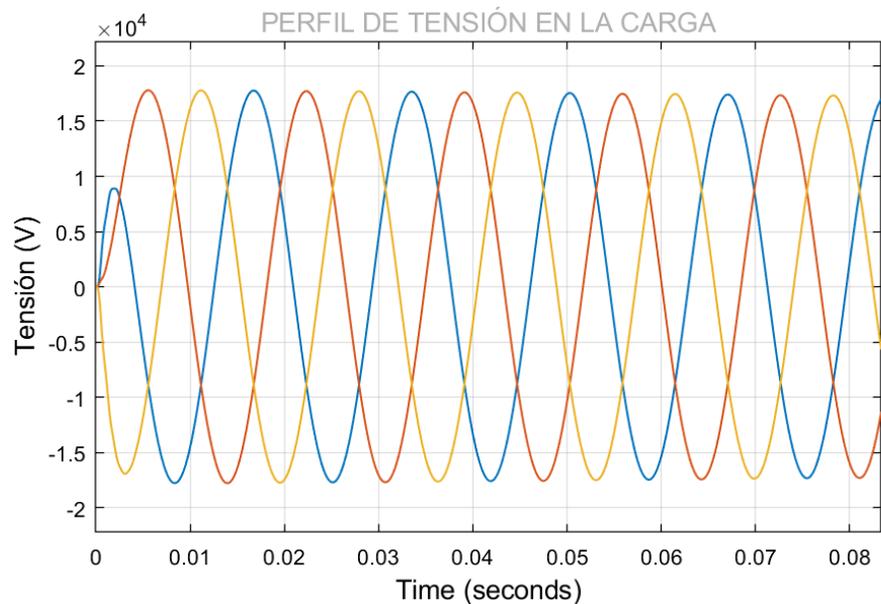


Fig. 42 Perfil de tensión (Simulación 5).
Fuente: Autor

7.5.2 Efectos de los armónicos en las ondas de la corriente

En la Fig. 43, se muestran las ondas de la corriente eléctrica obtenida en las terminales de la carga, donde se puede observar que esta señal es puramente sinusoidal y su valor máximo es de 21.14 A de línea – línea, su valor RMS es de 14.95 A.

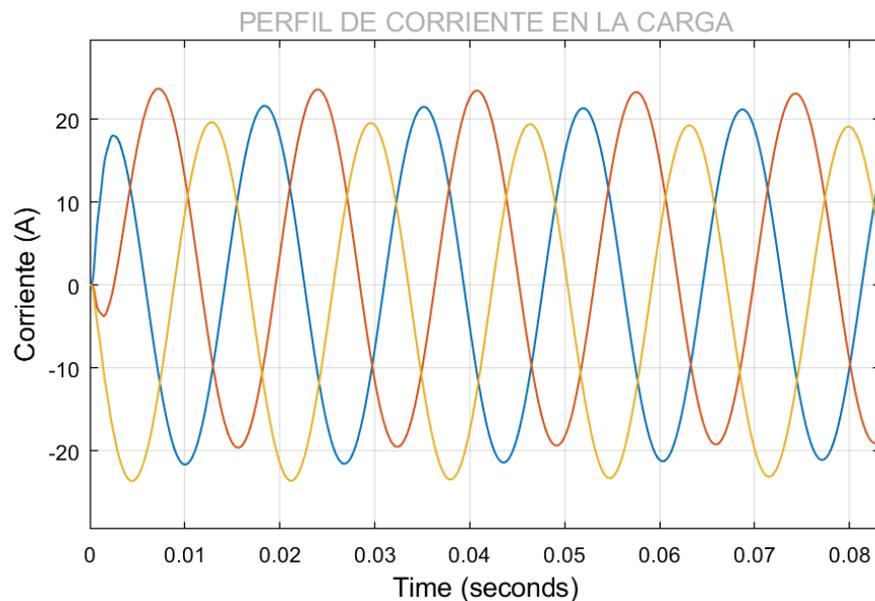


Fig. 43 Perfil de corriente (Simulación 5).
Fuente: Autor

7.5.3 Cálculo de la distorsión armónica de tensión

En esta simulación el sistema está mucho menos distorsionado a comparación del apartado 7.4, debido a que en el sistema se encuentra conectada solamente la carga lineal, en las Fig. 42 y Fig. 43 el sistema se observa balanceado y sinusoidal, aun así se realiza el cálculo de la distorsión armónica (THD) hasta el armónico N°50, calculado por el bloque Powergui mediante la función FFT Analysis, además se muestra el % de los armónicos que influyen la señal, por otra parte se tiene las señales de entrada que corresponden a las ondas de salida de la carga de la fase A, donde se evidencia que corresponde a 5 ciclos de la señal, en la cual la parte roja de la señal que son 3 ciclos, representa la zona a evaluar la distorsión.

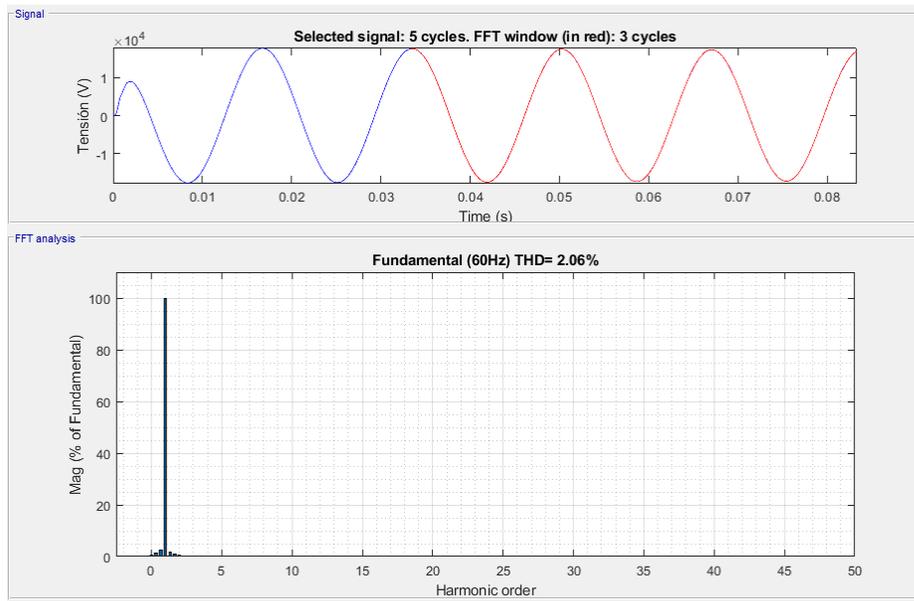


Fig. 44 Distorsión armónica total de la tensión (Simulación 5).
Fuente: Autor

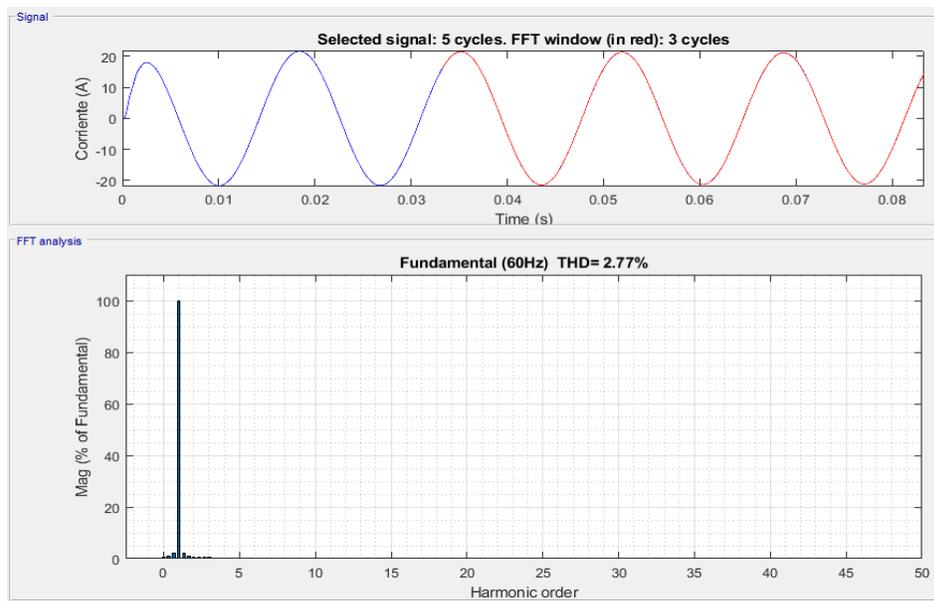


Fig. 45 Distorsión armónica total de la corriente (Simulación 5).
Fuente: Autor

7.6 EL GENERADOR SINCRÓNICO CON LA CARGA NO LINEAL (REGULADOR DE POTENCIA)

En esta parte, se realiza la simulación N°6, donde se presenta el análisis del diagrama de bloques desarrollado en simulink de la Fig. 46 el cual tiene conectado solamente al sistema la carga no lineal.

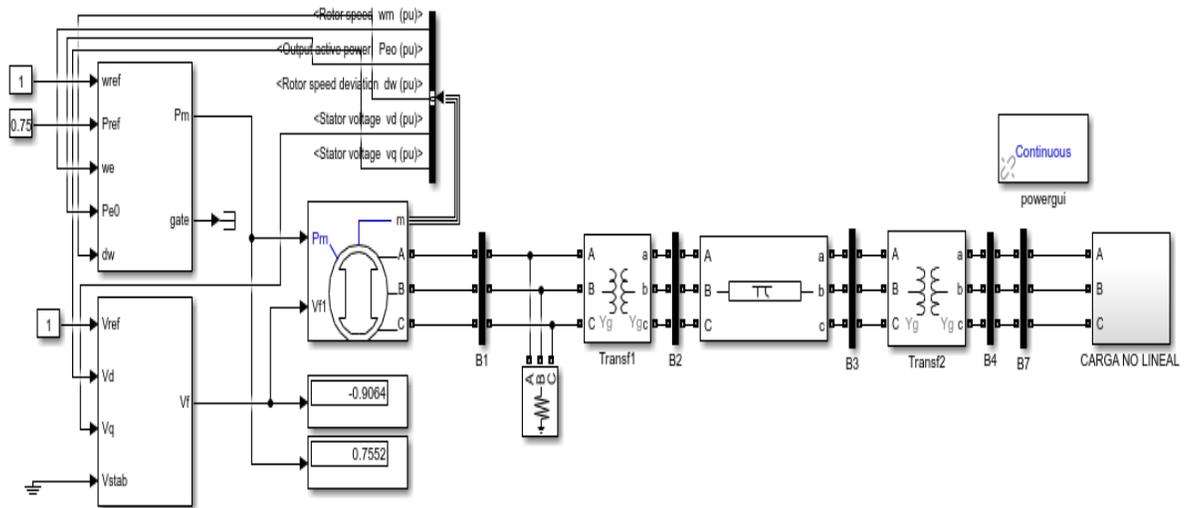


Fig. 46 Simulación del generador sincrónico con la carga no lineal (regulador de potencia).

Fuente: Autor

7.6.1 Efectos de los armónicos en las ondas de la tensión

En la Fig. 47, se muestran las gráficas de tensión eléctrica de las tres fases, se observa que la señal NO es puramente sinusoidal y su valor máximo es 18.34kV de línea –línea, su valor RMS es de 12.97kV.

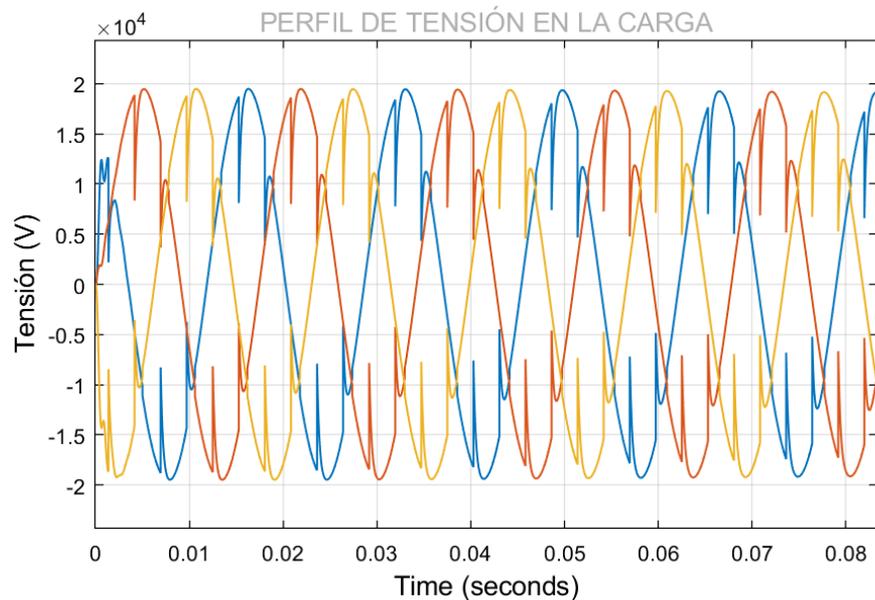


Fig. 47 Perfil de tensión (Simulación 6).

