

7-4-2019

Inyección de corrientes armónicas en la red de baja tensión para observar el comportamiento en los electrodomésticos básicos de los usuarios finales ante este tipo de afectaciones

John Esteban Alméciga Malpica
Universidad de La Salle, Bogotá

Héctor David Chisacá Cantor
Universidad de La Salle, Bogotá

Follow this and additional works at: https://ciencia.lasalle.edu.co/ing_electrica

Citación recomendada

Alméciga Malpica, J. E., & Chisacá Cantor, H. D. (2019). Inyección de corrientes armónicas en la red de baja tensión para observar el comportamiento en los electrodomésticos básicos de los usuarios finales ante este tipo de afectaciones. Retrieved from https://ciencia.lasalle.edu.co/ing_electrica/252

This Trabajo de grado - Pregrado is brought to you for free and open access by the Facultad de Ingeniería at Ciencia Unisalle. It has been accepted for inclusion in Ingeniería Eléctrica by an authorized administrator of Ciencia Unisalle. For more information, please contact ciencia@lasalle.edu.co.

**INYECCIÓN DE CORRIENTES ARMÓNICAS EN LA RED DE BAJA TENSIÓN
PARA OBSERVAR EL COMPORTAMIENTO EN LOS ELECTRODOMÉSTICOS
BÁSICOS DE LOS USUARIOS FINALES ANTE ESTE TIPO DE
AFECTACIONES.**



**JOHN ESTEBAN ALMÉCIGA MALPICA
HÉCTOR DAVID CHISACÁ CANTOR**

**UNIVERSIDAD DE LA SALLE
FACULTAD DE INGENIERÍA
PROGRAMA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA
BOGOTÁ D.C.
2019**

**INYECCIÓN DE CORRIENTES ARMÓNICAS EN LA RED DE BAJA TENSIÓN
PARA OBSERVAR EL COMPORTAMIENTO EN LOS ELECTRODOMÉSTICOS
BÁSICOS DE LOS USUARIOS FINALES ANTE ESTE TIPO DE
AFECTACIONES.**

**JOHN ESTEBAN ALMÉCIGA MALPICA
HÉCTOR DAVID CHISACÁ CANTOR**

**Trabajo de grado presentado como requisito parcial para optar al título de
Ingeniero Electricista.**

**Director
Luis Hernando Correa Salazar.
Profesor Asistente**

**UNIVERSIDAD DE LA SALLE
FACULTAD DE INGENIERÍA
PROGRAMA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA
BOGOTÁ D.C.
2019**

Nota de Aceptación:

Firma del presidente del jurado

Firma del jurado

Firma del jurado

Bogotá D.C., marzo de 2019

Dedico este A mi familia y también a mis compañeros porque en este tiempo que estuve estudiando aprendí y compartí muchas cosas que me hicieron madurar.
A la Universidad de La Salle y al cuerpo de docentes de la facultad de ingeniería eléctrica puesto que fueron los que me formaron para ser una persona ejemplar tanto la sociedad.
Por una parte en especial le dedico este trabajo a mi papá por no dejarme nunca solo y compartir toda su experiencia e involucrarme en este mundo de la electricidad.

John Esteban Alméciga Malpica

A Dios y a mi familia dedico este trabajo por no dejarme perder el rumbo y por estar siempre en mi mente, dándome las fuerzas necesarias para salir adelante.
A los maestros por enseñarme las bases y los valores para ser un buen Ingeniero Electricista.
En especial a mis padres por estar siempre presente en este proceso de aprendizaje y por estar siempre a mi lado.

Héctor David Chisacá Cantor

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a Dios, en primer lugar, ya que nos permitió llegar a este punto de nuestras vidas para poder desarrollar este proyecto y vencer las dificultades que se nos presentaron en el transcurso de nuestra carrera.

Al ingeniero Luis Hernando Correa Salazar, director de este trabajo de grado, quien nos colaboró, asesoró, guio y compartió su tiempo, su experiencia y sus conocimientos para que este proyecto se pudiera culminar.

A mi amigo y compañero Héctor Chisacá, por su dedicación, esfuerzo y colaboración, ya que con sus aportes, conocimientos y dedicación, se logró culminar este proyecto.

John Esteban Alméciga Malpica

Agradezco a Docentes, compañeros y personas que me acompañaron en este proceso, enseñándome valores de honestidad, respeto y tolerancia.

Al ingeniero Luis Hernando Correa, por acompañarnos desde el principio y darnos su brazo para salir adelante con este proyecto.

A mi compañero y amigo de batallas en el transcurso de esta carrera, que si no ser por su carácter y dedicación este proyecto no se hubiera culminado.

Héctor David Chisacá Cantor

ÍNDICE GENERAL

	Pág.
I. Introducción.....	12
II. Marco teórico	13
A. Naturaleza	13
B. Efectos de los armónicos	13
C. Distorsión armónica.....	14
D. Distorsión armónica total.....	14
E. Distorsión total de demanda	14
F. Fuentes generadoras de armónicos	14
G. Convertidores de potencia	14
H. Hornos de inducción	15
I. Hornos de arco eléctrico	15
J. Saturación de transformadores.....	15
K. Equipos de cómputo y equipos domésticos	15
L. Niveles permitidos de distorsión armónica.....	15
M. Límites de distorsión de voltaje.....	16
N. Límites de distorsión de corriente.....	16
O. Reducción de armónicos.....	16
P. Filtros	16
Q. Efectos asociados a la reducción de armónicos	16
R. Curvas de inmunidad	17
S. Antecedentes.....	17
III. Armónicos en la red eléctrica.....	20
A. Vehículos eléctricos (VE)	20
B. Funcionamiento centros de carga.....	20
C. Centros de carga de VE y su influencia en la red de distribución.....	21
D. Comportamiento de la corriente en la red eléctrica	22
IV. Carga usuario final	25
A. Información del usuario final.....	25
B. Cargas susceptibles a la inyección de armónicos	25
C. Red de distribución de BT	26
D. Ubicación generador de armónicos en los diferentes nodos.....	28
E. Casos de estudio	29
F. Electrodoméstico a estudiar	35

V.	Diseño circuitos generadores de armónicos.....	36
A.	Circuito #1	36
B.	Circuito #2.....	37
C.	Circuito #3.....	39
D.	Diseño y selección de circuito generador de corrientes armónicas	41
E.	Simulaciones respectivas con circuito seleccionado	42
F.	Comportamiento de la carga con la inyección de armónicos	45
G.	Comentarios	60
VI.	Conclusiones	61
VII.	Referencias	63
VIII.	Anexos.....	64

ÍNDICE DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Características de estaciones de carga.....	20
Tabla 2. Componentes circuitos expresados en los circuitos.....	23
Tabla 3. Contenido armónico de corriente del Nissan leaf en carga rápida.....	28
Tabla 4. Contenido armónico de corriente del Nissan Leaf en carga lenta.....	28
Tabla 5. Variación THD en nodo 8, según ubicación de generador de armónicos, escenario 1.....	29
Tabla 6. Variación THD en nodo 8, según ubicación de generador de armónicos, escenario 2.....	29
Tabla 7. Variación THD en nodo 8, según ubicación de generador de armónicos, escenario 3.....	30
Tabla 8. Variación del THD en nodo 8, escenario 4.....	32
Tabla 9. Variación del THD en nodo 8, escenario 5.....	32
Tabla 10. Variación del THD en nodo 8, escenario 6.....	33
Tabla 11. Características del circuito #1.....	36
Tabla 12. Características del circuito #2.....	38

ÍNDICE DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Curva demanda de Energia.Tomado de 5.....	17
Figura 2. Comportamiento de THDi, FP y corriente RMS de un cargador de VE..	18
Figura 3. Carga de VE coordinada y filtrada y no-coordinada ni filtrada.....	19
Figura 4. Modos de carga.....	21
Figura 5. Rectificador en puente en un cargador de VE.....	22
Figura 6. Rectificador con toma central en un cargador de VE.	22
Figura 7. Comportamiento de la corriente producida por un cargador eléctrico..	23
Figura 8. Comportamiento de la corriente debido a un centro de carga.	23
Figura 9. Circuito LAR306 de estructura para baja tensión.....	26
Figura 10. Circuito AE217 de estructura para baja tensión.	27
Figura 11. Circuito en baja tensión para evaluación de impacto de armónicos	27
Figura 12. Nodo 8 y fuente de armónicos.	28
Figura 13. Circuito generador de armónicos #1.....	36
Figura 14. Forma de onda de tensión de salida en la carga del circuito..	37
Figura 15. Circuito generador de armónicos #2	37
Figura 16. Forma de onda de la tensión en Simulink.....	38
Figura 17. Circuito generador de armónicos #3.....	39
Figura 18. Forma de onda de la tensión sin contenido armónico en circuito 3.....	40
Figura 19. Forma de onda de la tensión con contenido armónico.	40
Figura 20. Circuito Orcad seleccionado para simulación.	42
Figura 21. Corriente de entrada en inversor.....	43
Figura 22. Tensión en la carga	44
Figura 23. Forma de onda de la corriente vista en la carga.....	44
Figura 24. Espectro de amplitudes de armónicos de tensión en la carga.....	45
Figura 25. Espectro de amplitudes de armónicos de corriente en la carga.	45
Figura 26. Circuito con pulsador V4 activado.	46
Figura 27. Corriente de entrada del circuito.....	46
Figura 28. Señal de corriente en la carga	47
Figura 29. Espectro de amplitudes de armónicos vistos en la carga.....	47
Figura 30. Circuito con pulsadores V2 y V3 activados	48
Figura 31. Corriente de entrada del circuito.....	48
Figura 32. Señal de corriente en la carga	49
Figura 33. Espectro de amplitudes de armónicos de corriente en la carga..	49
Figura 34. Circuito con pulsadores V4 y V5 activados..	50
Figura 35. Corriente de entrada al circuito.....	50

Figura 36. Corriente en la carga del circuito.....	51
Figura 37. Espectro de amplitud de armónicos de corriente en la carga.....	51
Figura 38. Circuito con pulsadores V2 y V5 activados..	51
Figura 39. Corriente de entrada del circuito del escenario 4.....	52
Figura 40. Señal de corriente en la carga del escenario 4.....	52
Figura 41. Espectro de amplitudes de armónicos de corriente en la carga	53
Figura 42. Circuito con pulsadores V3 y V4 activados	53
Figura 43. Corriente de entrada del circuito del escenario 5.....	54
Figura 44. Corriente en la carga del circuito del escenario 5.....	54
Figura 45. Espectro de amplitudes de armónicos en la carga	55
Figura 46. Circuito con los 4 pulsadores activados.....	55
Figura 47. Corriente de entrada al circuito del escenario 6.....	56
Figura 48. Corriente en la carga al circuito del escenario 6.....	56
Figura 49. Espectro de amplitudes de armónicos de corriente en la carga	56
Figura 50. Circuito con nuevos parámetros	57
Figura 51. Corriente de entrada al circuito del escenario 7.....	58
Figura 52. Corriente en la carga del circuito del escenario 7.....	58
Figura 53. Espectro de amplitudes de armónicos de corriente en la carga	59
Figura 54. Tensión en la carga del circuito del escenario 7	59
Figura 55. Porcentajes de distorsión de tensión nodo 8	64
Figura 56. Porcentajes de distorsión de tensión nodo 8	64
Figura 57. Porcentajes de distorsión de tensión nodo 8	64
Figura 58. Forma de onda de la corriente de entrada en circuito simulado en Simulink.....	65
Figura 59. Forma de onda de la corriente en la carga en circuito simulado en Simulink	65
Figura 60. Forma de onda de la corriente con contenido armónico simulado en Proteus ...	66
Figura 61. Espectro de amplitudes de armónicos de tensión simulado en Proteus.....	66
Figura 62. Espectro de amplitudes de armónicos de corriente simulado en Proteus	67

ÍNDICE DE GRÁFICAS

Gráfica 1. Comparación de porcentajes totales de distorsión escenarios 1 y 2.....	30
Gráfica 2. Comparación de porcentajes totales de distorsión escenarios 1 y 3.....	31
Gráfica 3. Comparación de porcentajes totales de distorsión escenarios 2 y 3.....	32
Gráfica 4. Comparación de porcentajes totales de distorsión escenarios 4 y 6.....	33
Gráfica 5. Comparación de porcentajes totales de distorsión escenarios 4 y 5.....	34
Gráfica 6. Comparación de porcentajes totales de distorsión escenarios 5 y 6.....	34

I. Introducción

El daño en los electrodomésticos es un problema que se presenta muy a menudo, ya que los nuevos dispositivos electrónicos usan tecnologías y componentes cada vez más sofisticados, pero al mismo tiempo más vulnerables a ciertas condiciones que pueden pasar en cualquier instante de tiempo tales como caídas, picos de tensión, y perturbaciones en las formas de onda tanto de corriente como de tensión conocidos como armónicos. El daño de estos equipos es un problema que afecta en gran parte a los usuarios finales que los usan. Normalmente los electrodomésticos, como cualquier otro dispositivo electrónico cuando es adquirido, vienen con un manual en donde va adjunta toda la información del producto y como funciona. También hay unos manuales que aparte de esa información, suministra también información de que tan tolerable es el dispositivo a ciertas temperaturas, a que tensión y con cuanta corriente eléctrica funciona y por otra parte saber o poder determinar cómo y por cuanto tiempo funcionará el dispositivo después de un cierto tiempo en condiciones que no son de su comportamiento normal; en otras palabras, saber cuál es el límite de operación de los equipos electrónicos y electrodomésticos. Aunque hay una gran parte de los usuarios que no entienden y no les interesa saber las vulnerabilidades de los electrodomésticos es bueno tener esos datos presentes para poder tener un buen uso de los electrodomésticos y evitar posibles fallos. En este documento se presenta el diseño de un circuito que genera armónicos de corriente, los cuales son inyectados a una carga que modela a una lavadora, esto con el fin de poder observar el comportamiento que tiene esta ante este tipo de afectaciones y poder determinar que componentes que conforman la carga se dañan.