Fuente: Autor

7.6.2 Efectos de los armónicos en las ondas de la corriente

En la Fig. 48, se muestran las ondas de la corriente eléctrica obtenida en las terminales de la carga, donde se puede observar que esta señal NO es puramente sinusoidal y su valor máximo es de 3.988A de línea – línea, su valor RMS es de 2.82A.

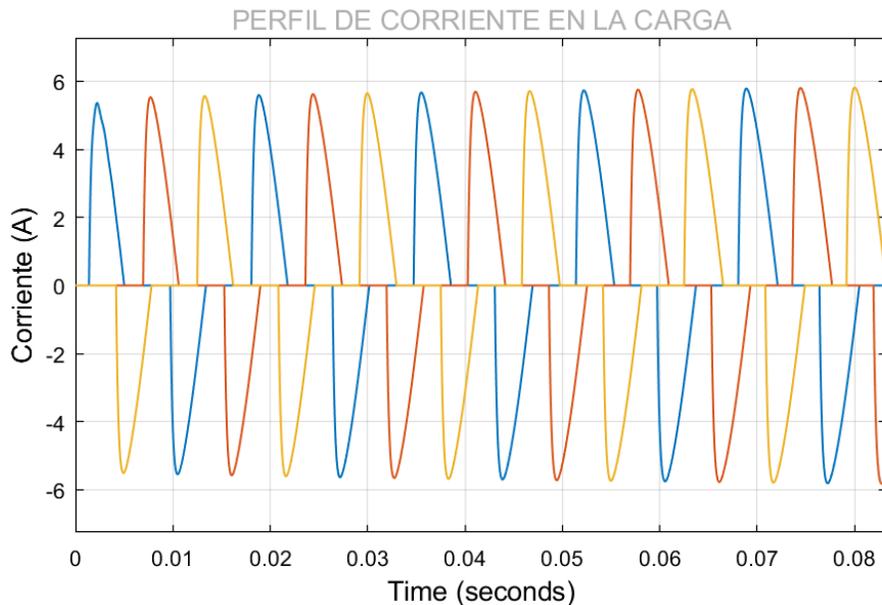


Fig. 48 Perfil de corriente (Simulación 6).
Fuente: Autor

7.6.3 Calculo de la distorsión armónica de la tensión y la corriente

Las distorsiones provocadas por los armónicos de tensión y corriente se muestran en las Fig. 49 y Fig. 50 respectivamente, donde se muestran los espectros del cálculo de la distorsión armónica (THD) hasta el armónico N°50, calculado por el bloque Powergui mediante la función FFT Analysis, además se muestra el % de los armónicos que influyen la señal, por otra parte se tiene las señales de entrada que corresponden a las ondas de salida de la carga de la fase A, donde se evidencia que corresponde a 5 ciclos de la señal, en la cual la parte roja de la señal que son 3 ciclos, representa la zona a evaluar la distorsión.

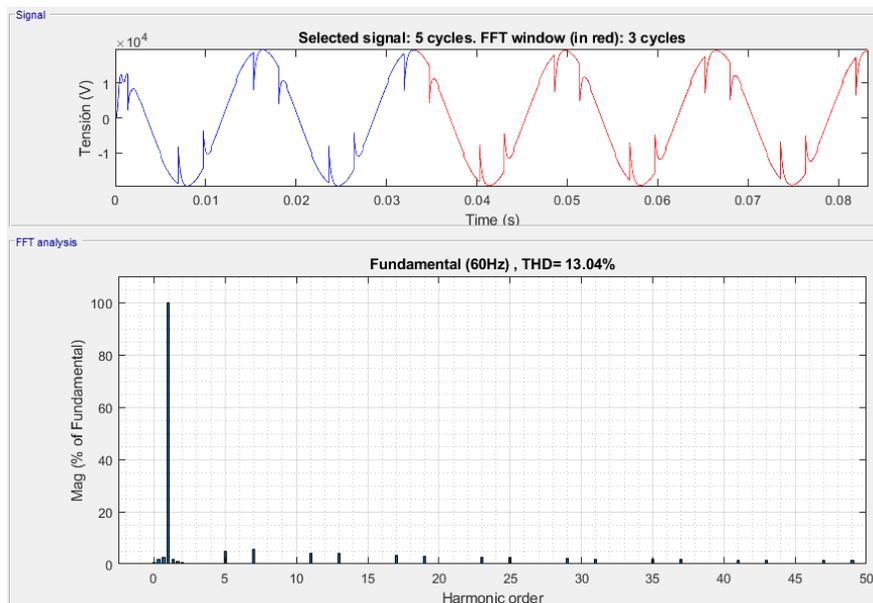


Fig. 49 Distorsión armónica total de la tensión (Simulación 6).
Fuente: Autor

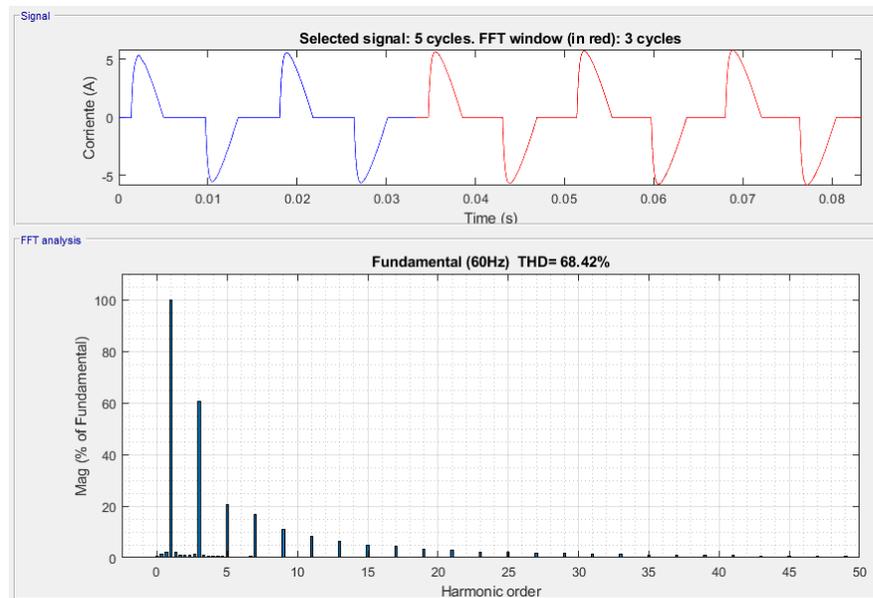


Fig. 50 Distorsión armónica total de la corriente (Simulación 6).
Fuente: Autor

Para reforzar los resultados de la THD mostrados en las Fig. 34 y Fig. 35, se presenta la Tabla 16 donde se muestra las componentes armónicas hasta el orden N° 25 presentes en las señales del sistema, así como en % de los armónicos individuales.

Tabla 16 Espectro armónico de la corriente y tensión en la carga (Simulación 6).

SIMULACIÓN 6		TENSIÓN	CORRIENTE
ORDEN	FRECUENCIA (HZ)	%	%
0	0	0,69	0,55
1	60	100	100
2	120	0,48	0,87
3	180	0,18	60,39
4	240	0,11	0,4
5	300	4,82	20,59
6	360	0,05	0,19
7	420	5,49	16,91
8	480	0,05	0,18
9	540	0,04	10,78
10	600	0,05	0,11
11	660	4,14	8,2
12	720	0,06	0,11
13	780	3,94	6,53
14	840	0,03	0,08
15	900	0,02	4,78
16	960	0,02	0,07
17	1020	3,4	4,29
18	1080	0,06	0,06
19	1140	2,75	3,12
20	1200	0,03	0,05
21	1260	0,01	2,99
22	1320	0,03	0,04
23	1380	2,32	2,21
24	1440	0,06	0,04
25	1500	2,5	2,18

En esta simulación el sistema está mucho más distorsionada a comparación de los apartados 7.4 y 7.5, debido a que en el sistema se encuentra conectada la carga no lineal, por lo que en esta simulación es la que presenta mayor distorsión armónica en el sistema en esta segunda etapa de simulaciones. Además, igualmente que la simulación 1 y 2 los armónicos que más afectan a las señales son los de orden 5th – 7th – 11th – 13th adicional se tienen de los armónicos 17th.

7.7 CALCULO DEL THD DE LOS GENERADORES

En estas simulaciones del sistema se realizan con el objetivo de conocer la THD de la tensión de cada uno de los generadores del sistema independiente, como se muestran en la Fig. 13 las señales del generador sincrónico son sinusoidal porque el cálculo de esta distorsión se espera que sea bajo como se muestra en la Fig. 51

el cual es de 1.91%. Por otro lado se tiene la señal de salida del generador fotovoltaico como se muestra en la Fig. 17 esta es mucho más distorsionada a comparación con el generador sincrónico como se muestra en la Fig. 52, el cual es de 31.09%, los calculos de las distorsión armónica (THD) se realizan hasta el armónico N°50.

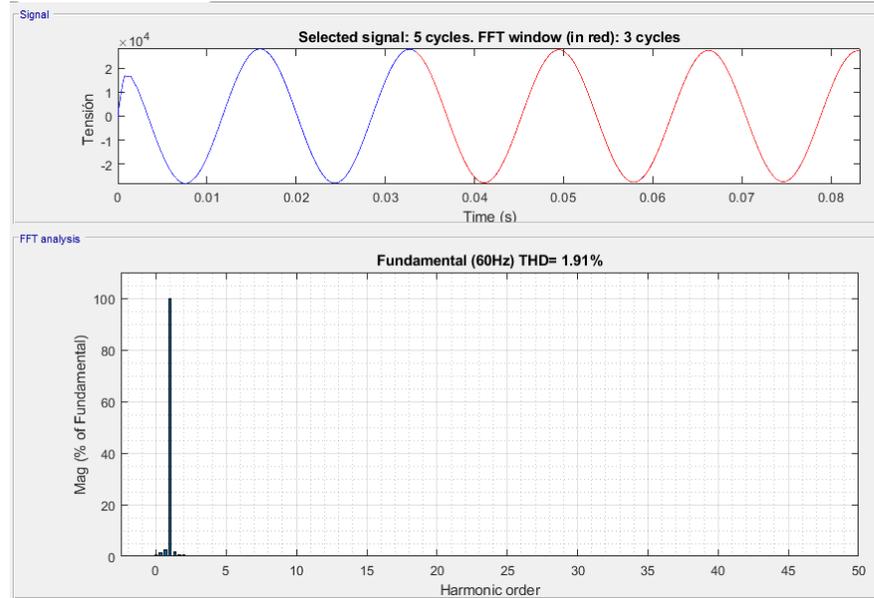


Fig. 51 Distorsión armónica total de la tensión en el generador sincrónico.
Fuente: Autor

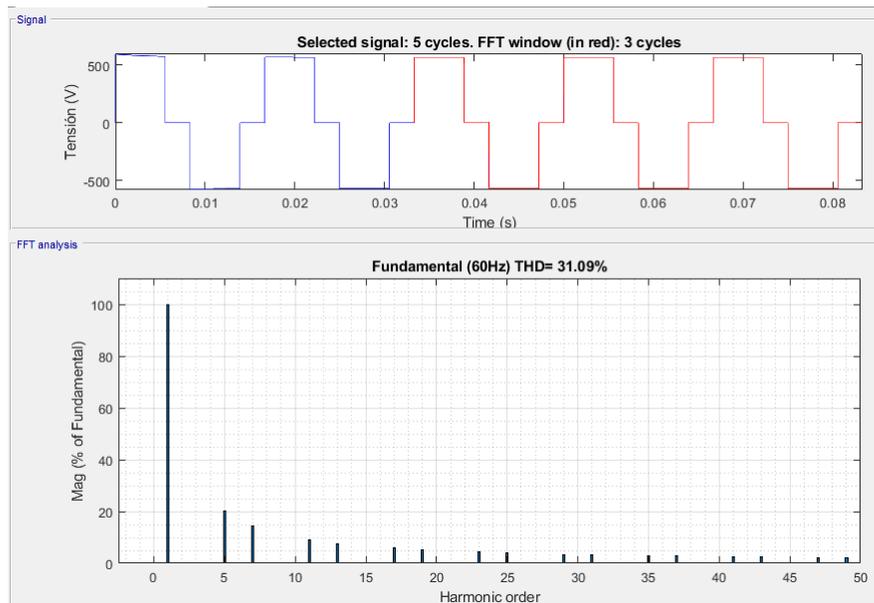


Fig. 52 Distorsión armónica total de la tensión en el generador fotovoltaico.
Fuente: Autor

Para reforzar los resultados de la THD de tensión en el generador fotovoltaico el cual presento mayor distorsión, se presenta la Tabla 17 donde se muestra las componentes armónicas hasta el orden N° 31 presentes en las señales del sistema, así como en % de los armónicos individuales. Donde se tiene que los armónicos que más afectan a la señal son los de orden 5th – 7th – 11th – 13th – 17th – 19th – 23th – 25th – 29th – 31th.