En el capítulo II de este documento se describe todo lo relacionado a la naturaleza de los armónicos como su naturaleza y que los generan además de revisar antecedentes y literatura del comportamiento de los armónicos. En el capítulo III se muestran cómo afectan los armónicos a la red eléctrica debido a centros de carga de vehículos eléctricos. En el capítulo IV se muestra cómo es el funcionamiento de un centro de carga de vehículos eléctricos en un circuito de baja tensión y como lo afecta. En el capítulo V se realiza el diseño de los circuitos generadores de armónicos, seleccionando el más adecuado con sus respectivas simulaciones y análisis. Finalmente, en el capítulo VI se realizan las respectivas conclusiones de los resultados obtenidos.

II. Marco teórico

A. Naturaleza

Los armónicos se definen en [1] como tensiones o corrientes sinusoidales que poseen frecuencias que son múltiplos enteros de la frecuencia fundamental a la cual el sistema de alimentación está diseñado para operar. Las formas de onda distorsionadas pueden ser descompuestas en una suma de la señal de frecuencia fundamental y los armónicos. Estas distorsiones armónicas se originan debido a equipos y/o cargas no lineales conectadas al sistema de potencia.

B. Efectos de los armónicos en la red eléctrica

Los efectos producidos por los armónicos son significativos en los sistemas eléctricos. Dependiendo de la intensidad y la duración de los armónicos se puede presentar los siguientes problemas [2]

- Problemas de funcionamiento en dispositivos electrónicos de regulación, tanto de potencia como de control.
- Mal funcionamiento en dispositivos electrónicos de protección y medición.
- Interferencias en sistemas de comunicación y telemando.
- Sobrecalentamiento de los equipos eléctricos (motores, transformadores, generadores, etc.) y el cableado de potencia, con la disminución consecuente de la vida útil de los mismos, e incremento considerable de pérdidas de energía.
- Fallo de capacitores de potencia.
- Efectos de resonancia que amplifican los problemas mencionados anteriormente y pueden provocar accidentes eléctricos, fallas destructivas de equipos de potencia o mal funcionamiento.

Al describir con mejor detalle los efectos de los armónicos en algunos componentes, se puede apreciar que en cables y conductores se tiene como resultado el calentamiento de los mismos y por ende pérdidas por efecto Joule [3].

El sobrecalentamiento de los transformadores hace que estos disminuyan considerablemente su vida útil, esto debido a que se generan pérdidas por efecto Joule en las bobinas del transformador y pérdidas en el núcleo debidas a corrientes de Foucault [1]. En las máquinas rotatorias los efectos que se pueden producir son las pérdidas de potencia por calentamiento tanto en los devanados como en el núcleo estatórico y rotórico.

En las líneas telefónicas los armónicos pueden producir perturbaciones en los circuitos de corrientes bajas. El grado de perturbación depende de la distancia entre las líneas y la frecuencia de los armónicos [1].

La resonancia es uno de los efectos que se produce debido a las distorsiones armónicas. Cuando hay resonancia se producen valores extremadamente altos y bajos de impedancia [1]. Estas variaciones en la impedancia modifican la corriente y la tensión en los sistemas de distribución.

C. Distorsión armónica

Como se comenta en [3], la distorsión armónica se presenta cuando el voltaje o la corriente de un sistema eléctrico tienen deformaciones con respecto a la forma de onda sinusoidal pura. Estas distorsiones se pueden dar por efectos transitorios o efectos permanentes. Se deben presentar las siguientes condiciones para que se considere como distorsión armónica las deformaciones de una señal [3]:

- Que la señal tenga valores definidos dentro del intervalo, lo que implica que la energía contenida es finita
- Que la señal sea periódica, teniendo la misma forma de onda en cada ciclo de la señal de corriente o voltaje.
- Permanente. Cuando la distorsión armónica se presenta en cualquier instante de tiempo; es decir; que no es pasajera.

D. Distorsión armónica total (THD)

Se define distorsión armónica total [3] a la relación entre el contenido armónico de la señal y la componente de frecuencia fundamental y su valor está entre el 0% y el infinito.

E. Distorsión total de demanda

Es la relación entre el porcentaje de distorsión total en un instante dado y la corriente fundamental máxima en un periodo de tiempo. Se expresa de la siguiente manera:

$$TDD = \frac{THDi}{I_f} \quad (1)$$

F. Fuentes generadoras de armónicos

Todo tipo de carga no lineal conectada al sistema eléctrico causará distorsión armónica. Como fuentes generadoras de armónicos se encuentran:

G. Convertidores de potencia

Son dispositivos que inyectan armónicos al sistema debido a la conmutación en los tiristores, para controlar la potencia a un dispositivo o carga.

H. Hornos de inducción

Los hornos de inducción consisten en rectificadores inversores, los cuales controlan la frecuencia de alimentación de una bobina [1]. La bobina, mediante inducción, hace que se calienten las piezas metálicas para luego ser moldeadas.

I. Hornos de arco eléctrico

Estos hornos son utilizados para fundir acero, constan de dos electrodos que cuando hacen contacto directo con el acero se crea un arco eléctrico que lo funde.

J. Saturación de transformadores

Como se menciona en [1], la saturación de transformadores provoca la generación de armónicos debido a que se comportan como un elemento no lineal debido a que el transformador está operando en su región no lineal. Otra forma de generar armónicos es durante el momento de energización. El transformador presenta gran cantidad de armónicos pares e impares que pueden llegar a durar varios minutos.

K. Equipos de cómputo y equipos domésticos

Como se menciona en [1], estos equipos funcionan en base a un sistema de alimentación que es un puente rectificador y gran cantidad de dispositivos electrónicos los cuales, por sus características de consumo, son considerados cargas no lineales.

L. Niveles permitidos de distorsión armónica

Como se menciona en [3], se debe asegurar la integridad en el sistema de potencia. Para eso es preciso establecer límites sobre los niveles de distorsión permisibles que apliquen tanto a los usuarios finales como a los operadores que suministran energía.

La norma IEEE 519 “Prácticas recomendadas y requerimientos para el control de armónicas en sistemas eléctricos de potencia” define los valores máximos permitidos:

- El suministrador tiene bajo su responsabilidad que, en la acometida, la distorsión armónica total en voltaje THD se encuentre dentro de los límites establecidos, por lo que debe asegurarse que condiciones de resonancia en el sistema de generación, transmisión o distribución no ocasionen niveles inaceptables de distorsión en voltaje.
- Usuarios. Deben de asegurar que, en la acometida, la generación de armónicas en corriente se ubique dentro de los límites establecidos, tanto para componentes armónicas individuales como para la Distorsión de Demanda Total TDD,

especificándose dichos límites como porcentaje de la demanda promedio de corriente del usuario en lugar de la corriente fundamental instantánea, con el fin de proporcionar una base común de evaluación a lo largo del tiempo.

M. Límites de distorsión en voltaje

El suministrador [4] es responsable de mantener la calidad del voltaje en el sistema global, especificándose los límites para diferentes niveles de tensión. Es importante anotar que la definición de la distorsión armónica total THD que se utiliza es diferente a la convencional ya que se expresa la distorsión en función al voltaje nominal, que es un valor constante para cada usuario, estableciéndose así, una base fija de evaluación a lo largo del tiempo.

N. Límites de distorsión en corriente

Las corrientes armónicas para cada usuario son evaluadas en el PCC (punto de acoplamiento común) y los límites se establecen en base a la relación entre la corriente de cortocircuito y la demanda máxima de corriente de la carga del usuario.

O. Reducción de armónicos

Como se describe en [3] en los sistemas eléctricos donde el contenido armónico de las señales está afectando su desempeño, se instalan filtros, con el propósito de reducir la distorsión, aproximando dichas señales a la forma de onda sinusoidal.

P. Filtros

Los filtros son equipos cuyo propósito es interactuar con una frecuencia específica o rango de frecuencias de una señal dada, teniendo el mayor impacto cuando se instalan lo más cercano posible a las cargas no lineales.

En una red en la que la proporción de cargas no lineales con relación a la carga total es superior a 10%, no se deben instalar capacitores ya que la distorsión armónica se incrementará provocando problemas en los equipos. Incluso sucede que usuarios que solo tienen cargas lineales, experimentan fallas en sus capacitores y distorsión en voltaje debido a la importación de los armónicos de otros usuarios que se alimentan de la misma red de media o baja tensión.

Q. Efectos asociados a la reducción de armónicos

Con la reducción de armónicos se obtienen beneficios tales como [3]:

- Elevación del factor de potencia.
- Reducción de consumo de energía reactiva de las redes.

- Reducción de pérdidas producidas por efecto Joule.
- Prolongación de la vida de equipos electrónicos.
- Reducción de sobrecalentamientos en el cableado.
- Reducción de pérdidas en transformadores.
- Incremento en la eficiencia y prolongación de la vida de motores eléctricos.

R. Curvas de inmunidad

Las curvas de inmunidad son un tipo de graficas que muestran la tolerancia de los equipos ante variaciones del sistema de alimentación.

S. Antecedentes

Los vehículos eléctricos son de gran importancia en el último siglo, esto debido a que la preocupación por el aumento de gases invernadero y el aumento de contaminantes que producen los gases de los carros convencionales ha mostrado preocupación en países potenciales como Alemania, Estados Unidos y la China [5]. Para introducir estos nuevos sistemas a la red existente se debe realizar un estudio de como los elementos eléctricos pueden afectar a estas por su gran contenido de electrónica de potencia y sus componentes de carga vehicular. El sistema de distribución se puede ver afectado por que los armónicos pueden ser devueltos a la red o en su defecto la red de Baja tensión la cual puede presentar calentamiento en los transformadores [5] y se verá muy vulnerable cuando se presente la carga de vehículos en serie como lo puede ser en horas de la noche cuando las personas lleguen a sus hogares. La inclusión de fuentes que de corriente que inyectan corrientes armónicas tiene un gran impacto en un sistema de distribución, los armónicos de corriente generan efectos nocivos a la red de distribución. Tales son los efectos que incluso la demanda de energía en un sistema de distribución puede llegar a incrementarse [5]. También se debe mencionar que, al conectar fuentes generadoras de corrientes armónicas, en este caso conectar vehículos eléctricos a la red, se evidencia también un aumento en el consumo de energía. En las figuras 1 y 2 se muestra como es el aumento de la demanda de energía cuando se conectan VE a la red de distribución. Se puede observar también como es el incremento y decremento de la demanda de energía según la cantidad de vehículos eléctricos conectados a la red eléctrica.

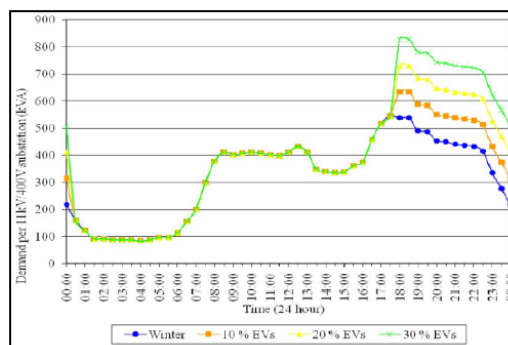


Figura 1. Curva demanda de energía. Tomado de [5].

También se debe mencionar que, al haber mas incremento de la demanda de energía, se puede presentar que la calidad de la energía sea un poco baja en algunos de los nodos del sistema. La figura 2 muestra como es el comportamiento del THDi, factor de potencia y la corriente de un cargador de VE conectados a la red.

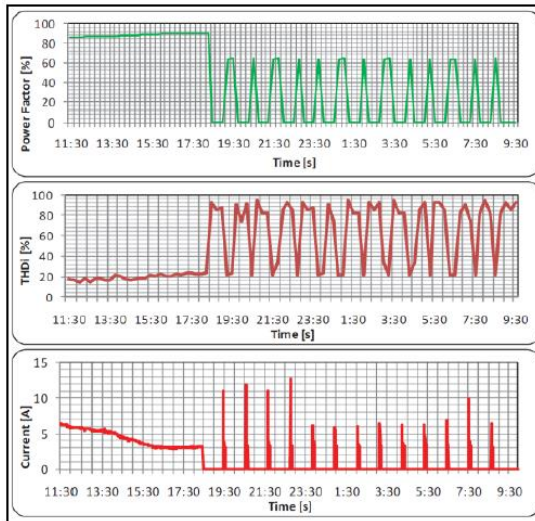


Figura 2. Comportamiento del THDi, FP y corriente RMS de un cargador de VE. Tomado de [5].

Se puede observar como es el comportamiento de la corriente que sale del cargador, con picos altos, y como los THDi que provocan estos cargadores son muy altos.

Como se menciona en [6] la calidad de energía es alterada por cualquier tipo de fenómeno eléctrico y electromagnético, estas alternaciones afectan el mercado energético y por ultimo afectan a los usuarios conectados, que al final en la gran parte de los casos, son los que tienen que pagar por todo estos daños generados por estas afectaciones. Por tal motivo se debe hacer una buena planificación de los sistemas de generación, transmisión y distribución para evitar afectaciones en la calidad de la energía.

El rendimiento y la calidad de la energía en los sistemas residenciales de BT son los más afectados debido al efecto de inyección de corrientes armónicas, se puede ver cómo afecta la inyección de corrientes armónicas en redes de BT. Se muestra un estudio, mediante el cual con simulaciones muestra como es el comportamiento del THDi cuando hay el 100% de VE conectados a la red y cuando es mínimo el número de VE conectado. Como se puede ver en [6], la alta conexión de VE a la red de distribución provoca un gran impacto en pérdida de calidad de la energía y con incrementos del THDi pudiendo violar los límites recomendados en la norma IEEE 519, esto se puede observar en la figura 2.

Debido a que la conexión de vehículos eléctricos provoca el incremento del THDi y del THDv se han planteado alternativas para tratar de disminuir los armónicos generados por cargas que inyectan armónicos en la red, sobre todo de VE. Como se mencionó

anteriormente, en [6] se explica un estudio que mediante simulaciones muestra el comportamiento del THDi con VE conectados a la red. Por otro lado, se muestra como es el comportamiento del THDi cuando la carga de vehículos es coordinada y filtrada y como es el comportamiento cuando la carga de VE no es coordinada ni filtrada. En la figura 3 se puede observar como el THD baja cuando la carga de VE es coordinada y filtrada.

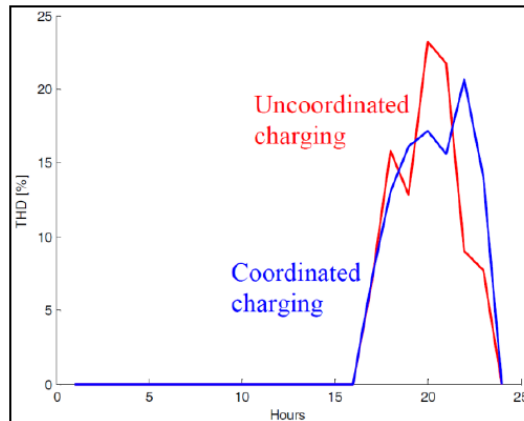


Figura 3. Carga de VE coordinada y filtrada y no-coordinada ni filtrada. Tomado de [6].

Finalmente, se puede ver que los efectos de los armónicos en las redes de distribución son negativos, por tal motivo estos temas de armónicos eléctricos deberían tener más atención para evitar posibles problemas que se puedan presentar cuando ya la demanda de VE sea muy alta. Como se puede leer en [6], se mencionan varias referencias donde se muestran avances en estrategias que aseguran que el THDi no sobrepase los límites establecidos que son por debajo del 5%. Por otro lado también muestra información de cómo es el comportamiento de la tensión, factor de potencia, THDv y el THDi cuando hay VE conectados a la red.

III. Armónicos en la red eléctrica debido a cargadores de vehículos eléctricos

Los armónicos en la red eléctrica, como, ya se ha mencionado, son uno de los problemas que más afectan la calidad de la energía eléctrica; en alta, media y baja tensión y por ende también afecta a los usuarios finales de las redes de distribución [2]. Hay que tener en cuenta que son varios los factores que pueden generar armónicos en la red; los más comunes son las cargas no lineales que se encuentran en las zonas industriales de las ciudades.

Otro factor que genera contenido rico en armónicos y que está creciendo últimamente es el auge de los vehículos eléctricos. Como se menciona en [7] el aumento de los VE es debido a que son unas alternativas prometedoras que desplazan una gran parte el consumo del petróleo, además de que los vehículos eléctricos aprovechan más la energía cinética [8] y ellos pueden proporcionar energía mientras están conectados a la red eléctrica.

A. Vehículos eléctricos

Los VE (vehículos eléctricos) son autos que no necesitan el combustible convencional para funcionar. Estos funcionan con energía eléctrica, la cual es suministrada por la red de distribución en BT. De igual forma, en un futuro los VE y los VE híbridos crearán serios problemas en la calidad del suministro de las redes eléctricas existentes, sobre todo en los centros de carga que es donde más se ve concentración de estos. En su mayoría tienen capacidad para máximo 4 personas.

B. Funcionamiento de los centros de carga

Las estaciones de carga son los lugares donde se concentran los VE para recibir energía eléctrica y poder funcionar. Los tipos de carga pueden ser carga lenta, carga semirápida y carga rápida. La tabla 1 muestra las características de las estaciones de carga [6].

Tipo de carga	Carga lenta	Carga semirápida	Carga rápida	
			AC	DC
Potencia	3,3 - 3,6 kW; I= 16A 6,6 - 7,6 kW; I= 32A	22kW a 32A	43 kW	50kW
Voltaje	208-240V Monofásico trifilar o bifásico	400V trifásico AC	400V trifásico AC	Alimentación 400V trifásico AC salida 500VDC
Tiempo de recarga	16A: 6-8 Horas 32A: 4-6 Horas	2 Horas	1 Hora	30 Minutos

Tabla 1. Características de estaciones de carga. [5]

AC: Corriente alterna.
DC: Corriente directa.

Tiempo de recarga: Como se muestra en la tabla 1, el tiempo de carga de un vehículo eléctrico varía dependiendo el tipo de carga que se use.

Como se explica en [7] hay 4 modos de carga de vehículos eléctricos en los cuales se muestra como se conectan los VE a la red eléctrica, a qué tensión y corriente funcionan y qué tipo de dispositivos y conectores usan para poder conectarse a la red. Estos modos se pueden ver en la figura 1:

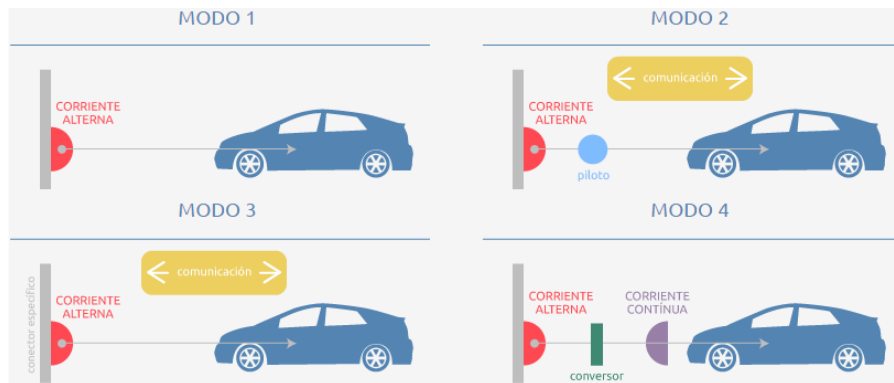


Figura 4. Modos de carga. Tomado de [6].

Las estaciones de carga deben cumplir con ciertas normativas, las cuales son:

- Modos de carga (IEC-61851-1)
- Cargadores de baterías para vehículos eléctricos (RETIE Art. 20.7). [10].
- Equipos para sistemas de carga de vehículos eléctricos - Sección 625 (NTC 2050). [14].

C. Centro de carga y su influencia en la red de distribución

Los centros de carga influyen demasiado en la red eléctrica debido a que estos inyectan grandes cantidades de contenido armónico (en ciertas horas específicas del día) en la red. En estos centros son varios los VE que se conectan y por ende mientras se están cargando los VE la calidad de la energía eléctrica se ve afectada y podrían suceder complicaciones como:

- Variaciones de tensión
- Parpadeos de lámparas
- Incremento de temperatura en conductores, máquinas rotativas y transformadores
- Mediciones erróneas en los equipos de medida

D. Comportamiento de la corriente en la red eléctrica

Como ya se ha mencionado, los centros de carga inyectan armónicos en la red eléctrica, estos a su vez alteran la calidad de la energía y esto crea complicaciones para tanto la red como para los usuarios finales que estén cerca al centro de carga. Esta inyección de armónicos hace que el comportamiento de la señal de corriente que entra a la red, en un intervalo de tiempo, tenga diferentes formas.

Se debe tener en cuenta que las baterías de los VE están diseñadas para trabajar con corriente DC, por tal motivo los cargadores de los VE tienen inversores y rectificadores en sus circuitos, los cuales se dedican a cambiar la señal AC a DC o DC a AC. Este funcionamiento es el culpable de que se generen armónicos, que a su vez se devuelven a la red; estos armónicos se generan debido a la conmutación de los diodos de los inversores [7].

Como se puede ver en la figura 5 y en la figura 6, los VE pueden tener dos tipos de rectificadores, que como ya se mencionó anteriormente, su funcionamiento hace que la corriente de entrada tenga un comportamiento que puede ser pulsante. Un ejemplo de cómo es el comportamiento de la corriente que se introduce en la red se puede ver en la figura 4.

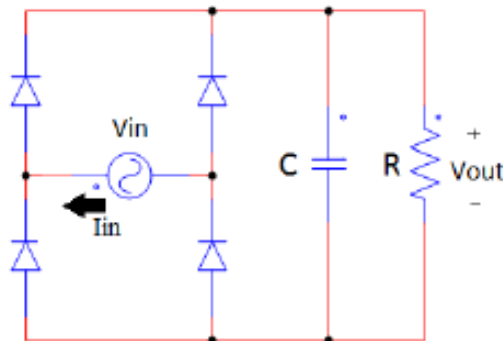


Figura 5. Rectificador en puente en un cargador de VE [7].

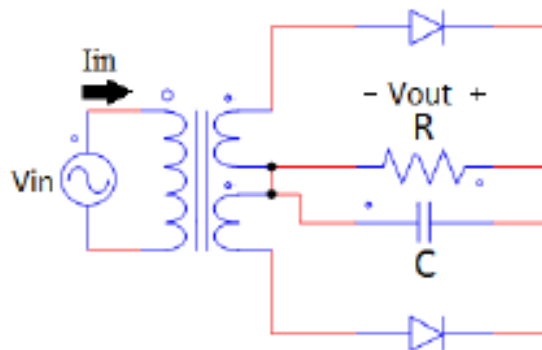


Figura 6. Rectificador con toma central en un cargador de VE [7].

Para los circuitos presentados en las figuras 5 y 6 se definen los siguientes parámetros:

Valor	Significado
V _{in}	Voltaje de entrada al circuito rectificador.
V _{out}	Voltaje de salida en la carga conectada.
I _{in}	Corriente de entrada al circuito rectificador.
C	Filtro por condensador.
Diodo	Diodo rectificador.
Transformador con toma central	Permite obtener la mitad del voltaje del transformador.

Tabla 2. Componentes de los circuitos expresados en las figuras 5 y 6. Elaboración propia.

Los parámetros expresados en la tabla 2 muestran los componentes más comunes que se ven en rectificadores y/o inversores y estos son los encargados de pasar las señales DC a AC y AC a DC.



Figura.7 Comportamiento de la corriente producida por un cargador eléctrico. [7]

La figura 7 muestra como puede ser el comportamiento de la señal de corriente de entrada en un intervalo de tiempo. En este caso la señal de corriente tiene un comportamiento pulsante [6]. Este comportamiento pulsante introduce contenido armónico en la red.

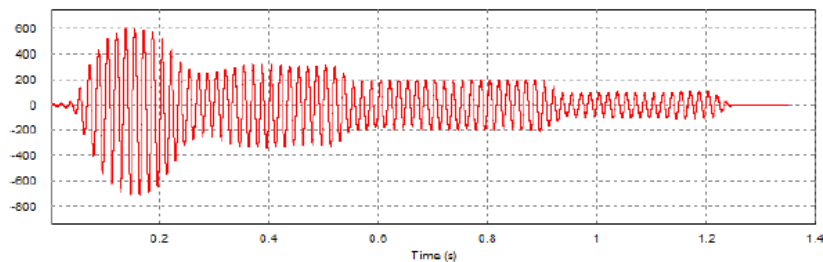


Figura 8. Comportamiento de la corriente debido a un centro de carga [7]

En la figura 8 se observa cómo se puede comportar la corriente eléctrica cuando un centro de carga de VE entra en funcionamiento. Se puede observar en este caso que este comportamiento tiene valores muy altos de corriente que pueden ser peligrosos para una

carga pero que van disminuyendo, después conforme pasa el tiempo, alcanzando a durar poco más de 1 segundo.

Antes de proceder a mostrar qué circuitos pueden generar e inyectar armónicos en la red, se quiere mostrar como una fuente de armónicos que se llegue a instalar en un nodo de un circuito en BT puede alterar el comportamiento de los usuarios en el mismo.

Por tal motivo se diseñó un circuito tomando en cuenta parámetros de la vida real los cuales son la potencia instalada que requiere un usuario común, la configuración de las estructuras para circuitos eléctricos en BT y la topología del circuito.

IV. Carga usuario final

La preocupación por el medio ambiente ha generado nuevos paradigmas y nuevas preocupaciones por el uso de los hidrocarburos que generan más daño. Es por esta razón que el aumento del uso de carros eléctricos en todo el mundo ha aumentado. Pero este gran aumento debe venir de la mano con los sistemas de distribución tradicionales ya que los centros de carga se encuentran conectados al sistema de distribución tradicional y es por esta razón que se debe tener en cuenta a los usuarios finales. Los usuarios finales son las personas a las cual va destinado un servicio o producto habiendo superado ciertas etapas de desarrollo [10]. La energía es un bien común y esencial, el cual es indispensable en todas las actividades cotidianas. Los usuarios finales son aquellos que están más expuestos a anomalías y fallas en la red. Es por tal motivo que se debe garantizar que el servicio de energía sea el adecuado y el más óptimo. Los centros de carga vehicular son aquellos que generan una gran cantidad de armónicos por el gran contenido de componentes electrónicos que tienen estos vehículos eléctricos [8].

A. Información del usuario final

Según la CREG [9], los usuarios finales se toman como usuarios regulados, siendo en este caso personas naturales los cuales son: usuarios residenciales que se clasifican según el estrato socioeconómico y su capacidad de consumo; los usuarios comerciales de pequeñas empresas; locales, bares y lugares de entretenimiento y los oficiales del estado.

Para este caso los usuarios finales tienen una potencia instalada entre 2 y 9 kVA. En cada nodo del sistema de distribución se instaló el generador de armónicos para poder observar la distorsión armónica que produce este último.