Tabla 17 Espectro armónico de la tensión en el generador fotovoltaico

GENERADOR FOTOVOLTAICO		TENSIÓN
ORDEN	FRECUENCIA (HZ)	%
0	0	0
1	60	100
2	120	0,03
3	180	0,01
4	240	0,01
5	300	20,01
6	360	0
7	420	14,28
8	480	0,03
9	540	0,01
10	600	0,03
11	660	9,1
12	720	0
13	780	7,69
14	840	0,03
15	900	0,01
16	960	0,03
17	1020	5,89
18	1080	0
19	1140	5,26
20	1200	0,03
21	1260	0,01
22	1320	0,03
23	1380	4,35
24	1440	0
25	1500	3,99
26	1560	0,03
27	1620	0,01
28	1680	0,03
29	1740	3,45
30	1800	0
31	1860	3,22

7.8 CALCULO DEL FACTOR DE POTENCIA

Para efecto de la simulación se implementó una carga lineal RL en donde su consumo de potencias no altero el factor de potencia establecido en las condiciones iniciales, por lo que se tiene como resultado un FP de 0.8133 el cual se mantiene entre los límites establecidos como se observa en la Fig. 53.

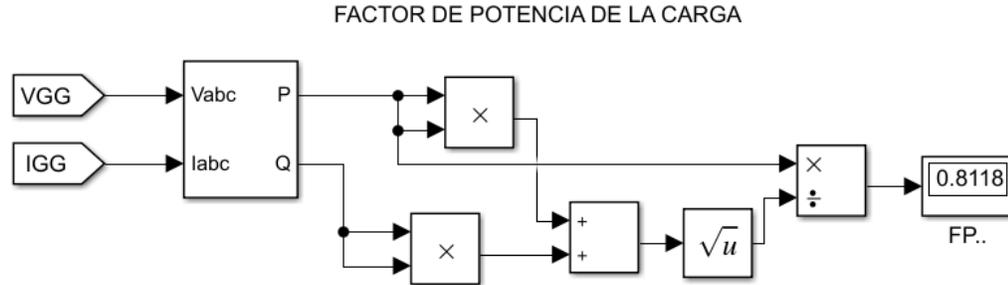


Fig. 53 Factor de potencia de la carga.

Fuente: Autor

7.9 NORMATIVA IEEE 519

Debido a que la gestión de armónicos en un sistema de energía se considera una responsabilidad conjunta que involucra tanto a los usuarios finales como a los propietarios u operadores del sistema, se recomiendan límites de armónicos para tensiones y corrientes. Los valores recomendados se basan en el hecho de que algún nivel de distorsión de tensión es generalmente aceptable.[11]

En la Tabla 18, se muestra el porcentaje de THD de tensión y corriente de las simulaciones realizadas, además de THD de tensión en los generadores.

Tabla 18 Porcentaje de las THD de tensión y corriente de las simulaciones

	THD tensión (%)	THD corriente (%)
Simulación 1	20.65	18.38
Simulación 2	19.09	19.08
Simulación 3	61.96	55.75
Simulación 4	4.78	5.50
Simulación 5	2.06	2.77
Simulación 6	13.04	68.42
Generador Sincrónico Sin carga	1.91	-
Generador Fotovoltaico Sin carga	31.09	-

En la distorsión armónica de tensión THD se tiene en la Tabla 3 de la IEEE 519-2014, debido a que el nivel de tensión del sistema en el punto de conexión común con la carga es de 13.8kV, el cual corresponde al grupo 2 donde la THD es el 5% en el sistema y la distorsión armónica individual es de 3%. Por lo que anteriormente en cada una de las simulaciones se destacaron en las tablas de los espectros los armónicos que sobre pasaron el límite de distorsión armónica individual, donde se puede concluir que los armónicos comunes entre las simulaciones son los 5th – 7th 11th – 13th , además en el cumplimiento de las distorsiones totales del sistema se tiene que, las únicas que SI cumplen con la normativa serían las 7.4 con un THD 4.78% y la 7.5 con un THD 2.06%, las cuales pertenecen a la segunda etapa de simulaciones.

7.10 SOLUCIONES PARA LA MITIGACIÓN DE LOS ARMÓNICOS EN EL SISTEMA

Para mantener la distorsión de tensión real por debajo de los límites, se deben buscar soluciones que mitiguen la distorsión armónica causada por las cargas no lineales.

7.10.1 Filtro Pasivo

Los filtros son una solución efectiva en aquellas ocasiones en las que el recableado es muy caro o dificultoso. Se utilizan para bloquear o atrapar las corrientes perjudiciales, disminuyendo las cargas armónicas del cableado[16]. Este tipo de filtros pasivos se suelen implementar con células RC o LC, que pueden colocarse en cascada si se desea incrementar la atenuación del filtro. [17]

7.10.1.1 Filtro pasivo paso bajo

Para realizar un filtro pasivo paso bajo, se debe construir el circuito de la Fig. 54, la frecuencia de corte se produce la resonancia del filtro RC, o lo que es lo mismo, que los valores de la resistencia y de la reactancia capacitiva a esa frecuencia se igualan.[17]

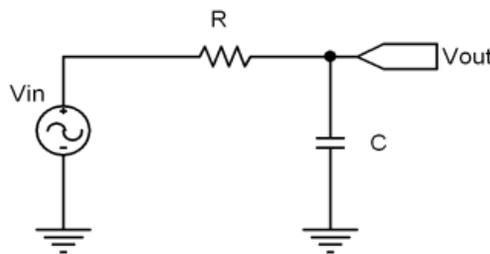


Fig. 54 Disposición circuital de un filtro pasivo paso bajo
Fuente: Simón, Pierre [17]

7.10.1.2 Filtro pasivo paso alto

Para realizar un filtro pasivo paso alto, se debe construir el circuito de la, frecuencia de corte se produce la resonancia de la célula RC, o lo que es lo mismo, que los valores de la resistencia y de la reactancia capacitiva se igualan a esa frecuencia. Por tanto, la ecuación de cálculo de la frecuencia de corte de este filtro es idéntica a la del filtro paso bajo. [17]

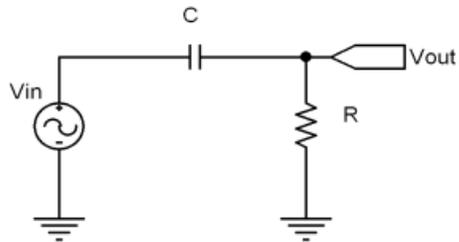


Fig. 55 Disposición circuital de un filtro pasivo paso alto
Fuente: Simon, Pierre [17]

7.10.1.3 Filtro pasivo pasa banda

Para la realización de un filtro paso banda existen dos disposiciones posibles. La construida en torno a la conexión en serie de un filtro paso alto más un filtro paso bajo o bien la mostrada en la Fig. 56 b). En la primera de ellas, al estar formada por la unión de los dos filtros estudiados anteriormente, los valores de las resistencias y condensadores serán los obtenidos mediante sus respectivos cálculos, es decir, ambas células RC serán diferentes. Mientras que, en el segundo caso, los valores de las resistencias y condensadores son idénticos. [17]

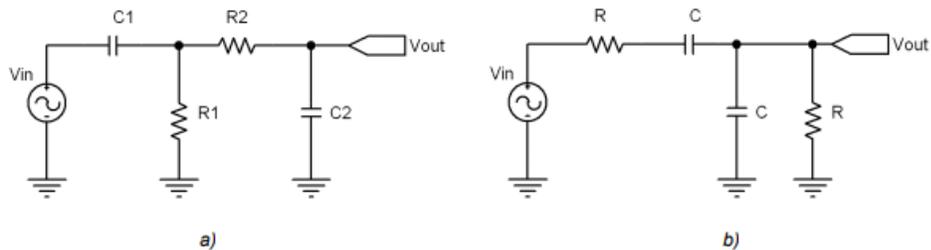


Fig. 56 Disposición de filtro paso banda. a) PA más PB, b) Configuración especial
Fuente: Simon, Pierre [17]

7.10.2 Aplicación del filtro pasivo en el sistema de potencia

Se implementó un filtro pasivo el cual está integrado por dos tipos de filtro mencionados anteriormente, como se muestra en la Fig. 57 los cuales son el filtro pasa alto para los armónicos de mayor incidencia en el sistema que son los de 5 y 7 orden, además del filtro pasa banda para la atenuación de 2 armónicos en el sistema que son los (5 y 7 orden) y (11 y 13 orden).

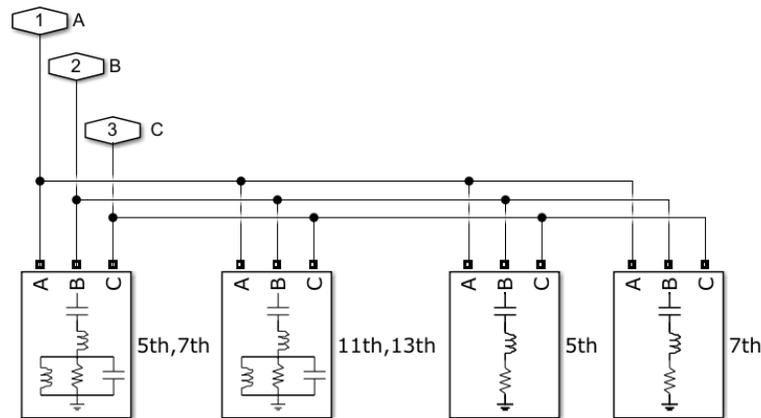


Fig. 57 Subsistema del filtro pasivo
Fuente: Autor

Los parámetros implementados en el filtro pasivo, conformado internamente por 4 filtros, se muestran en la Tabla 19.

Tabla 19 Parámetros del bloque del filtro pasivo

Nº	Orden	Tensión L-L (RMS)	Frecuencia (Hz)	Frecuencia de sintonización	Potencia Reactiva	Factor de calidad
1	5th,7th	13.8kV	60	[5*60 7*60]	4000	100
2	11th, 13th	13.8kV	60	[11*60 13*60]	4000	100
3	5th	13.8kV	60	[5*60]	2000	100
4	7th	13.8kV	60	[5*60]	2000	100

En los siguientes apartados se realizarán las simulaciones con mayor THD de tensión que no pasaron la normativa IEEE 519 como se indicaron en el apartado 7.9 las cuales corresponden a las simulaciones que NO están destacadas en la Tabla 18.

7.10.2.1 Simulación 1

En esta sección, se realiza la simulación N°1, donde se presenta el análisis de los parámetros eléctricos del sistema mostrado en el diagrama de bloques desarrollado en simulink de la Fig. 58 donde se mantuvieron los parámetros de la simulación realizada en el apartado 7.1 en la cual se encuentran operando las dos cargas no lineales, donde una de ellas está conectada en el generador fotovoltaico que es el inversor del sistema, la otra es el regulador de potencia por medio de TRIAC para una carga RL, conectado en paralelo con la carga lineal RL. Además de tener conectado el filtro pasivo en el sistema.

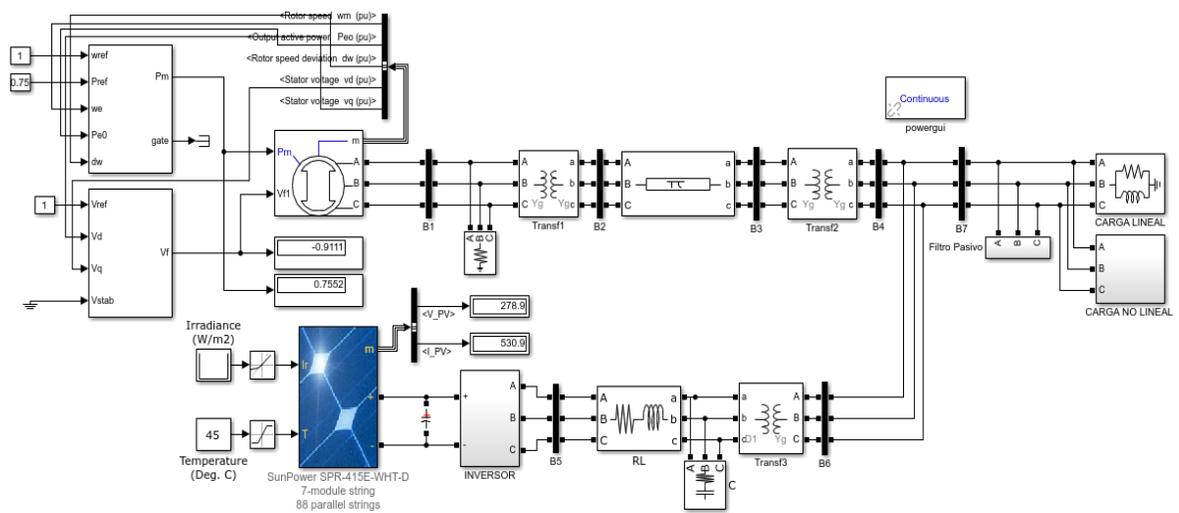


Fig. 58 Simulación de todos los componentes y cargas conectadas con filtro pasivo.
Fuente: Autor

En la Fig. 59, se muestran las gráficas de tensión eléctrica de las tres fases. Donde se observa que la señal NO es sinusoidal, pero a comparación de la Fig. 22, se nota una mejoría en la señal del sistema al instalar el filtro.