La carga a estudiar es la de un usuario común que está ubicado en uno de los extremos del sistema de distribución diseñado, y está alejado del transformador que distribuye energía al sistema. La carga de este usuario es de 6 kVA y cuenta con una tensión de alimentación de 208 V.

B. Cargas susceptibles a la inyección de armónicos

Existen gran cantidad de cargas que son susceptibles a los armónicos en un circuito de distribución, se mencionan algunas:

- Transformadores
- Electrodomésticos de uso diario (televisores, computadores, lavadoras, entre otros)
- UPS

C. Red de distribución en baja tensión

Como se mencionó anteriormente se quiere tener un buen entendimiento de cómo afectan los armónicos a los usuarios, por tal motivo se diseñó un circuito de una red de distribución en baja tensión con el cual, por medio de una fuente de armónicos, se quiso evidenciar en cómo esta fuente puede alterar el comportamiento de la red y los usuarios en el nodo donde esté instalada esta fuente. Se debe tener en cuenta que el generador de armónicos tiene los parámetros de un cargador de vehículos eléctricos cuando está en funcionamiento ya sea un usuario que tiene un vehículo eléctrico o sea un centro de carga de vehículos eléctricos.

Las características que tiene el circuito de distribución bajo estudio son: Un transformador de 112,5 kVA en el cual, según el RETIE en el artículo 24.3 [10] su estado de carga no supera su capacidad nominal y será el que se usará para realizar la distribución en BT. También se tendrá un circuito de baja tensión compuesto por estructuras tipo LAR 306 (Codensa) [11] y estructuras tipo AE217 (Codensa) [11]; esto debido a que en el circuito hay cargas trifásicas y monofásicas respectivamente.

El tipo de circuito AE217 se escoge debido a que este tipo de circuitos son comunes en las ciudades, porque su configuración permite suministrar cargas para manejo de maquinaria industrial y grandes comercios, así mismo en uso residencial se recomienda donde existen circuitos resistivos (resulta más económico) o algunos equipos sanitarios, en vivienda multifamiliar se utiliza esta configuración, en especial para zonas comunes.

El tipo de circuito LAR 306 se utiliza especialmente en las zonas periféricas de las ciudades, en especial para viviendas y pequeños comercios (locales), también se encuentra comúnmente en las zonas rurales donde la mayoría de viviendas solo requieren servicio de iluminación y tomacorrientes de bajo voltaje y el consumo no supera los 5 kVA.

En las figuras 9 y 10 se muestra en detalle la forma de cada tipo de circuito.

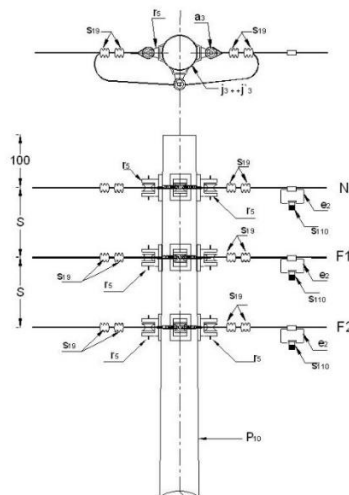


Figura 9. Circuito LAR306 de estructura para baja tensión. [9]

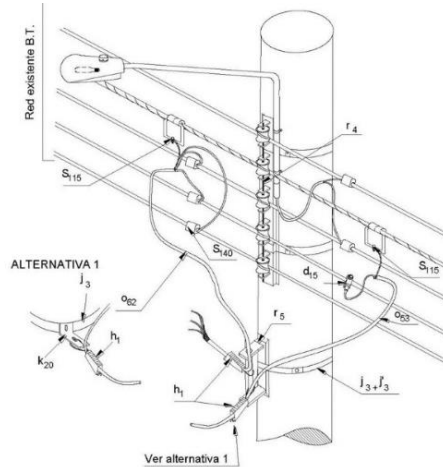


Figura 10. Circuito AE217 de estructura para baja tensión. [10]

El circuito se modeló en el software de NEPLAN, tiene 12 nodos en los cuales hay usuarios conectados. El nodo que se estudia para este caso es el nodo 8, en el cual se coloca la fuente de armónicos y luego se irá variando de posición para ver cómo va cambiando el comportamiento de los indicadores de porcentaje de distorsión en ese nodo. Estas variaciones de posición se realizan teniendo en cuenta que el generador de armónicos funciona como si fuera un cargador de vehículos eléctricos con modos de carga lento y rápido.

En la figura 11 se muestra el circuito en baja tensión diseñado.

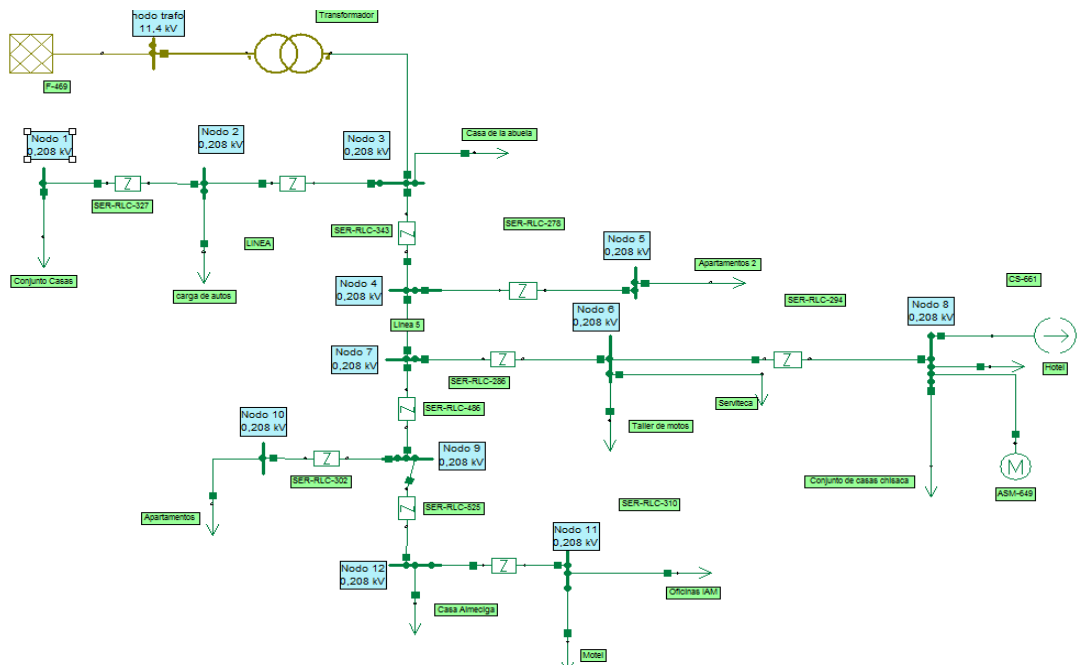


Figura 11. Circuito en baja tensión para evaluación de impacto de armónicos. Elaboración propia.

En la figura 11 se muestra, de manera esquemática, la fuente usada para inyectar armónicos en el sistema diseñado.

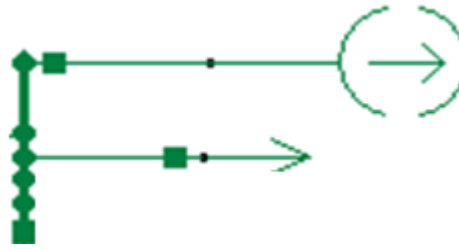


Figura 12. Nodo 8 y fuente de armónicos. Elaboración propia.

La fuente mostrada en la figura 12 tiene las características de carga para vehículos Nissan Leaf en carga lenta y rápida [13].

D. Ubicación del generador de armónicos en los diferentes nodos

El nodo bajo estudio es el nodo 8. Lo que se hace es simular la conexión del generador de armónicos directamente en este nodo para poder observar como varía el voltaje en este nodo y cuánta es la distorsión en el mismo. Posteriormente se moverá el generador a diferentes nodos para poder ver como aumenta o disminuye el THD y la tensión en cada uno.

Para las diferentes simulaciones se tomaron en cuenta los valores de corrientes en carga lenta y rápida establecidos en la tabla 1. Por otro lado, se tomaron como referencia los valores de espectros de corrientes del vehículo NISSAN LEAF [13].

En las tablas 3 y 4 se muestran los contenidos armónicos en corriente del vehículo eléctrico Nissan Leaf. Estos valores son lo que se usan para poder simular un cargador de vehículo eléctrico en NEPLAN.

	Frecuencia (Hz)	Corriente (A)	Desfase (°)
1	180	8	-25
2	300	5,44	-17
3	420	4,54	-14,2
4	540	3,11	-9,69

Tabla 3. Contenido armónico de corriente del Nissan Leaf en carga rápida.

	Frecuencia (Hz)	Corriente (A)	Desfase (°)
1	180	6,98	0
2	300	3,33	0
3	420	0,28	0
4	540	1,17	0

Tabla 4. Contenido armónico de corriente del Nissan Leaf en carga lenta.

E. Casos de estudio

Se han escogido 2 casos de estudio en los cuales el generador de armónicos funciona a baja y alta capacidad. Dichas capacidades son carga rápida y carga lenta. Para los 2 casos de estudio se simulan 6 escenarios. De esos 6 escenarios, los primeros 3 son para carga lenta y los 3 últimos escenarios son para rápida. Para los escenarios de carga lenta y carga rápida se tomaron los siguientes parámetros:

Carga lenta: 16 A.

Carga Rápida: 32 A.

Capacidad de corto: 100 MVA y 50 MVA.

Potencia del transformador: 112,5 kVA y 45 kVA.

➤ Escenario 1

En este escenario el cargador de VE está funcionando a carga lenta y con una capacidad de corto (cc) de 100 MVA entre la red MT y el transformador. La potencia (S) de del transformador es de 112,5 kVA.

Ubicación generador armónicos	THD en barra 8 [%]
Barra 8	0,87
Barra 5	0,46
Barra 6	0,66
Barra 11	0,46
Barra 1	0,28

Tabla 5. Variación del THD en nodo 8, según ubicación de generador de armónicos, escenario 1.

➤ Escenario 2

En este escenario el cargador de VE está a carga lenta y la capacidad de corto circuito sigue siendo de 100 MVA. En este escenario la potencia del transformador es de 45kVA.

Ubicación generador armónicos	THD en barra 8 [%]
Barra 8	1,25
Barra 5	0,86
Barra 6	1,05
Barra 11	0,86
Barra 1	0,68

Tabla 6. Variación del THD en nodo 8, según ubicación de generador de armónicos, escenario 2.

➤ Escenario 3

Para este escenario, el cargador de VE está funcionando con carga lenta, con la diferencia que la capacidad de corto en esta ocasión es de 50 MVA; el transformador tiene una potencia de 112,5 kVA.

Ubicación generador armónicos	THD en barra 8 [%]
Barra 8	0,86
Barra 5	0,47
Barra 6	0,67
Barra 11	0,47
Barra 1	0,28

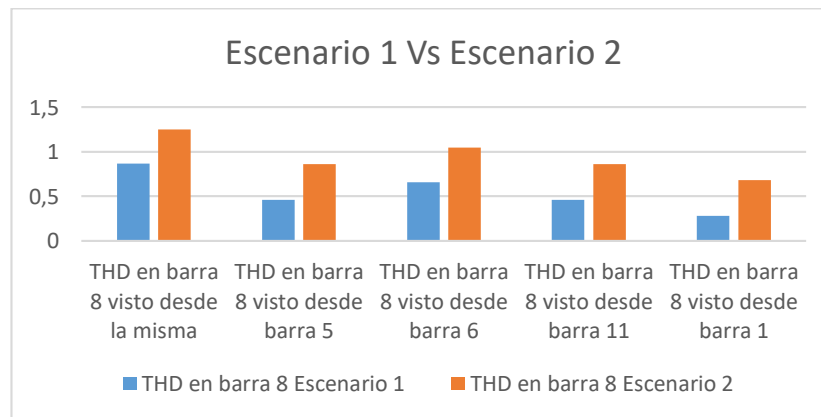
Tabla 7. Variación del THD en nodo 8, según ubicación de generador de armónicos, escenario 3.

- Comparación de resultados de los primeros 3 escenarios

➤ Escenario 1 VS Escenario 2

Para estos dos escenarios se tienen en cuenta las siguientes características:

- Escenario 1: Capacidad de corto de 100 MVA y transformador de 112,5 kVA.
- Escenario 2: Capacidad de corto de 100 MVA y transformador de 45 kVA.



Gráfica 1. Comparación de porcentajes totales de distorsión de los escenarios 1 y 2. Elaboración propia.

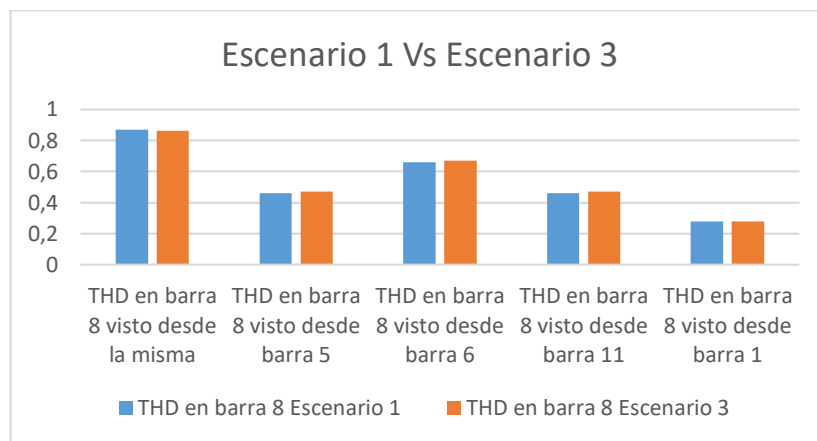
Como se puede evidenciar en la gráfica 1, se hace una comparación de como varía el THD en la barra 8 cuando se ubica el generador de armónicos en varios de los distintos nodos y/o barras que hay en el sistema. Se puede evidenciar que en todos los casos el THD es más alto en el escenario 2.

Esto se debe a que, aunque la capacidad de corto circuito en ambos escenarios es la misma, la capacidad del transformador en el escenario 2 es menor. En otras palabras, el transformador del escenario 2 es muy pequeño y debido a esto es un transformador que es muy frágil ante cualquier perturbación que pueda pasar.

➤ Escenario 1 Vs Escenario 3

Para estos dos escenarios se tienen en cuenta las siguientes características:

- Escenario 1: Capacidad de corto de 100 MVA y transformador de 112,5 kVA.
- Escenario 3: Capacidad de corto de 50 MVA y transformador de 112,5 kVA.



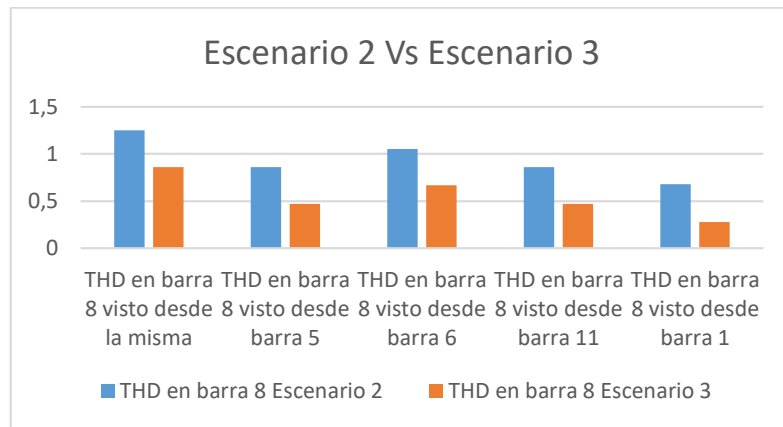
Gráfica 2. Comparación de porcentajes totales de distorsión de los escenarios 1 y 3.
Elaboración propia.

Como se ve en la gráfica 2, se puede evidenciar que en esta ocasión el THD es muy parecido en ambos escenarios; llegando a variar el THD en solo un dígito. Esto se debe a que, aunque la capacidad de corto en el escenario 3 es la mitad que en el escenario 1, el transformador es de la misma potencia. Se puede observar también como en ambos casos el transformador es de gran capacidad y a su vez de mayor capacidad, el THD no supera el 1%. Entre más capacidad tenga el transformador, más será resistente a perturbaciones que puedan suceder.

➤ Escenario 2 vs Escenario 3

Para estos dos escenarios se tienen en cuenta las siguientes características:

- Escenario 2: Capacidad de corto de 100 MVA y transformador de 45 kVA.
- Escenario 3: Capacidad de corto de 50 MVA y transformador de 112,5 kVA.



Gráfica 3. Comparación de porcentajes totales de distorsión de los escenarios 2 y 3.
Elaboración propia.

Se puede evidenciar, en la gráfica 3, que en el escenario 2 es más alto el THD de tensión que en el escenario 3. Esto se debe a que el transformador que está ubicado en el escenario 2 es frágil ante perturbaciones que puedan suceder.

- Para los siguientes 3 escenarios se toma el tipo de carga como carga rápida.

➤ Escenario 4

En este escenario, el cargador de VE está funcionando en carga rápida, la capacidad de corto vuelve a ser de 100 MVA y la potencia del transformador es de 112,5 kVA.

Ubicación generador armónicos	THD en barra 8 [%]
Barra 8	1,61
Barra 5	0,88
Barra 6	1,24
Barra 11	0,88
Barra 1	0,54

Tabla 8. Variación del THD en nodo 8, según ubicación de generador de armónicos, escenario 4.

➤ Escenario 5

En este escenario, el cargador de VE está funcionando en carga rápida, la capacidad de corto circuito es de 50 MVA y la potencia del transformador es de 112,5 kVA

Ubicación generador armónicos	THD en barra 8 [%]
Barra 8	1,62
Barra 5	0,89
Barra 6	1,25
Barra 11	0,89
Barra 1	0,54

Tabla 9. Variación del THD en nodo 8, según ubicación de generador de armónicos, escenario 5.

➤ Escenario 6

En este escenario, el cargador de VE está funcionando en carga rápida, la capacidad de corto es de 100 MVA y la potencia del transformador es de 45 kVA.

Ubicación generador armónicos	THD en barra 8 [%]
Barra 8	2,35
Barra 5	1,64
Barra 6	1,99
Barra 11	1,64
Barra 1	1,29

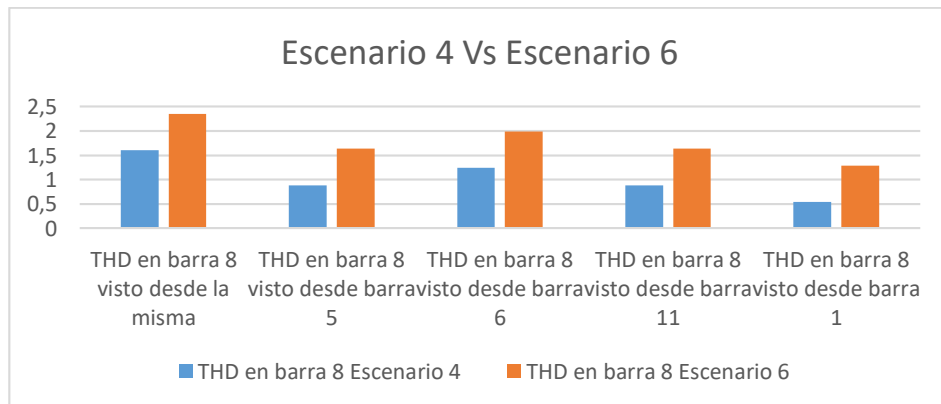
Tabla 10. Variación del THD en nodo 8, según ubicación de generador de armónicos, escenario 6.

- Comparación de resultados de los 3 últimos escenarios (escenarios con carga rápida).

➤ Escenario 4 Vs Escenario 6

Para estos dos escenarios se tienen en cuenta las siguientes características:

- Escenario 4: Capacidad de corto de 100 MVA y transformador de 112,5 kVA
- Escenario 6: Capacidad de corto de 100 MVA y transformador de 45 kVA.

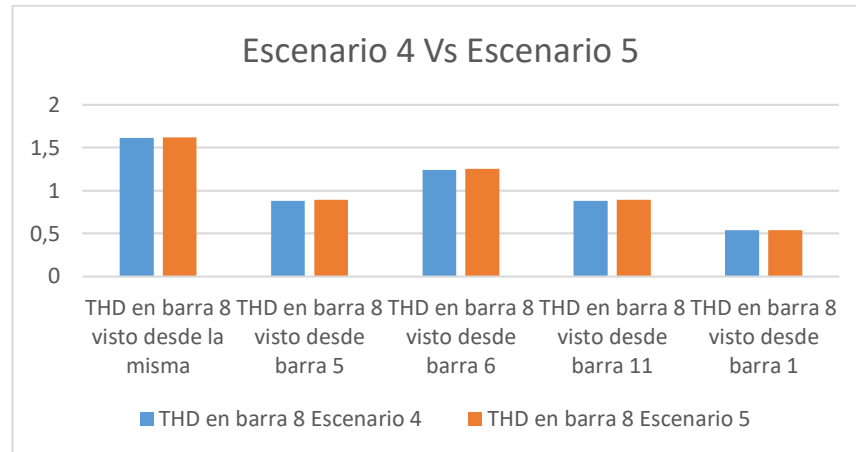


Grafica 4. Comparación de porcentajes totales de distorsión de los escenarios 4 y 6. Elaboración propia.

Se puede observar en la gráfica 4 que el THD del escenario 6 es mucho más alto que en el del escenario 4, esto es debido principalmente a que el transformador del escenario 6 tiene baja capacidad y por ende es un transformador pequeño. Por tal motivo es más frágil a perturbaciones.

➤ Escenario 4 Vs Escenario 5

- Escenario 4: Capacidad de corto de 100 MVA y transformador de 112,5 kVA
- Escenario 5: Capacidad de corto de 50 MVA y transformador de 112,5 kVA.

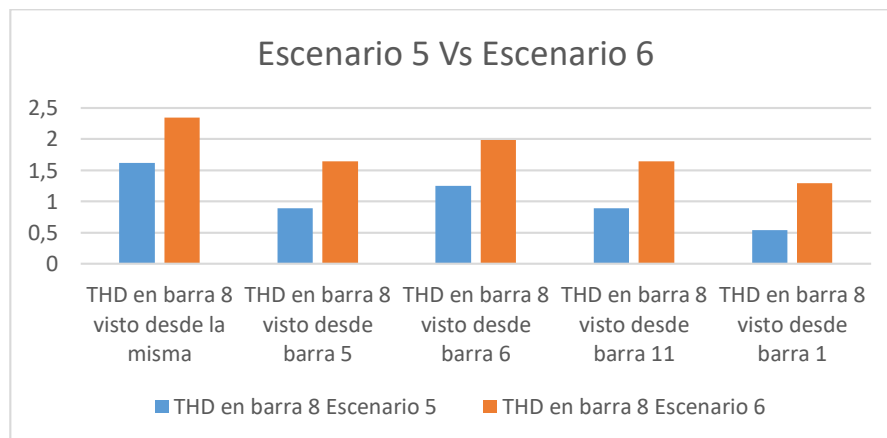


Grafica 5. Comparación de porcentajes totales de distorsión de los escenarios 4 y 5.
Elaboración propia.

Se puede evidenciar que en este caso el THD de tensión visto en estos dos escenarios es prácticamente el mismo. Esto es debido a que en ambos escenarios el transformador es de la misma capacidad. Debido a que la capacidad de corto en ambos escenarios no es la misma, el THD en ambos escenarios varía en un dígito.

➤ Escenario 5 Vs Escenario 6

- Escenario 5: Capacidad de corto de 50 MVA y transformador de 112,5 kVA
- Escenario 6: Capacidad de corto de 100 MVA y transformador de 45 kVA.



Grafica 6. Comparación de porcentajes totales de distorsión de los escenarios 6 y 5.
Elaboración propia.

En este escenario se puede evidenciar que el THD en el escenario 6 es más alto en comparación del escenario 5, esto se debe a que el transformador de ese escenario es de capacidad inferior.

De acuerdo a las gráficas 1 a 6 vistas y de las tablas 6, 7, 8, 12, 13 y 14, se puede deducir lo siguiente:

- Entre más se aleje el generador de armónicos, del nodo que se está estudiando, el THD en ese nodo disminuirá, pero aumentará en los nodos que queden próximos al generador.
- Se puede evidenciar que si el generador de armónicos es de carga rápida se producirá mayor distorsión armónica, esto debido a que se requiere más potencia, voltaje y corriente para poder cargar un VE en menos tiempo.
- Se evidencia que, si el transformador que alimenta el sistema de distribución es de menor capacidad, más frágil será ese sistema y más vulnerable será ante la presencia de armónicos.
- Se pudo ver que el sistema de potencia, siendo débil o robusto, afecta muy poco el incremento o decremento del THD y eso se puede evidenciar en las gráficas 1 a 6.

Los valores de porcentajes de distorsión de tensión se pueden observar en el anexo 1.

F. Electrodoméstico a estudiar

El electrodoméstico a estudiar es una lavadora, esto debido a que las lavadoras últimamente están siendo diseñadas con dispositivos electrónicos avanzados como micros controladores y tarjetas electrónicas que controlan su funcionamiento. Estos dispositivos son los más sensibles de los electrodomésticos puesto que es un componente muy delicado y funciona con valores de tensión y corriente bajos.

También están los condensadores, que si llegan a estar dañados pueden provocar que el motor de la lavadora no arranque y funcione mal. Estos son dispositivos sensibles que, si están expuestos a demasiada interferencia, dejarán de funcionar.

Por otro lado, están las bombas de agua de la lavadora. Estos componentes son los que más rápido se dañan por el constante trabajo que tienen; también son susceptibles al daño por inyección de armónicos.

Las lavadoras tienen un dispositivo llamado Filtro de red que es el encargado de enviar todo tipo de interferencias eléctricas, incluyendo interferencias generadas por armónicos a tierra, por tal motivo es necesario que las viviendas tengan conductor a tierra en la instalación eléctrica.

V. Diseño de los generadores de armónicos

Después de haber realizado las simulaciones en Neplan y ver cómo pueden afectar los armónicos a cualquier usuario, se procede a diseñar los 3 circuitos que pueden generar armónicos de corriente. Cada circuito está simulado en programas distintos, los cuales son:

- ORCAD
- Simulink
- Isis Proteus

A. Circuito #1

Circuito generador de armónicos diseñado en el software ORCAD. Este circuito se puede ver en la figura 13.