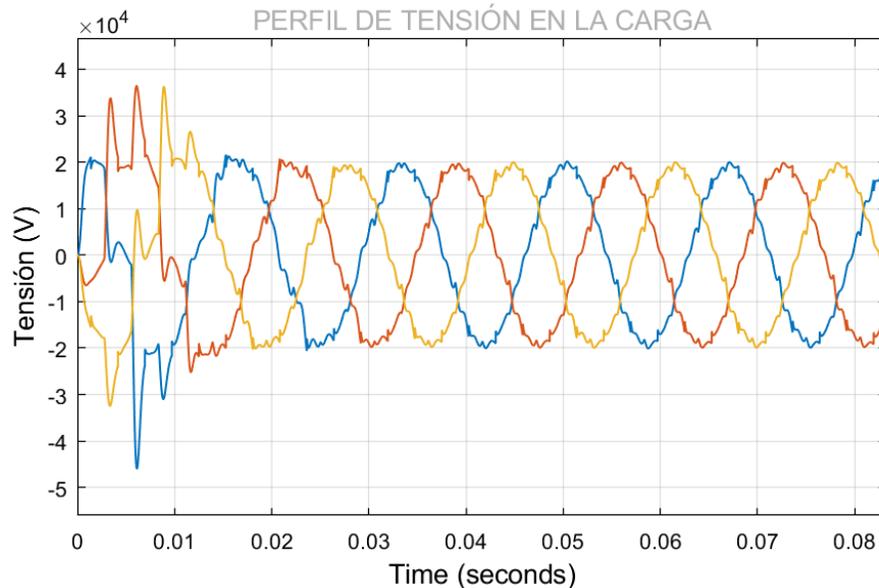


Fig. 59 Perfil de tensión con filtro (Simulación 1).
Fuente: Autor

En las Fig. 60 se muestran el espectros del calculo de la distorsión armónica (THD) de la tensión por medio de la funcion FFT, donde se puede observar que se mantuvieron las mismas condiciones para el calculo el cual se realizo hasta el armonico N°50.

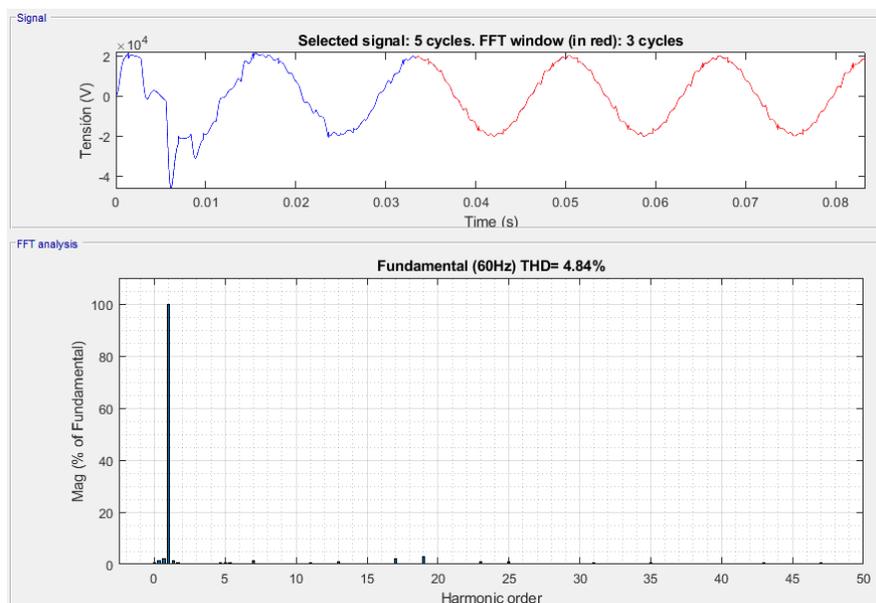


Fig. 60 Distorsión armónica total de la tensión con filtro (Simulación 1).
Fuente: Autor

Para reforzar los resultados de la THD mostrados en la Fig. 60, se presenta la Tabla 20 donde se muestra las componentes armónicas hasta el orden N° 15 presentes en la señal del sistema

Tabla 20 Espectro armónico de la tensión en la carga (Simulación 1).

SIMULACIÓN 1		TENSIÓN
ORDEN	FRECUENCIA (HZ)	%
0	0	0,57
1	60	100
2	120	0,32
3	180	0,18
4	240	0,08
5	300	0,47
6	360	0,25
7	420	1,36
8	480	0,12
9	540	0,14
10	600	0,17
11	660	0,46
12	720	0,11
13	780	0,88
14	840	0,15
15	900	0,16

El cálculo de la distorsión armónica total (THD) del sistema es del 4.84% con filtro, lo cual se tiene que esta simulación pasa la normativa IEEE 519 -2014, dado que debe estar por debajo del 5% a comparación de la simulación 7.1 donde le THD es del 20.65% y no pasaba la normativa, por lo que la instalación del filtro pasivo reduce un 15.81% de la distorsión del sistema. Además, las distorsiones armónicas individuales del sistema corresponde al 3% por lo que en la Tabla 20 muestra la reducción de los armónicos que influían más en el sistema con relación a la Tabla 12 donde los armónicos que más afectan a la señal eran los de orden 5th – 7th – 11th – 13th.

7.10.2.2 Simulación 2

En esta sección, se realiza la simulación N°2, del sistema mostrado en el diagrama de bloques desarrollado en simulink de la Fig. 61 donde se mantuvieron los parámetros de la simulación realizada en el apartado 7.2 además de tener conectado el filtro pasivo en el sistema.

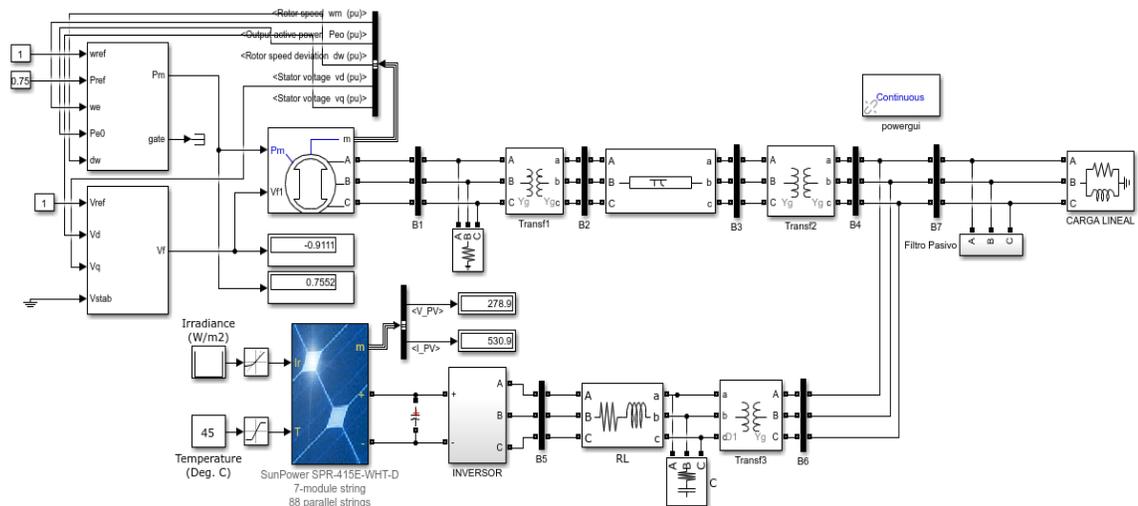


Fig. 61 Simulación de los dos generadores y la carga lineal con filtro pasivo.
Fuente: Autor

En la Fig. 62, se muestran las gráficas de tensión eléctrica de las tres fases. Donde se observa que la señal NO es sinusoidal, pero a comparación de la Fig. 27, se nota una mejoría en la señal del sistema al instalar el filtro.

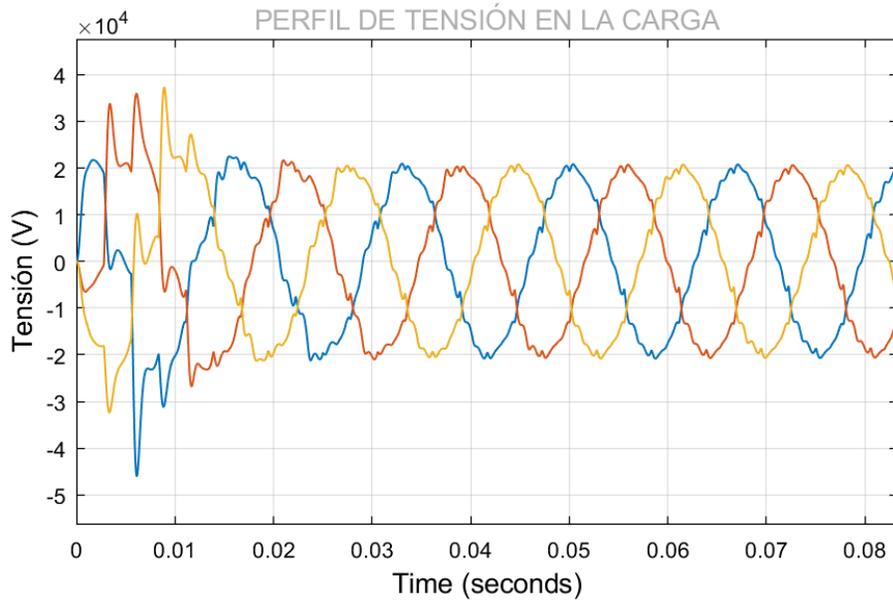


Fig. 62 Perfil de tensión con filtro (Simulación 2).
Fuente: Autor

En la Fig. 63 se muestra el espectros del calculo de la distorsión armónica (THD) de la tensión por medio de la funcion FFT, donde se puede observar que se mantuvieron las mismas condiciones para el calculo el cual se realizo hasta el armonico N°50.

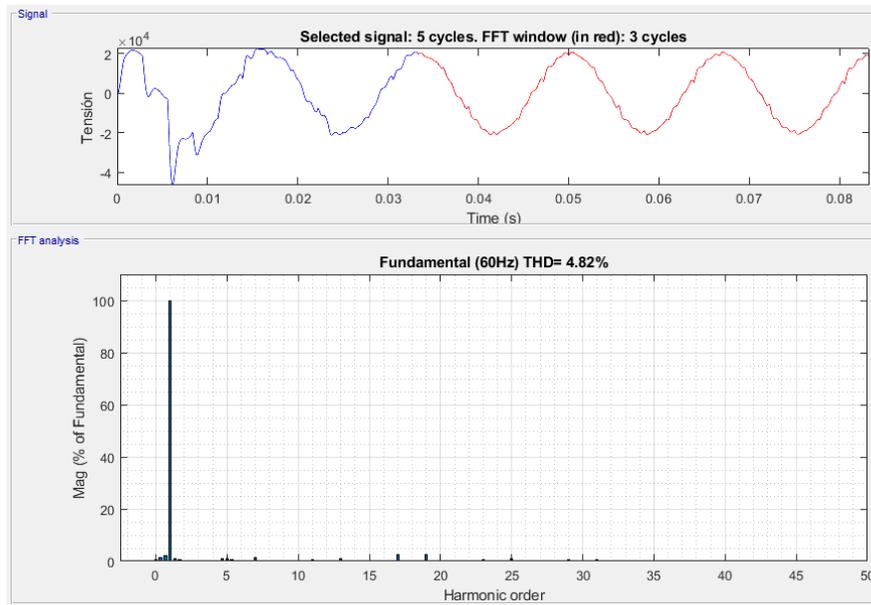


Fig. 63 Distorsión armónica total de la tensión con filtro (Simulación 2).
Fuente: Autor

Para reforzar los resultados de la THD mostrados en la Fig. 63, se presenta la Tabla 21, donde se muestra las componentes armónicas hasta el orden N° 15 presentes en la señal del sistema

Tabla 21 Espectro armónico de la tensión en la carga (Simulación 2).

SIMULACIÓN 2		TENSIÓN
ORDEN	FRECUENCIA (HZ)	%
0	0	0.56
1	60	100
2	120	0.19
3	180	0.20
4	240	0.26
5	300	0.99
6	360	0.27
7	420	1.29
8	480	0.12
9	540	0.23
10	600	0.14
11	660	0.61
12	720	0.09
13	780	0.92
14	840	0.09
15	900	0.19

El cálculo de la distorsión armónica total (THD) del sistema es del 4.82% con filtro, lo cual se tiene que esta simulación pasa la normativa IEEE 519 -2014, dado que debe estar por debajo del 5% a comparación de la simulación 7.2 donde le THD es del 19.09% y no pasaba la normativa, por lo que la instalación del filtro pasivo reduce un 14.27% de la distorsión del sistema. Además, las distorsiones armónicas individuales del sistema corresponde al 3% por lo que en la Tabla 21 muestra la reducción de los armónicos que influían más en el sistema con relación a la Tabla 12 donde los armónicos que más afectan a la señal eran los de orden 5th – 7th – 11th – 13th.

7.10.2.3 Simulación 3

En esta parte, se realiza la simulación N°3, en la cual es donde el sistema tiene mayor distorsión debido que están conectas las dos cargas no lineales en el sistema mostrado de la Fig. 64 donde se mantuvieron los parámetros de la simulación realizada en el apartado 7.3 además de tener conectado el filtro pasivo en el sistema.

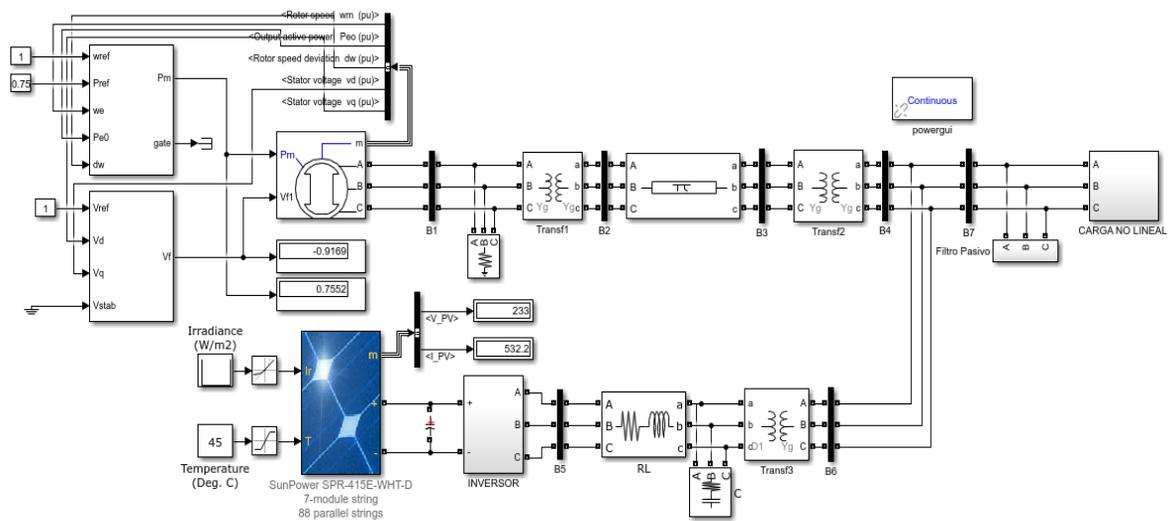


Fig. 64 Simulación de los dos generadores y la carga no lineal con filtro pasivo.
Fuente: Autor

En la Fig. 65, se muestran las gráficas de tensión eléctrica de las tres fases. Donde se observa que la señal NO es sinusoidal, pero a comparación de la Fig. 32, se nota una mejoría en la señal del sistema al instalar el filtro.

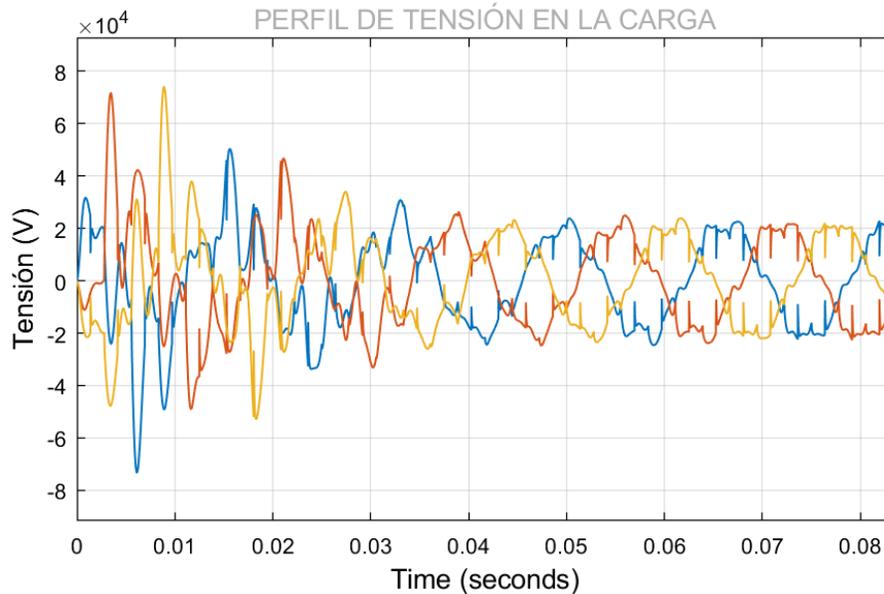


Fig. 65 Perfil de tensión con filtro (Simulación 3).
Fuente: Autor

En la Fig. 66 se muestra el espectros del calculo de la distorsión armónica (THD) de la tensión por medio de la funcion FFT, donde se puede observar que se mantuvieron las mismas condiciones para el calculo el cual se realizo hasta el armonico N°50.

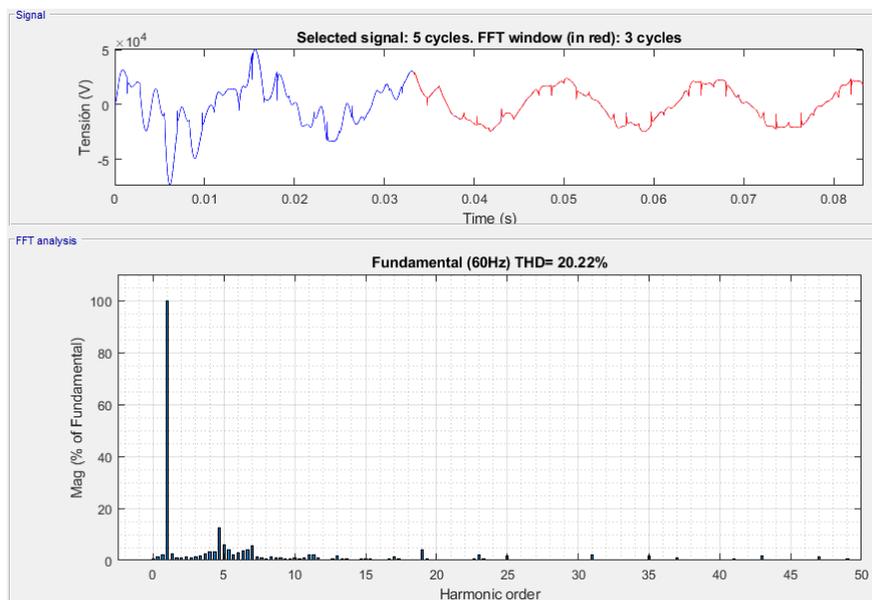


Fig. 66 Distorsión armónica total de la tensión con filtro (Simulación 3).
Fuente: Autor

Para reforzar los resultados de la THD mostrados en la Fig. 66, se presenta la Tabla, donde se muestra las componentes armónicas hasta el orden N° 15 presentes en la señal del sistema

Tabla 22 Espectro armónico de la tensión en la carga (Simulación 3).

SIMULACIÓN 3		TENSIÓN
ORDEN	FRECUENCIA (HZ)	%
0	0	0,63
1	60	100
2	120	0.83
3	180	1.42
4	240	3.18
5	300	5.97
6	360	2.76
7	420	5.5
8	480	0.75
9	540	1.02
10	600	0.89
11	660	2.28
12	720	0.37
13	780	1.89
14	840	0.36
15	900	0.40

El cálculo de la distorsión armónica total (THD) del sistema es del 20.22% con filtro, lo cual se tiene que esta simulación NO pasa la normativa IEEE 519 -2014, dado que debe estar por debajo del 5% a comparación de la simulación 7.3 donde le THD es del 61.96% por lo que tampoco pasaba la normativa, dado que la instalación del filtro pasivo reduce un 41.74% de la distorsión del sistema pero no en su totalidad, porque un se tiene una distorsión un grande.

7.10.2.4 Simulación 6

En esta parte, se realiza la simulación N°6, en la cual es donde el sistema tiene conecta una de las cargas no lineales como se muestra en la Fig. 67 donde se mantuvieron los parámetros de la simulación realizada en el apartado 7.6 además de tener conectado el filtro pasivo en el sistema.

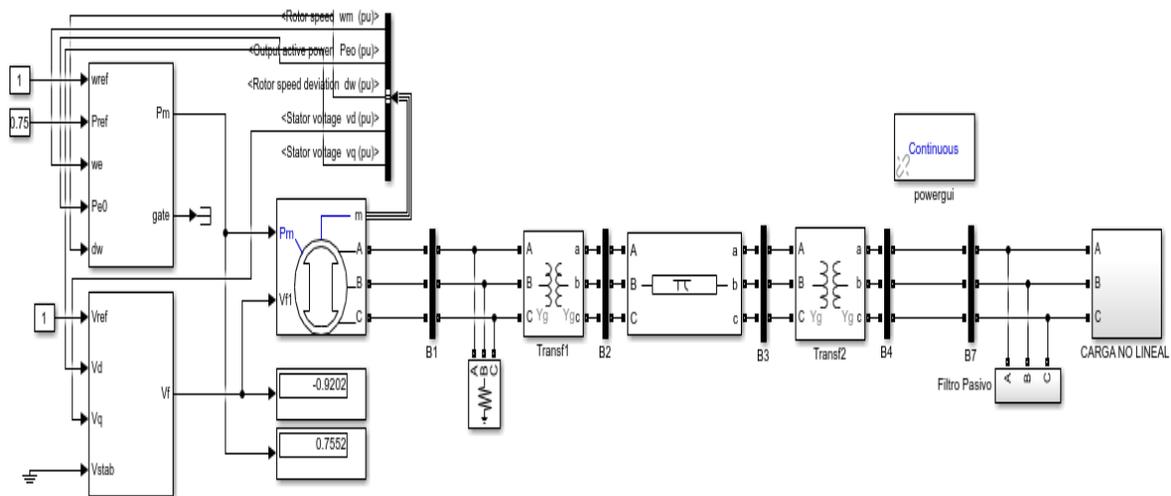


Fig. 67 Simulación del generador sincrónico con la carga no lineal y el filtro pasivo.
Fuente: Autor

En la Fig. 68, se muestran las gráficas de tensión eléctrica de las tres fases. Donde se observa que la señal NO es sinusoidal.

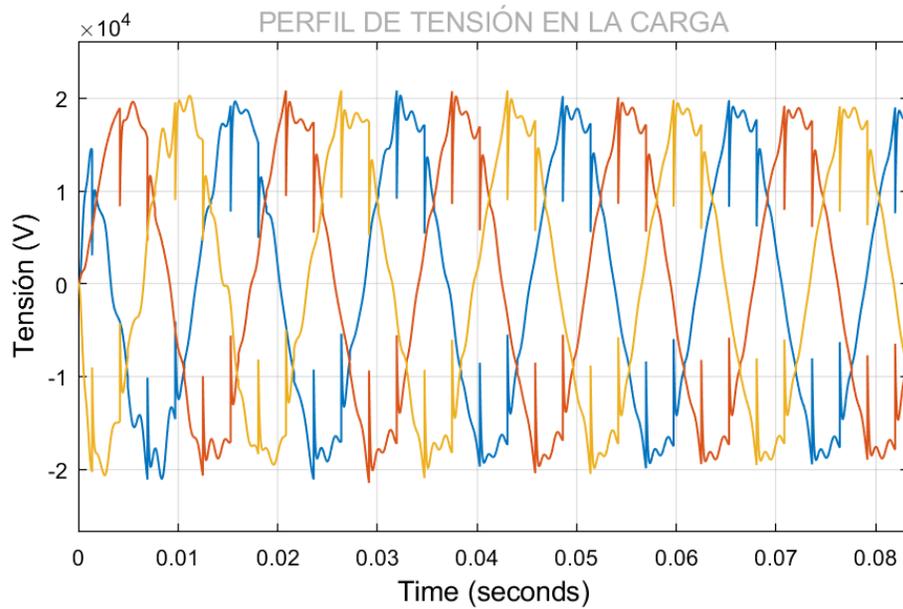


Fig. 68 Perfil de tensión con filtro (Simulación 6) .
Fuente: Autor

En la Fig. 69 se muestra el espectros del calculo de la distorsión armónica (THD) de la tensión por medio de la funcion FFT, donde se puede observar que se mantuvieron las mismas condiciones para el calculo el cual se realizo hasta el armonico N°50.