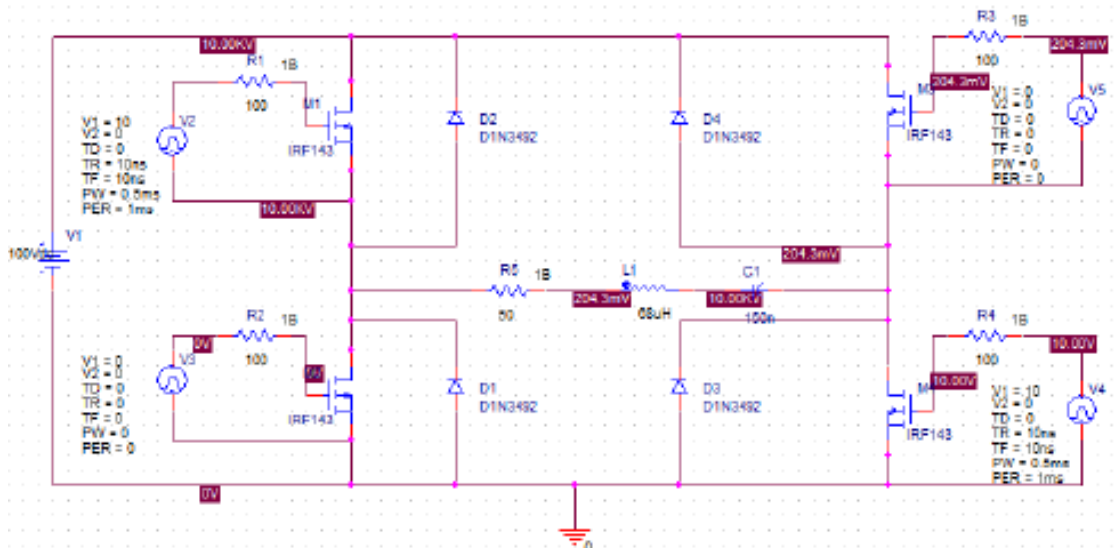


Fig. 13. Circuito generador de armónicos en el programa ORCAD. Elaboración propia.

Componente	Significado
V1	Fuente de tensión directa.
Pulsador (V2, V3 V4 Y V5)	Generador de señales pulsatorias cuadradas.
Diodo D1N3492	Diodo
Transistor IRF 143	Entrega una señal de salida en respuesta a una señal de entrada

Tabla 11. Características del circuito en el programa ORCAD.

En la figura 14 se muestra la señal de tensión vista en la carga del circuito, en un intervalo de tiempo. Se puede ver que la señal es de forma cuadrada con valores positivos.

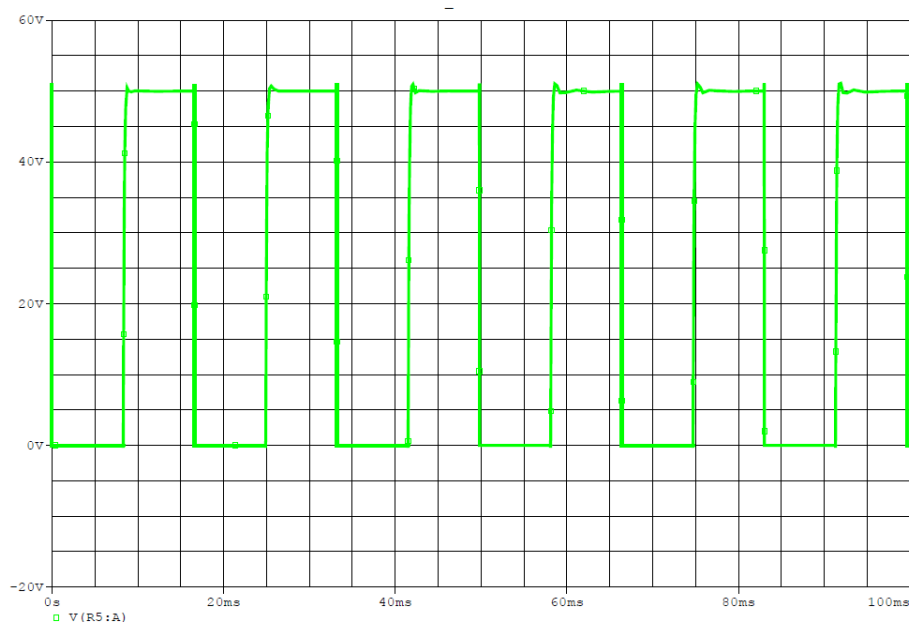


Fig. 14. Forma de onda de tensión de salida en la carga del circuito en el software ORCAD. Elaboración propia.

B. Circuito #2

Circuito generador de armónicos diseñado en el software Simulink, de MATLAB. Este circuito se puede observar en la figura 15.

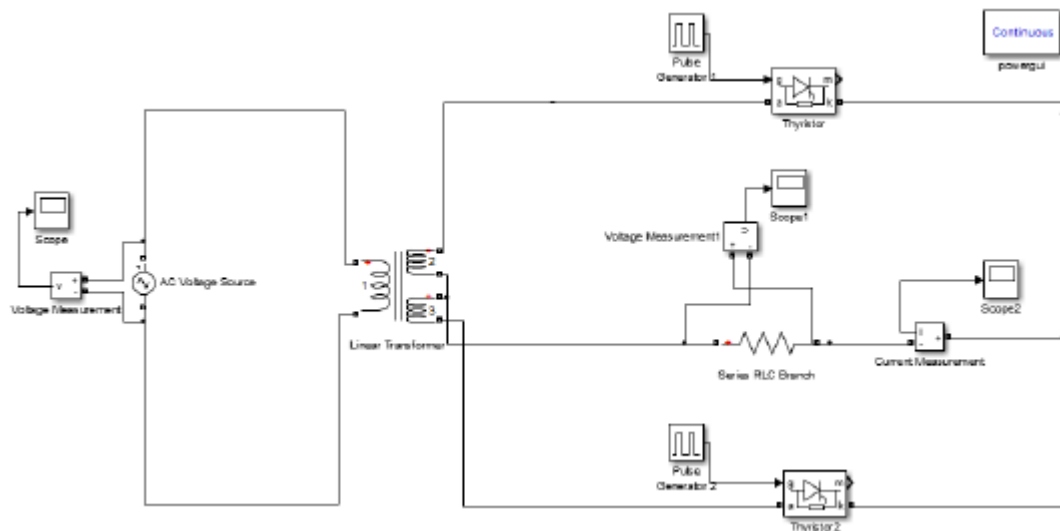


Figura 15. Circuito generador de armónicos en el software de Simulink. Elaboración propia.

Componente	Significado
Voltaje AC	Fuente de tensión alterna.
Generador de pulsos	Generador de señales pulsatorias cuadradas.
RLC	carga a afectar
Tiristor	Tiristores que conmutan la señal

Tabla 12. Características del circuito en el programa Simulink.

- Fuente de tensión
- Transformador
- Tiristores
- Pulsadores

El circuito mostrado en la Figura 16 se diferencia de los otros dos debido a que hace uso de un transformador. Con este circuito también se puede modificar el tiempo de disparo de los tiristores, pero no tiene las mismas posibilidades de disparo del circuito anterior.

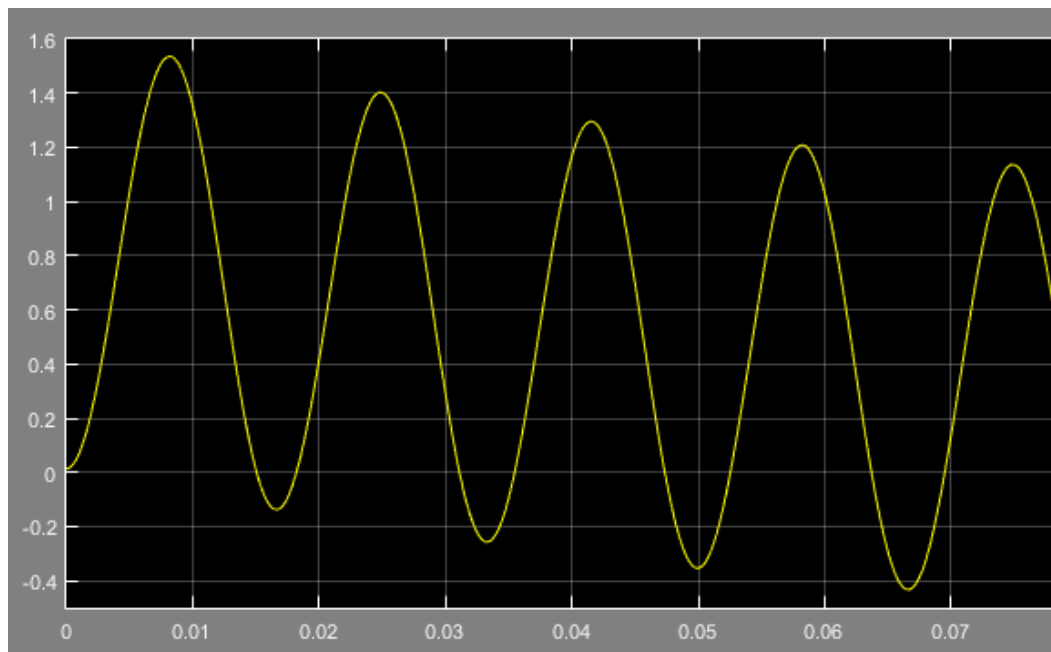


Fig. 16. Forma de onda de la tensión en el software de Simulink. Elaboración propia.

C. Circuito #3

Circuito generador de armónicos diseñado en el software PROTEUS. Este circuito tiene los siguientes componentes:

- Generadores de tensión con diferente amplitud y frecuencia distinta.
- Interruptores.
- Inductancia que se comporta como la carga final.
- Osciloscopio.

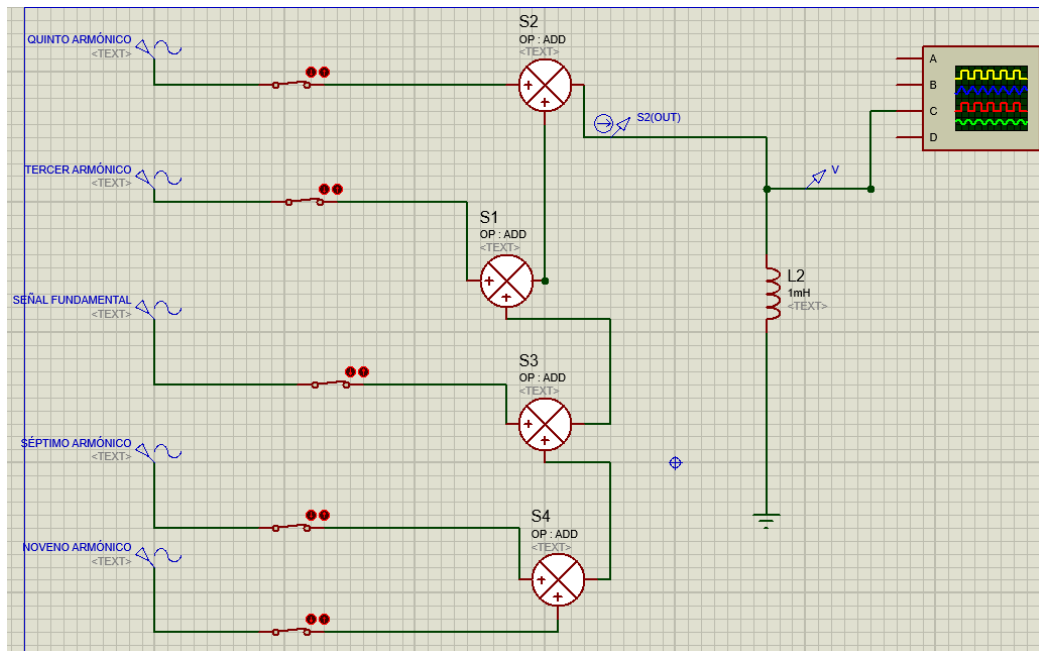


Fig.17 Circuito generador de armónicos en el software de Isis Proteus.
Fuente: Elaboración propia.

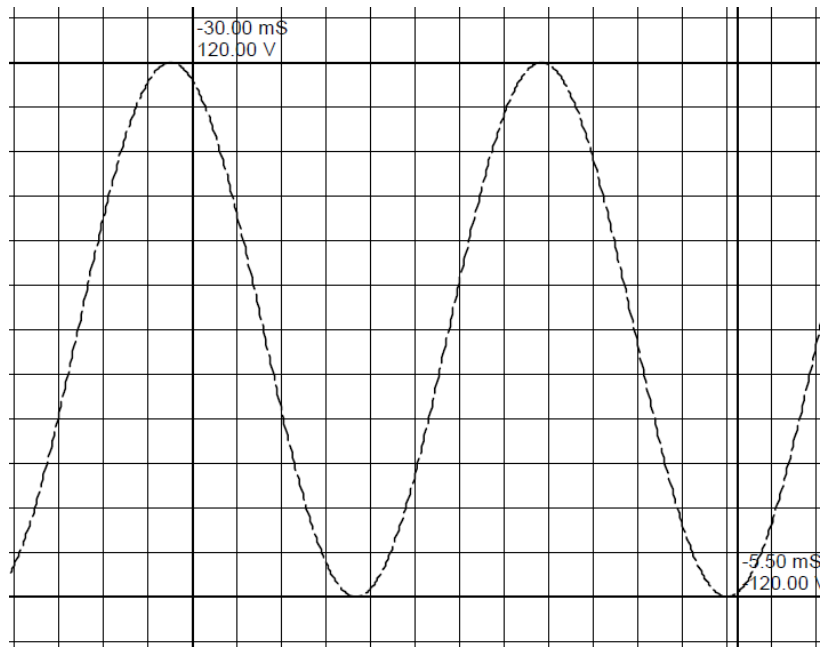


Fig.18 Forma de onda de la tensión sin contenido armónico en circuito del software de Proteus. Elaboración propia.