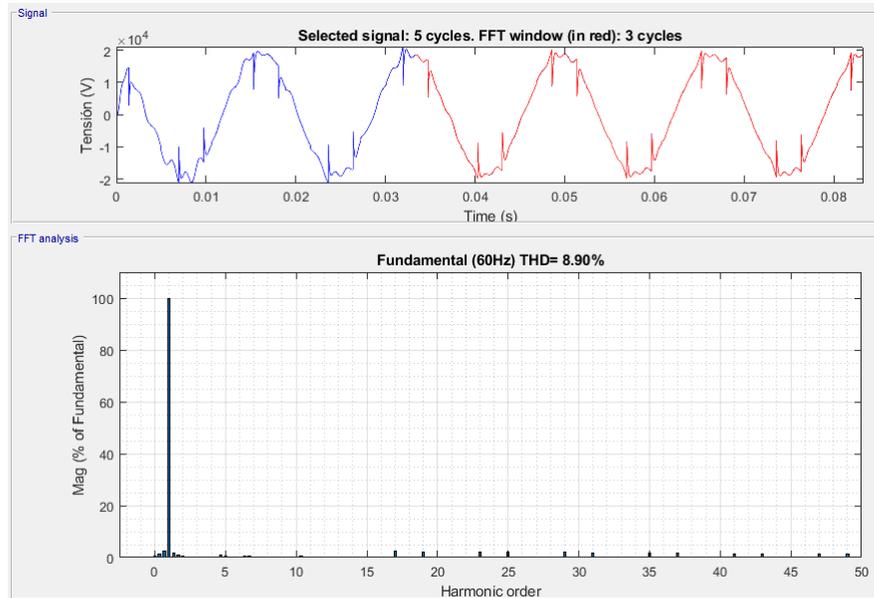


Fig. 69 Distorsión armónica total de la tensión con filtro (Simulación 6).
Fuente: Autor

Para reforzar los resultados de la THD mostrados en la Fig. 69, se presenta la Tabla 23, donde se muestra las componentes armónicas hasta el orden N° 15 presentes en la señal del sistema

Tabla 23 Espectro armónico de la tensión en la carga (Simulación 6).

SIMULACIÓN 6		TENSIÓN
ORDEN	FRECUENCIA (HZ)	%
0	0	0,68
1	60	100
2	120	0.51
3	180	0.23
4	240	0.22
5	300	0.43
6	360	0.20
7	420	0.07
8	480	0.13
9	540	0.09
10	600	0.37
11	660	0.32
12	720	0.24
13	780	0.05
14	840	0.04
15	900	0.03

El cálculo de la distorsión armónica total (THD) del sistema es del 8.90% con filtro, lo cual se tiene que esta simulación NO pasa la normativa IEEE 519 -2014, dado que debe estar por debajo del 5% a comparación de la simulación 7.6 donde le THD es del 13.04% por lo que tampoco pasaba la normativa, dado que la instalación del filtro pasivo reduce un 4.95% de la distorsión del sistema pero no en su totalidad, porque un se tiene una distorsión un grande.

8. GUIA DE FUNCIONAMIENTO

8.1 INTRODUCCIÓN AL ENTORNO MATLAB

MATLAB[®] combina un entorno de escritorio en sintonía para los procesos de análisis y diseño iterativos con un lenguaje de programación que expresa la matriz y las matemáticas de matriz directamente. Incluye el Live Editor para crear scripts que combinan código, salida y texto formateado en un cuaderno ejecutable. [18]

8.2 IMPLEMENTACIÓN DE SIMULINK

Simulink[®] es un entorno de diagrama de bloques para simulación multidominio y diseño basado en modelos. Admite diseño a nivel de sistema, simulación, generación automática de código y prueba y verificación continua de sistemas integrados. Simulink proporciona un editor gráfico, bibliotecas de bloques personalizables y solucionadores para modelar y simular sistemas dinámicos. Está integrado con MATLAB[®], lo que le permite incorporar algoritmos MATLAB en modelos y exportar los resultados de la simulación a MATLAB para su posterior análisis.[19]

8.2.1 Biblioteca Simscape Electrical

Simscape[™] Electrical[™] proporciona bibliotecas de componentes para modelar y simular sistemas de energía eléctrica, mecatrónica y electrónica. Incluye modelos de semiconductores, motores y componentes para aplicaciones como actuación electromecánica, redes inteligentes y sistemas de energía renovable. Puede utilizar estos componentes para evaluar arquitecturas de circuitos analógicos, desarrollar sistemas mecatrónicos con accionamientos eléctricos y analizar la generación, conversión, transmisión y consumo de energía eléctrica a nivel de red.[19]

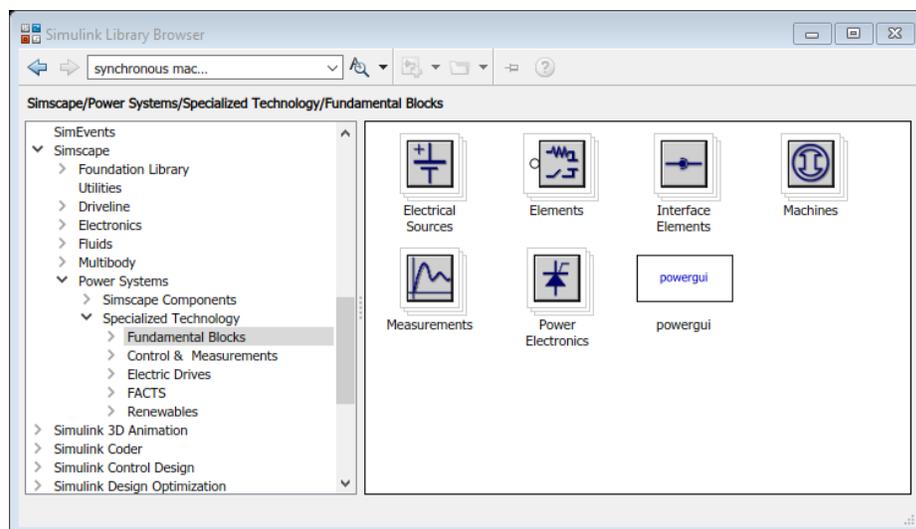
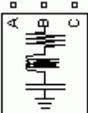
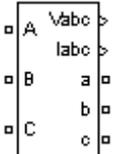


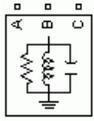
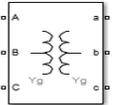
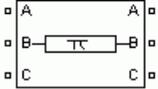
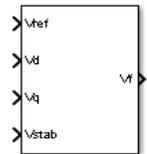
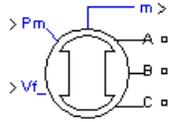
Fig. 70 Biblioteca Simscape Electrical.

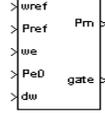
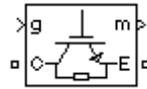
Fuente: Autor

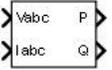
8.2.1.1 Funciones y características de los componentes utilizados en la ejecución del proyecto

Tabla 24 Componentes de SIMULINK utilizados en el proyecto.

COMPONENTE	ILUSTRACIÓN	DESCRIPCIÓN
POWERGUI		El bloque powergui le permite elegir uno de estos métodos para resolver su circuito. El bloque powergui también abre herramientas para el análisis de resultados de simulación y de estado estacionario y para el diseño avanzado de parámetros. Necesita el bloque powergui para simular cualquier modelo de Simulink que contenga bloques de sistemas de energía especializados Simscape™ Electrical™
Series RLC branch		El bloque de rama de la serie RLC implementa un solo resistor, inductor o condensador, o una combinación en serie de estos. Se permiten valores negativos para resistencia, inductancia y capacitancia.
Three-phase series RLC branch		El bloque de ramales RLC de la serie trifásica implementa tres ramas balanceadas que constan cada una de una resistencia, un inductor o un condensador o una combinación en serie de estos. Se permiten valores negativos para resistencia, inductancia y capacitancia
Three-phase series RLC load		El bloque de carga RLC de la serie trifásica implementa una carga equilibrada trifásica como una combinación en serie de elementos RLC. A la frecuencia especificada, la carga presenta una impedancia constante. Las potencias activas y reactiva absorbidas por la carga son proporcionales al cuadrado de la tensión aplicada.
Three-phase V-I measurement		El bloque de medición trifásica V-I se utiliza para medir tensiones y corrientes trifásicas instantáneas en un circuito. Cuando se conecta en serie con elementos trifásicos, devuelve los tensión y corrientes picos trifásicos o de fase a fase. El bloque puede generar los tensión y corrientes en valores por unidad (pu) o en voltios y amperios.

<p>Three-phase parallel RLC load</p>		<p>El bloque de carga RLC trifásico paralelo implementa una carga equilibrada trifásica como una combinación en paralelo de elementos RLC. A la frecuencia especificada, la carga presenta una impedancia constante. Las potencias activas y reactiva absorbidas por la carga son proporcionales al cuadrado de la tensión aplicada.</p>
<p>Three-phase transformer (two windings)</p>		<p>Este bloque implementa un transformador trifásico utilizando tres transformadores monofásicos.</p>
<p>Three-phase PI section line</p>		<p>El bloque de línea de sección PI trifásica implementa un modelo de línea de transmisión trifásica equilibrada con parámetros agrupados en una sección PI.</p>
<p>Voltage measurement</p>		<p>El bloque de medición de tensión mide la tensión instantánea entre dos nodos eléctricos. La salida proporciona una señal de Simulink® que pueden utilizar otros bloques de Simulink</p>
<p>Excitation system</p>		<p>El bloque del sistema de excitación es un sistema Simulink® que implementa un excitador de CC descrito sin la función de saturación del excitador. Los elementos básicos que forman el bloque del Sistema de Excitación son el regulador de tensión y el excitador.</p>
<p>Synchronous machine standard PU</p>		<p>El bloque de máquina síncrona funciona en modo generador o motor. El modo de funcionamiento viene dictado por el signo de la potencia mecánica. El modelo tiene en cuenta la dinámica del estator, el campo y los devanados del amortiguador. El circuito equivalente del modelo se representa en el marco de referencia del rotor. Todos los parámetros del rotor y las cantidades eléctricas se ven desde el estator.</p>

PV Array		<p>El bloque PV Array implementa una matriz de módulos fotovoltaicos (PV). La matriz está formada por cadenas de módulos conectados en paralelo, cada cadena consta de módulos conectados en serie.</p>
Hydraulic turbine		<p>El bloque de regulador y turbina hidráulica implementa un modelo de turbina hidráulica no lineal, un sistema de regulador PID y un servomotor.</p>
IGBT		<p>El bloque IGBT implementa un dispositivo semiconductor controlable por la señal de puerta. El IGBT se simula como una combinación en serie de un resistor R_{on}, un inductor L_{on} y una fuente de tensión CC V_f en serie con un interruptor controlado por una señal lógica ($g > 0$ o $g = 0$).</p>
Thyristor		<p>El tiristor es un dispositivo semiconductor que se puede encender mediante una señal de puerta. El modelo de tiristor se simula como una resistencia R_{on}, un inductor L_{on} y una fuente de tensión de CC que representa el voltaje directo V_f, conectados en serie con un interruptor. El interruptor está controlado por una señal lógica que depende del voltaje V_{ak}, la corriente I_{ak} y la señal de puerta g.</p>
Matlab function		<p>Con un bloque de funciones MATLAB, puede escribir una función MATLAB® para usar en un modelo de Simulink®. La función de MATLAB que crea se ejecuta para la simulación y genera código para un objetivo de Simulink Coder™. Si es nuevo en los productos de Simulink y MATLAB, consulte Implementación de funciones de MATLAB mediante bloques y Creación de funciones personalizadas mediante el bloque de funciones de MATLAB para obtener una descripción general.</p>
RMS		<p>El bloque RMS calcula el valor cuadrático medio verdadero (RMS) de la señal de entrada. El verdadero valor RMS de la señal de entrada se calcula sobre una ventana de promedio móvil de un ciclo de la frecuencia fundamental especificada.</p>

Power (3ph, instantaneous)		El bloque de Potencia (3ph, Instantánea) calcula la potencia activa instantánea trifásica P (en vatios) y la potencia reactiva Q (en vars) asociadas con un conjunto periódico de tensiones y corrientes trifásicas.
Ground		El bloque de tierra implementa una conexión a tierra.
Clock		El bloque Reloj muestra el tiempo de simulación actual en cada paso de la simulación. Este bloque es útil para otros bloques que necesitan tiempo de simulación.
Mux		El bloque Mux combina entradas con el mismo tipo de datos y complejidad en una salida vectorial. La señal mux de salida es plana, incluso si crea la señal mux a partir de otras señales mux. Sin embargo, puede utilizar varios bloques Mux para crear una señal mux en etapas
Demux		El bloque Demux extrae los componentes de una señal de vector de entrada y emite señales separadas. Los puertos de señal de salida están ordenados de arriba a abajo. Para obtener información sobre la creación y descomposición de vectores, consulte Señal Mux.
Pulse Generator		El generador de impulsos bloque genera pulsos de onda cuadrada a intervalos regulares. Los parámetros de la forma de onda del bloque, amplitud, ancho de pulso, período y retardo de fase, determinan la forma de la forma de onda de salida. El siguiente diagrama muestra cómo afecta cada parámetro a la forma de onda.
Scope		El bloque Simulink® Scope y el bloque DSP System Toolbox™ Time Scope muestran señales en el dominio del tiempo.
Goto		El bloque Goto pasa su entrada a sus bloques From correspondientes. La entrada puede ser una señal o un vector de valor real o complejo de cualquier tipo de datos. Los bloques From y Goto le permiten pasar una señal de un bloque a otro sin conectarlos realmente.