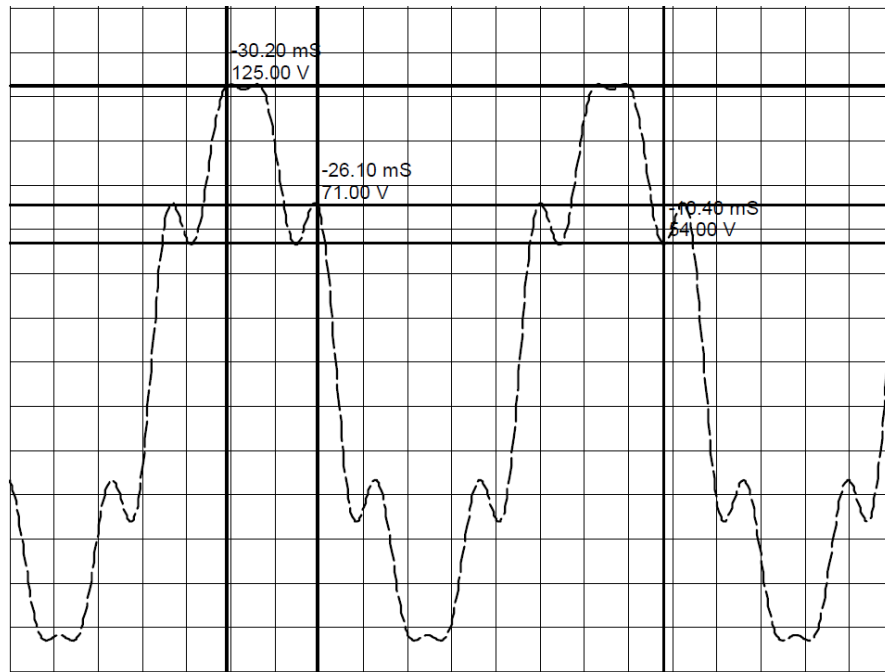


Fig.19. Forma de onda de la tensión con contenido armónico. Elaboración propia.

D. Diseño y selección de circuito generador de corrientes armónicas

Como se pudo ver en el numeral anterior, se presentaron 3 alternativas de circuitos para la inyección de corrientes armónicas, cada alternativa se simuló en un software distinto, esto se hizo con el fin de ver qué circuito y qué software presentaban más ventajas para poder simular.

Después de haber realizado las respectivas simulaciones con cada circuito, se optó por escoger el circuito realizado en el software ORCAD. Esta elección se hizo debido a que este software tiene una biblioteca muy amplia en componentes electrónicos y ofrece más variedad a la hora de editar las características de cada componente para poder observar distintos tipos de escenarios y resultados.

Para conformar el circuito se tomó en cuenta el capítulo 3 de este documento, el cual, menciona como los cargadores de vehículos eléctricos inyectan armónicos en la red eléctrica. Por tal motivo este circuito diseñado es un inversor monofásico, esto debido a que el inversor es el encargado de convertir la corriente continua que sale de la batería en la corriente alterna que necesita un motor para funcionar. También este circuito se diseña en base a un cargador de baterías eléctricas debido a que es una tecnología que está creciendo a nivel mundial y se debe tener en cuenta todo tipo de inconvenientes que pueda generar a la red ya existente.

Para el circuito anterior se diseñó con los componentes mencionados en la tabla 11. Los cuales se describen a continuación:

- Se usa una fuente de tensión constante para alimentar el circuito.
- Para la deformación de la señal se usan pulsadores.
- El Mosfet IRF143 se escogió debido a que este transistor es el encargado de conmutar y amplificar las señales producidas por los pulsadores. Por otro lado, se escogieron estos dispositivos porque soportan tensiones y corrientes altas, y están diseñados para aplicaciones que manejan alta potencia y conmutadores de alimentación [12].
- Se implementa el uso de diodos que sirven para garantizar protección al circuito.

Las actividades asociadas para la inyección de corrientes armónicas al sistema fueron las siguientes:

1. En primer lugar, se definió el valor de tensión de la fuente que alimenta el circuito, que es de 120 Vdc, este valor de tensión se seleccionó debido a que se quería trabajar con valores próximos a la realidad.
2. El circuito se diseñó conectando los Mosfets en forma de puente h o puente completo, esto se puede observar en la figura 10.
3. Se conectó 1 diodo en paralelo a cada Mosfet, la función de estos diodos es la de proteger contra inversiones de polaridad no deseadas que se pudieran presentar en la conmutación de los Mosfets.

- Posterior a eso para cada Mosfet se le conectaron en paralelo 1 pulsador, la función de estos es la generar un pulso que pueda deformar la onda de salida. Por último, se conectó la carga.

E. Simulaciones respectivas con circuito seleccionado

El circuito seleccionado para poder observar bien los armónicos, es el diseñado en ORCAD. Debido a que se tienen más alternativas para generar armónicos.

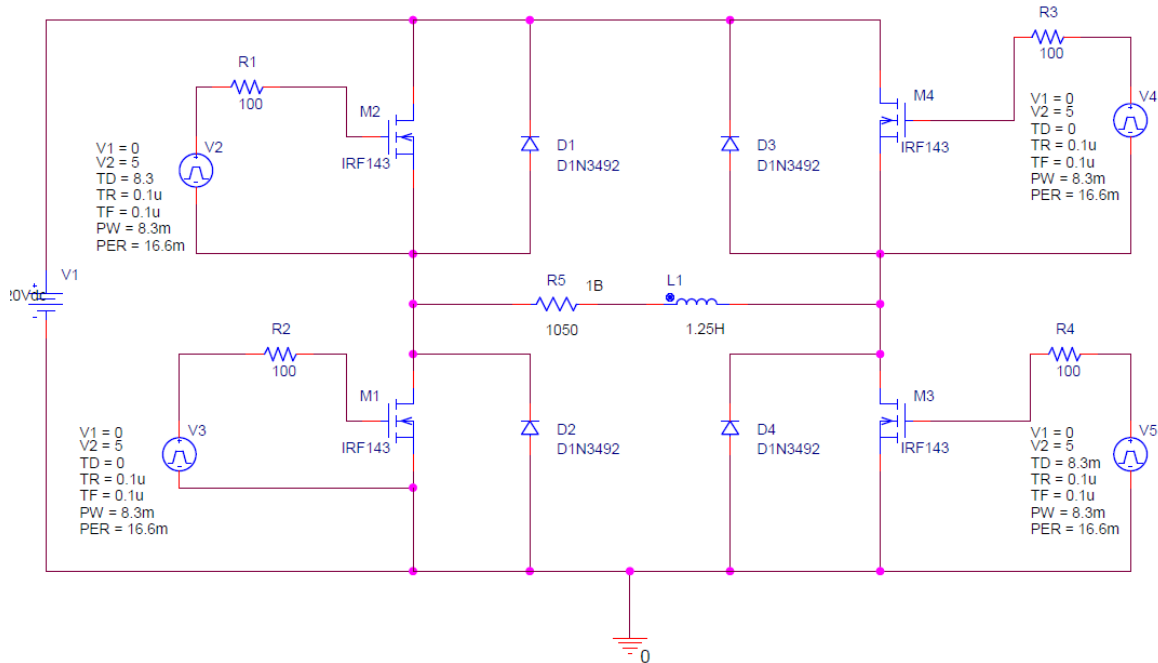


Fig.20 Circuito Orcad seleccionado para simulaciones. Elaboración propia.

Los parámetros de los pulsos usados en el circuito son:

Valor inicial (V1): 0V
 Valor pulsado (V2): 5V
 Tiempo de retraso (TD): 8.3seg.
 Tiempo de levante (TR): 0.7us
 Tiempo de caída (TF): 0.1us
 Ancho de pulso (PW): 8.3ms
 Periodo: 16.6ms

Se tomó un valor de voltaje directo de 120V. La carga consiste en una resistencia de 1050 Ohm en serie con una inductancia de 1,25H. Estos valores fueron obtenidos a partir de unas mediciones realizadas en un taller de reparación de electrodomésticos.

La señal de tensión de entrada es de 120V constante, esta es la tensión con la que se alimenta el circuito para posteriores análisis.

A partir de esa tensión de entrada se propone observar como es el comportamiento de la señal de corriente de entrada; este comportamiento se puede ver en la figura 21.

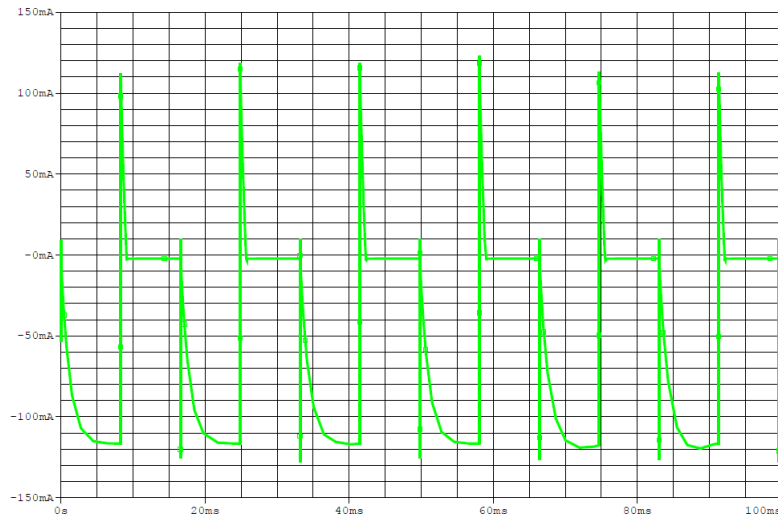


Fig.21 Corriente de entrada en inversor con circuito seleccionado. Elaboración propia.

Como se puede ver en la figura 21, la corriente de entrada tiene un comportamiento pulsante. Estas pulsaciones o deformaciones en la señal de la corriente se deben a la conmutación de los diodos y de los tiristores que componen el circuito. El comportamiento de la corriente puede tener otro tipo de forma según como estén ajustados los parámetros de cada componente. Por otro lado, la forma de onda de la corriente también puede verse afectada según el tipo de carga que esté conectada al circuito.

Estas pulsaciones son las que introducen gran contenido de armónicos en la corriente de cualquier red eléctrica.

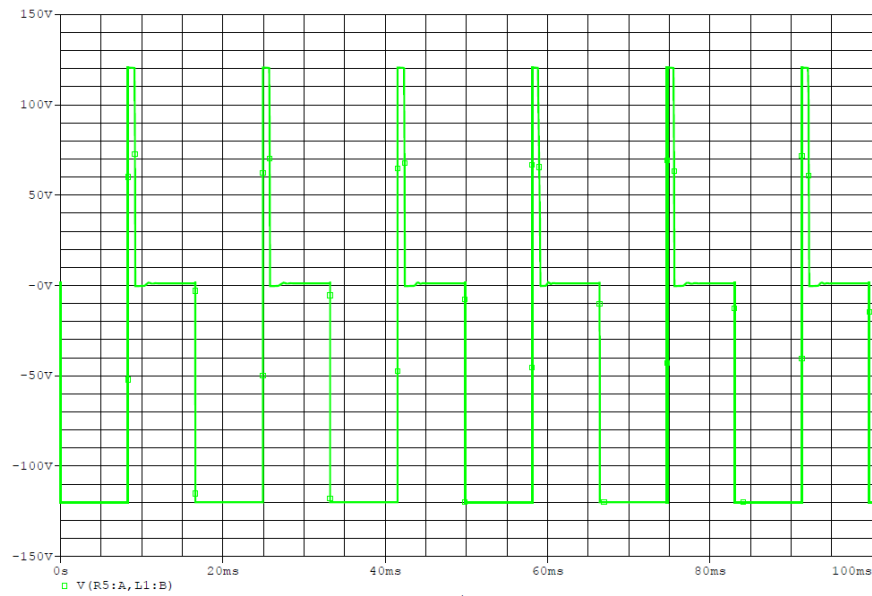


Fig.22 Tensión en la carga con circuito seleccionado. Elaboración propia.

En la figura 22 se puede ver el comportamiento de la tensión. La forma de la señal también puede variar según la carga conectada.

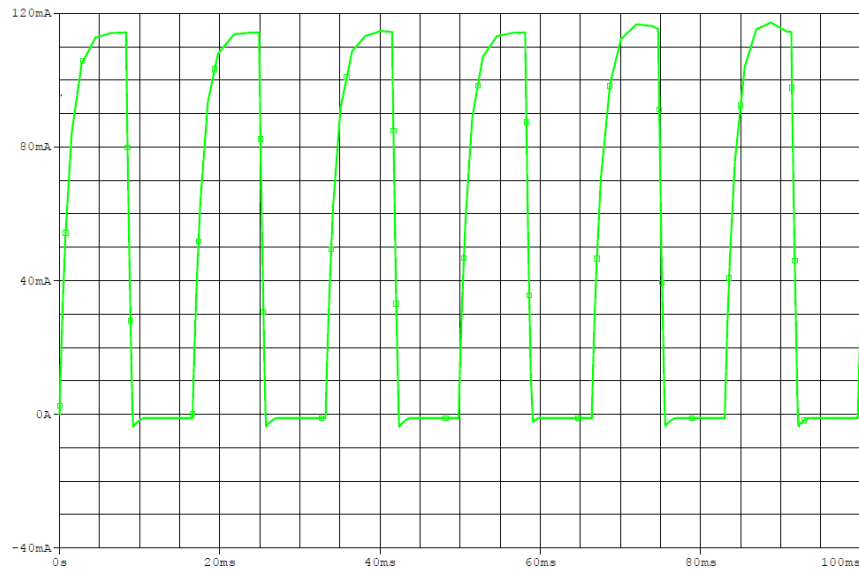


Fig.23 Forma de onda de la corriente vista en la carga con circuito seleccionado. Elaboración propia.

Las figuras 22 y 23 muestran las amplitudes de los primeros 20 armónicos. Se puede observar que tanto para los armónicos de tensión como de corriente, el tercer armónico es el que presenta mayor amplitud.