From		El bloque From acepta una señal de un bloque Goto correspondiente y luego la pasa como salida. El tipo de datos de la salida es el mismo que el de la entrada del bloque Ir a. Los bloques From y Goto le permiten pasar una señal de un bloque a otro sin conectarlos realmente.
Display		El bloque de visualización muestra el valor de los datos de entrada. Puede especificar la frecuencia de la pantalla. Para datos de entrada numérica, también puede especificar el formato de visualización. Si la entrada del bloque es una matriz, puede cambiar el tamaño del bloque vertical u horizontalmente para mostrar más que solo el primer elemento.
Bus selector		El bloque selector de bus genera los elementos que seleccione del bus de entrada. El bloque puede generar los elementos seleccionados por separado o en un nuevo bus virtual.
Terminator		Utilice el bloque Terminator para tapar bloques cuyos puertos de salida no se conectan a otros bloques. Si ejecuta una simulación con bloques que tienen puertos de salida desconectados, Simulink® emite mensajes de advertencia.
Constant		El bloque Constante genera una señal de valor constante real o compleja. Utilice este bloque para proporcionar una entrada de señal constante. El bloque genera una salida escalar, vectorial o matricial.

Anteriormente se presentó una descripción general del software Matlab - Simulink donde se observa las ventajas que este proporciona para la simulación de un sistema eléctrico, de esta manera se establece la metodología para la generación de armónicos implementando un montaje de las diferentes cargas que se conectarán al sistema, como lo son cargas lineales y no lineales. Además, este software permite realizar el cálculo de la distorsión armónica total de las señales de tensión y corriente del sistema eléctrico por medio del bloque POWERGUI en Simulink, donde se podrá realizar análisis del contenido armónico del sistema.

8.3 PASOS PARA LA SIMULACIÓN DEL PROGRAMA

PASO 1:

Para acceder la herramienta se deberá que abrir el Matlab versión R2017b, donde se procede a abrir el programa, en el command Window se ejecuta **Herramienta**, que posteriormente se abre el programa de Simulink, además de inicializar los parámetros del programa en el workspace, como se muestra en la Fig. 71, los parámetros se establecen en un archivo .m que se muestra en el ANEXO B

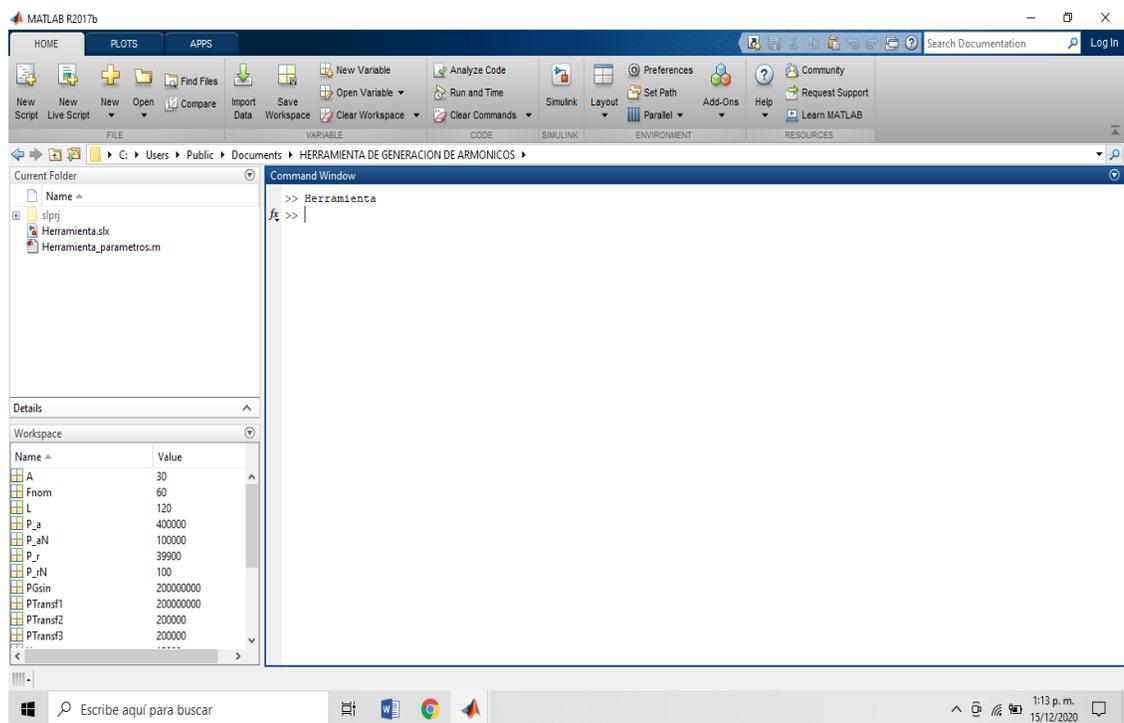


Fig. 71 Guía para el funcionamiento - Interfaz de Matlab

Fuente: Autor

PASO 2:

Una vez el programa abierto, se encuentra el sistema montado el cual es muy intuitivo y sencillo, veámoslo en la Fig. 72.

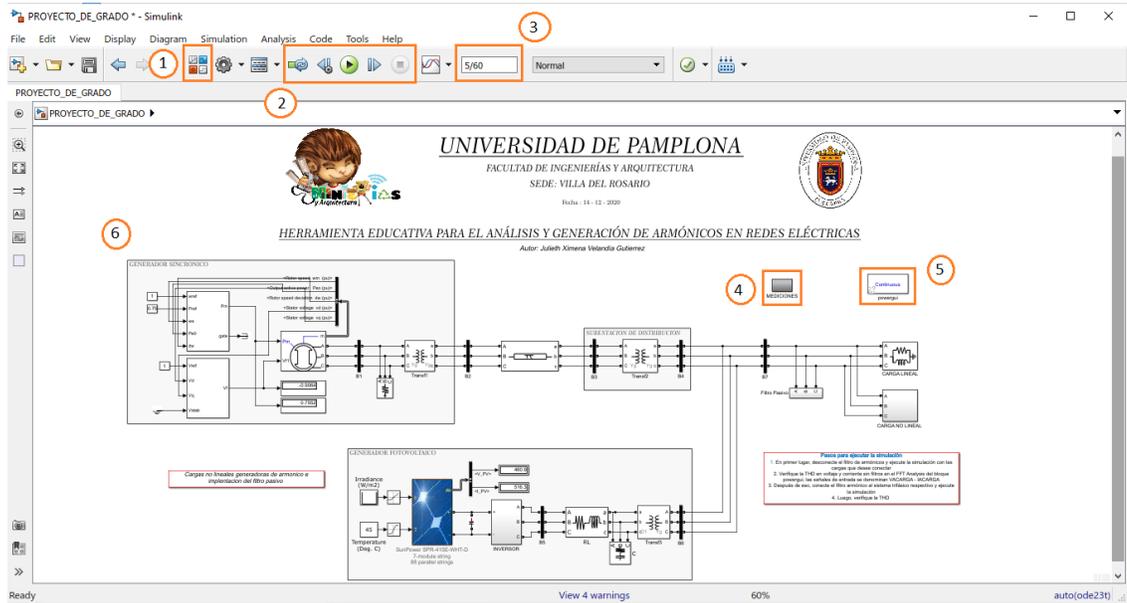
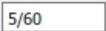


Fig. 72 Guía para el funcionamiento - Interfaz del montaje en simulink.

Fuente: Autor

Detalladamente se tiene:

1. En esta sección  se encuentran las librerías de Simulink como se enuncio anteriormente, donde se especificó la librería Simscape Electrical, además de los componentes implementados para la elaboración del montaje.
2. En esta parte  de la interfaz se encuentran los botones de RUN y STOP, que nos permiten iniciar la simulación y detenerla o pausarla.
3. Esta sección  nos permite modificar el tiempo de la simulación, como se muestra el tiempo de simulación es 5/60, lo cual indica que se realizaran 5 ciclo durante la simulación.
4. Está conformado por el grupo de señales de las mediciones que se tienen por los barrajes del sistema.
5. Este bloque  nos permite realizar simulaciones eléctricas dentro de simulink, además que por medio de la función FFT Analysis se podrá calcular el THD de la señal del sistema (explicación más adelante).
6. En esta última sección se observa el panel general del programa. Aquí se mostrará los diferentes bloques y modelos que se utilizaron para el montaje del sistema, estos tiene diferentes parámetros y características como se enuncio en el capítulo 6, los cuales algunos de ellos se podrán modificar. (explicación más adelante).

PASO 4:

En este paso se da una breve explicación de lo que se debe tener en cuenta al momento de simular el sistema.

- En primer lugar, desconecte el filtro pasivo de armónicos y ejecute la simulación con las cargas que desee conectar
- Verifique la THD en voltaje y corriente sin filtros en el FFT Analysis del bloque powergui, las señales de entrada se denominan VACARGA – IACARGA
- Seguidamente conecte el filtro armónico al sistema trifásico respectivo y ejecute la simulación
- Una vez simulado, verifique la THD del sistema.

PASO 5:

En esta parte se enunciará que parámetro y características se podrán modificar en el sistema por medio del código del ANEXO B, para acceder se debe dar doble click en el bloque.

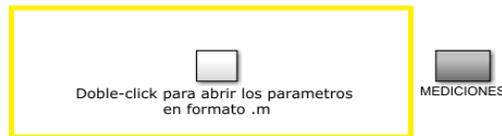


Fig. 73 Guía para el funcionamiento - Parámetros que se modifican
Fuente: Autor

IMPORTANTE: Cuando se realizan cambios de tensiones o potencias del sistema en componentes, se debe tener en cuenta el ajuste de estos parámetros en los otros componentes y elementos que se conforman o se conectan a estos.

PASO 6:

En esta parte se muestra la función FFT Analysis del POWERGUI que permite el cálculo de la THD, para acceder a esta función dará doble clic en el bloque donde se abre la ventana que se muestra en la Fig. 74

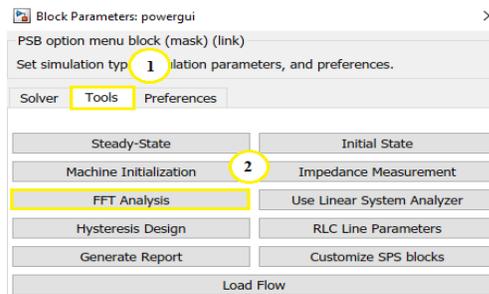


Fig. 74 Guía para el funcionamiento - Bloque POWERGUI
Fuente: Autor

Al abrir la función FFT Analysis se tiene:

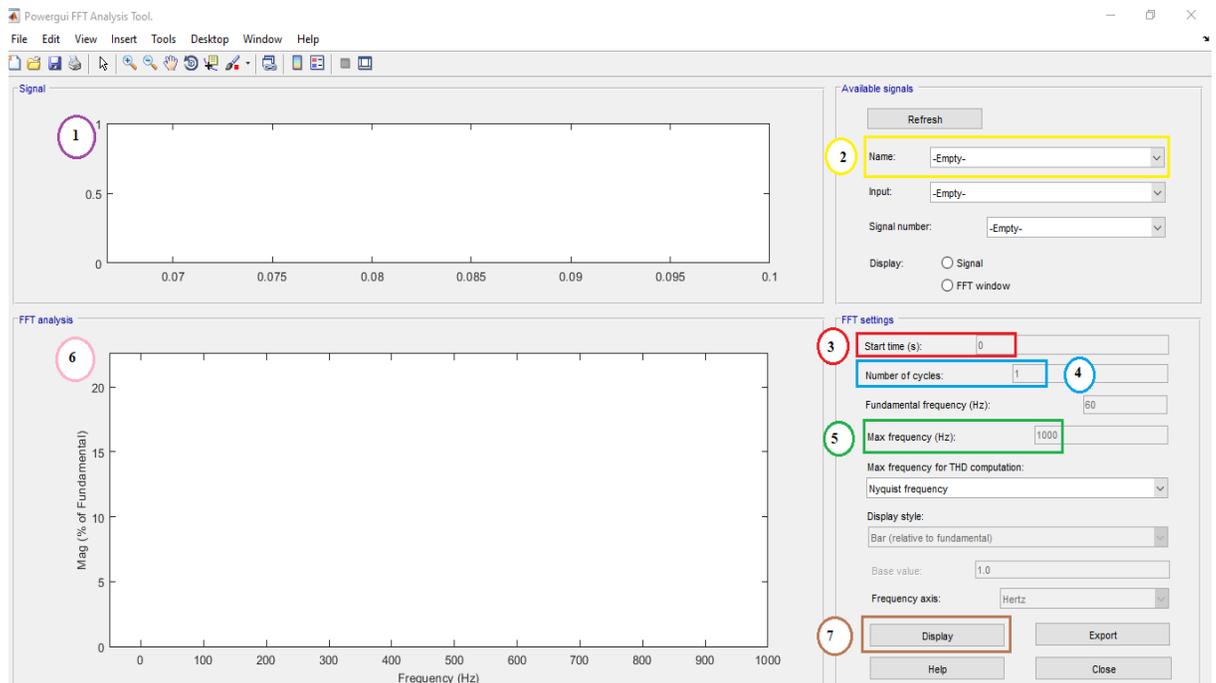


Fig. 75 Guía para el funcionamiento - Función FFT Analysis

Fuente: Autor

Detalladamente se tiene:

1. En esta parte se muestra la señal de entrada en el sistema.
2. Aquí se ingresa el nombre de la señal de entrada.
3. Se define el tiempo de inicio para el cálculo de la THD.
4. Se establecen el número de ciclos a evaluar.
5. En esta parte se tiene la máxima frecuencia a evaluar, si se consideran evaluar hasta el armónico 50 se tiene que la frecuencia máxima sería 3000.
6. En esta parte se muestra el espectro de distorsión.
7. Al presionar el botón display, se calcula distorsión armónica.

9. CONCLUSIONES

- En este trabajo se diseñó una herramienta educativa para el análisis y generación de armónicos en redes eléctricas en el software computacional Simulink de Matlab. Donde lo más relevante se da, en la metodología de generación de armónicos en el sistema de potencia, por lo que se implementan dos modelos de cargas no lineales las cuales son: primero un regulador de potencia por control de fase (que teóricamente posibilita cambiar los ángulos de disparo del TRIAC y en consecuencia la onda de tensión entre 0° y 180°); segundo un inversor de 6 pulsos DC-AC (el cual convierte la energía generada por el panel solar). Lo común entre estas cargas son los elementos electrónicos de potencia, por lo que se observa que son las fuentes principales de generación de armónicos.
- Por otra parte, dado que se busca que la generación de armónicos sea considerable y sus efectos fácilmente visibles y medibles, en los sistemas de las cargas no lineales se implementaron modelos robustos, por lo que se consideró que el sistema de generación fotovoltaica alimentara 50% de la carga y el 50% faltante se alimentara por el sistema de potencia, para así inyectar más armónicos a la red eléctrica.
- Los efectos de los armónicos producidos en esta investigación son reflejados en el sistema de potencia, por lo que a nivel industrial se deben reducir la incidencia en la red eléctrica para evitar daños.
- Este trabajo es importante para conocer y comprender los efectos de la presencia de armónicos y sus principales fuentes, como son las cargas no lineales implementadas.

10.RECOMENDACIONES Y TRABAJOS FUTUROS

- Implementar otros modelos de cargas no lineales para verificar la incidencia de estos en el sistema y comprender aún más la distorsión armónica generada por dichas cargas.
- Diseñar un filtro activo de armónicos en las terminales AC del inversor, regulador de potencia de motores y en otras cargas no lineales, para reducir la distorsión de tensiones y corrientes a límites aceptables en el punto de conexión común (PCC) establecidos en la normativa IEEE 519 permitiendo reducir los efectos que puedan dañar a máquinas y equipos eléctricos.
- Realizar un control o compensación del FP de potencia en la carga para establecer un soporte que permita evitar la inestabilidad de tensión producidos.

11. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] 2002 M. C. Ciro Alberto Núñez Gutiérrez, “ESTRATEGIAS DE CONTROL NO LINEAL APLICADAS A FILTROS ACTIVOS DE POTENCIA,” *Anal. pendapatan dan tingkat Kesejaht. rumah tangga petani*, 2002.
- [2] A. Y. Monitoreo, C. O. N. Un, A. Virtual, C. Rodrigo, and F. Benalcázar, “Universidad técnica del norte,” 2018.
- [3] Circutor, “Procedimientos para el Estudio y Análisis de Perturbaciones Armónicas -,” pp. 1–20, 2014, [Online]. Available: http://circutor.com/docs/procedimientos_sp.pdf.
- [4] M. -Barajas and B.- Sánchez, “Contaminación Armónica Producida Por Cargas No Lineales De Baja Potencia: Modelo Matemático Y Casos Prácticos Harmonic Pollution Produced By Low Power Nonlinear Loads: Mathematical Model and Practical Cases,” *Ing. Investig. y Tecnol. Núm*, vol. 2, pp. 189–198, 2010, [Online]. Available: <http://scielo.unam.mx/pdf/iit/v11n2/v11n2a6.pdf>.
- [5] J. D. Arcila, “Armónicos En Sistemas Eléctricos,” *Armónicos En Sist. Eléctricos*, pp. 1–26, 2016.
- [6] A. Tejada and A. Llamas, “EFECTOS DE LAS ARMÓNICAS EN LOS SISTEMAS ELÉCTRICOS A. Tejada, A. Llamas 1,” p. 8, 2002.
- [7] E. Téllez, “Distorsión Armónica,” *Rev. Programa Ahorr. Energ.*, no. 222, p. 31, 2012.
- [8] J. J. Fourier, “Aspectos técnicos de la calidad de ambientes interiores,” 1830.
- [9] F. A. Donoso, “Componentes Armónicas en Redes de Distribución Eléctricas,” *Conceptos, norma Vigen. en Chile y Altern. solución al Probl. http://www. Rev. cl/revistas/2001/5/Acevedo. pdf*, 2002.
- [10] M. Farhoodnea, A. Mohamed, and H. Shareef, “Novel method for determining the contribution of utility and customer harmonic distortion in distribution systems,” *PEOCO 2010 - 4th Int. Power Eng. Optim. Conf. Progr. Abstr.*, no. June, pp. 386–390, 2010, doi: 10.1109/PEOCO.2010.5559190.
- [11] D. Committee, I. Power, and E. Society, “10.1109@leestd.2014.6826459.Pdf,” vol. 2014, 2014, doi: 10.1109/IEEESTD.2014.6826459.
- [12] H. Ramos and R. Luna, “Diseño de un sistema fotovoltaico integrado a la red para el área De estacionamiento de la Universidad Tecnologica De Salamanca,” *Univ. Tecnol. Salamanca*, p. 101, 2014, [Online]. Available:

[https://cimav.repositorioinstitucional.mx/jspui/bitstream/1004/521/1/Tesis Rafael Luna Puente%2C Humberto Ramos López.pdf](https://cimav.repositorioinstitucional.mx/jspui/bitstream/1004/521/1/TesisRafaelLunaPuente%2CHumbertoRamosLópez.pdf).

- [13] A. Q. Novoa, "Tema 11 - Inversores," *Introd. a la Electrónica Potencia*, pp. 1–24, 2007, [Online]. Available: http://www.uv.es/~emaset/iep00/temas/IEP11_0607.pdf.
- [14] "Diacs-Y-Triacs.Pdf." .
- [15] H. Oyola Chadid and luis alberto Garcia Miranda, "MODELAMIENTO DE UN GENERADOR HIDRÁULICO EN MATLAB HUMBERTO," *McKinsey Q.*, vol. 2, no. 1, pp. 1–22, 2014, [Online]. Available: http://wfa.ust.hk/women_matter_asia_files/Women_Matter_Asia.pdf<http://dx.doi.org/10.1016/j.paid.2014.01.052><https://www.mckinsey.com/featured-insights/leadership/the-leadership-journey-of-abraham-lincoln?cid=other-eml-alt-mkq-mck-oth-1805&hlkid=145b6>.
- [16] AESoluciones, "Los Efectos De Los Armónicos Y Sus Soluciones," p. 10, 2014, [Online]. Available: aesoluciones@aes.com.
- [17] P. Simon, "Filtros eléctricos pasivos ," *Univ. Politécnica Cart.*, [Online]. Available: http://ocw.bib.upct.es/pluginfile.php/12582/mod_resource/content/1/Teoria de Filtros pasivos.pdf.
- [18] "MATLAB - MathWorks - MATLAB y Simulink." <https://www.mathworks.com/products/matlab.html> (accessed Oct. 30, 2020).
- [19] "Simulink Documentation - MathWorks América Latina." <https://la.mathworks.com/help/simulink/index.html> (accessed Oct. 30, 2020).

ANEXO A. CÓDIGO DE GENERACIÓN DE PULSOS DEL INVERSOR

```
function y = fcn(u)
f=u (1);
w=2*pi*f;
t=u (2);

Angulo=w*t;
CA=cos(Angulo);
SA=sin(Angulo);

if (SA>0 && CA>=0)
    ang=asind(SA);
elseif (SA>0 && CA<=0)
    ang=180-asind(SA);

elseif (SA<0 && CA<=0)
    ang=180-(asind(SA));
else
    ang=360+(asind(SA));
end

%pulsos

if(ang>=0&&ang<=60)
    P=[1 0 0 0 1 1];
elseif(ang>60&&ang<=120)
    P=[1 1 0 0 0 1];
elseif(ang>120&&ang<=180)
    P=[1 1 1 0 0 0];
elseif(ang>180&&ang<=240)
    P=[0 1 1 1 0 0];
elseif(ang>240&&ang<=300)
    P=[0 0 1 1 1 0];
else(ang>300&&ang<=360)
    P=[0 0 0 1 1 1];
end
y=P;
```

ANEXO B. CÓDIGO DE LOS PARAMETROS DEL PROGRAMA

```
% Frecuencia del sistema (Hz):
Fnom=60;

% *****
%                               PARAMETROS DEL GENERADOR SINCRONICO
% *****
VGsin=20e3; %tension del generador sincronico (V)
PGsin=200e6; %potencia nominal del generador sincronico (VA)

PTransf1=200e6; %potencia del transformador 1 (VA)
Vtransf1_prim=20e3; %tension del primario del transformador 1 (V)
Vtransf1_sec=240e3; %tension del secundario del transformador 1 (V)
% *****
%                               PARAMETROS DE LA LINEA
% *****
L=120; %longitud de la linea (Km)
% *****
%                               PARAMETROS DE LA SUBESTACION
% *****
PTransf2=200e3; %potencia del transformador 2 (VA)
Vtransf2_prim=240e3; %tension del primario del transformador 2 (V)
Vtransf2_sec=13.8e3; %tension del secundario del transformador 2 (V)

% *****
%                               PARAMETROS DEL GENERADOR FOTOVOLTAICO
% *****
PTransf3=200e3; %potencia del transformador 2
Vtransf3_prim=13.8e3; %tension del primario del transformador 2
Vtransf3_sec=249; %tension del secundario del transformador 2

% *****
%                               PARAMETROS DE LA CARGA NO LINEAL - TRIAC
% *****
VcargaNO=13.8e3; % Tension nominal de la carga NO lineal (V)
P_aN=100e3; % Consumo de potencia activa (W)
P_rN=100; % Consumo de potencia reactiva (VAR)

A=30; % angulo de disparo del TRIAC

% *****
%                               PARAMETROS DE LA CARGA LINEAL
% *****
Vcarga=13.8e3; % Tension nominal de la carga lineal (V)
P_a=400e3; % Consumo de potencia activa (W)
P_r=39.9e3; % Consumo de potencia reactiva (VAR)
```