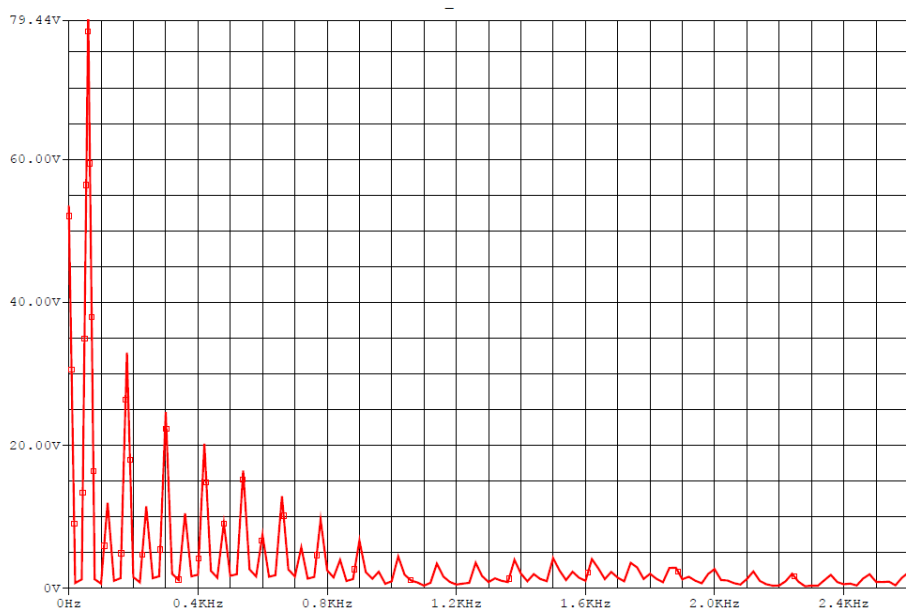


Fig.24 Espectro de amplitudes de armónicos de tensión en la carga con circuito seleccionado. Elaboración propia.

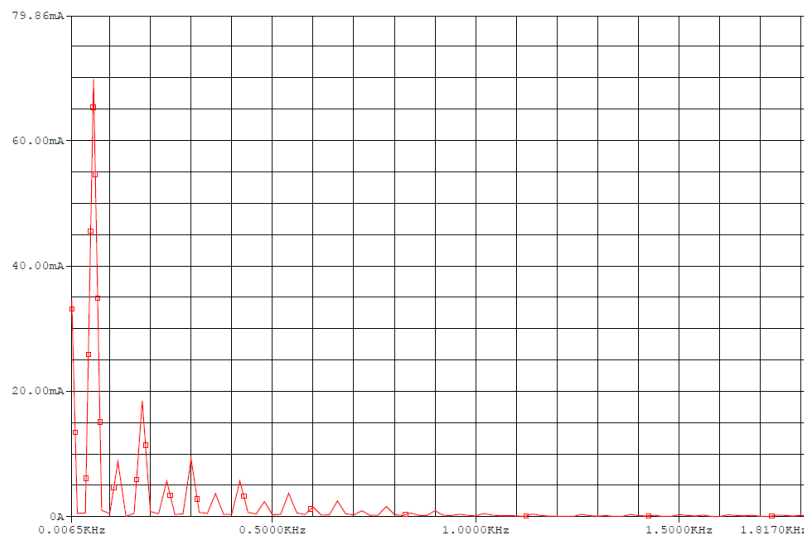


Fig.25 Espectro de amplitudes de armónicos de corriente en la carga con circuito seleccionado. Elaboración propia.

F. Comportamiento de la carga con inyección de armónicos

Para observar como es el comportamiento de la carga ante la inyección de armónicos, se varían los estados de los pulsadores, es decir, prender y apagar cada uno para observar cómo puede cambiar la señal de corriente. Además de cómo es la amplitud de los armónicos.

Para poder observar esto, se simulan 7 escenarios donde se activan los pulsadores de varias formas, con estos cambios se pueden observar los cambios en la señal de entrada de la corriente y la señal en la carga, también se puede ver cómo cambian los armónicos.

➤ Escenario 1:

Para este caso solo se usa un pulsador para observar como es la corriente en la carga cuando solo hay un pulsador presionado. El pulsador activado se puede ver en la figura 26.

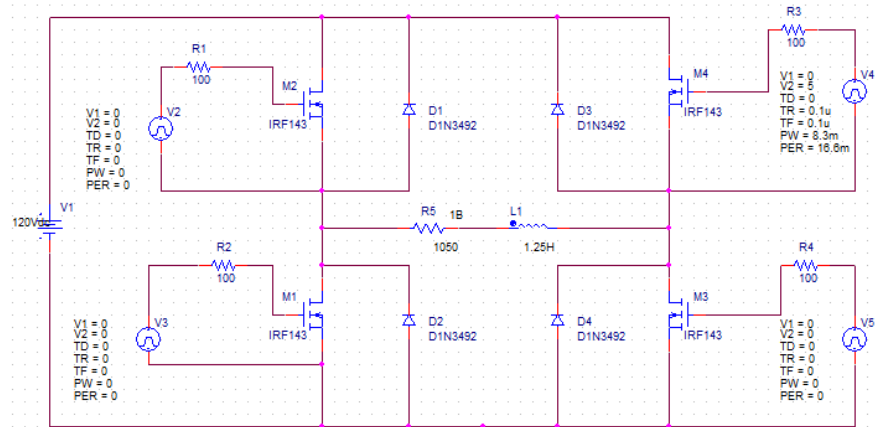


Fig.26 Circuito con pulsador V4 activado. Elaboración propia.

Al ejecutar la simulación se puede observar la forma de la corriente de entrada al circuito. Como se mencionó anteriormente, la señal toma esta forma de acuerdo al modo de operación de los diodos y tiristores que componen el circuito, además que en este caso solo hay un pulsador activado. Se puede ver que la corriente de entrada es muy pequeña, pero tiene unos picos cada 17 microsegundos. Estos picos en la señal son los que introducen gran contenido de armónicos, como se pueden ver en la figura 27.

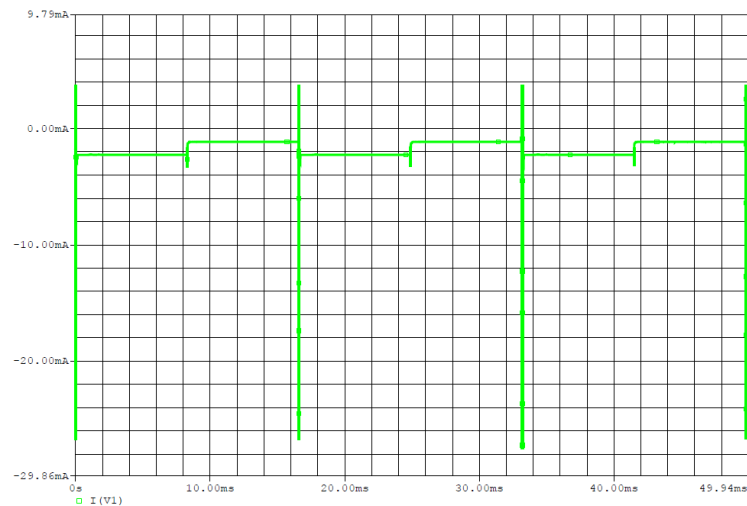


Fig.27 Corriente de entrada al circuito. Elaboración propia.

Posterior a observar la corriente de entrada al circuito, se procede a ver como es la onda de corriente en la carga, fig. 28. Se puede ver una señal cuadrada, con baja amplitud, pero también con unos picos que, aunque no tienen una amplitud significativa, pueden ser nocivos para la carga que se está alimentando.

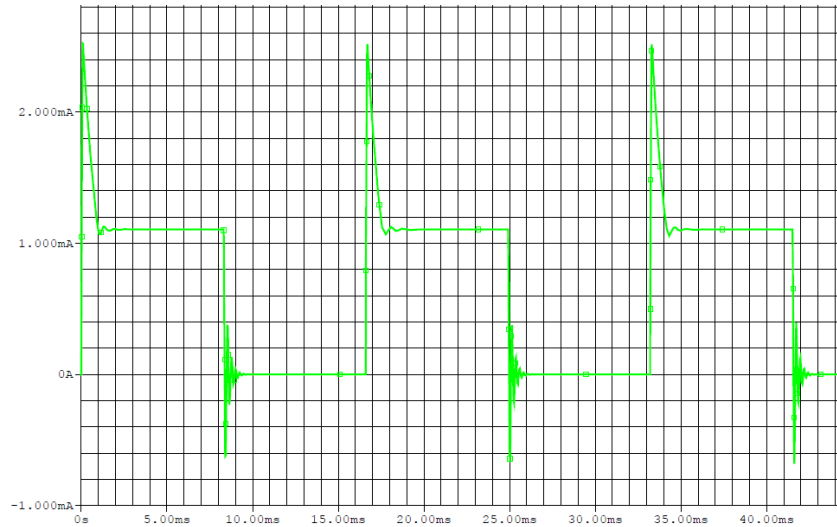


Fig.28 Señal de corriente en la carga. Elaboración propia.

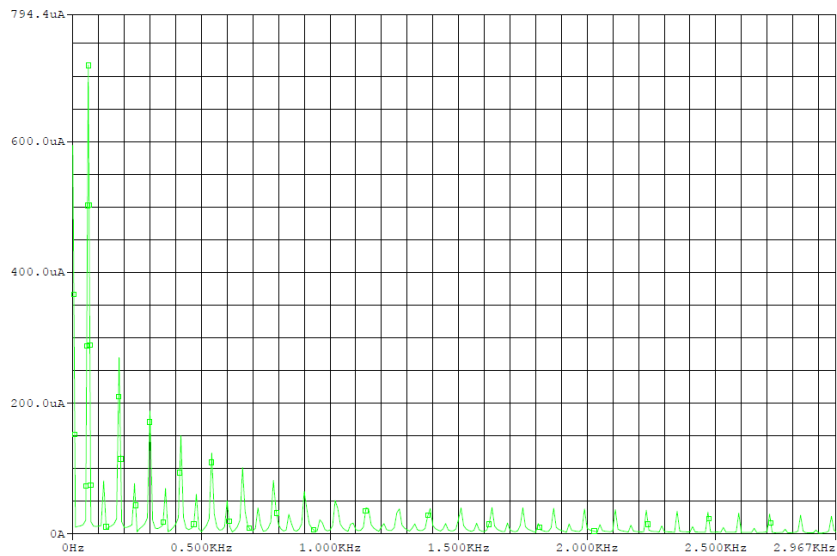


Fig.29 Espectro de amplitud de armónicos vistos en la carga. Elaboración propia.

Se puede evidenciar que los de frecuencias más bajas son los de mayor amplitud y los que más peligroso resultan para la carga.

➤ Escenario 2

Para este escenario, se realiza el mismo procedimiento, pero con la diferencia que ahora son dos pulsadores activos, los cuales se observan en la figura 30 y son los pulsadores V2 y V3.

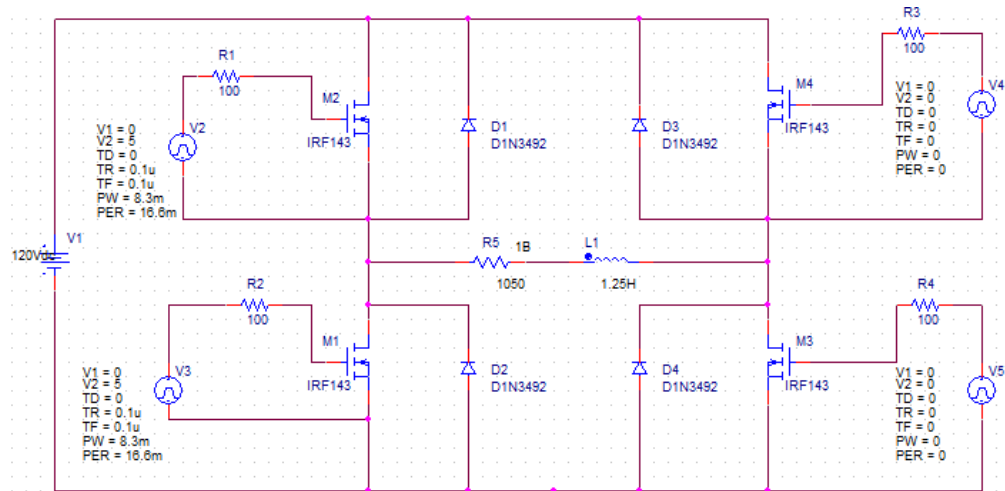


Fig.30 Circuito con pulsadores V2 y V3 activos. Elaboración propia.

Como se puede observar en la figura 31, la señal de corriente tiene una forma cuadrada, sin picos, pero con valores negativos. Este comportamiento se debe a que ahora son dos pulsadores los que están activos al mismo tiempo.

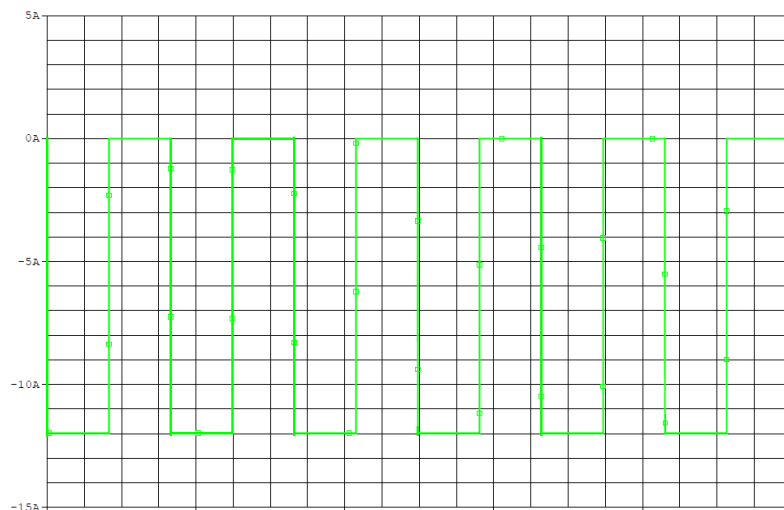


Fig.31 Corriente de entrada al circuito. Elaboración propia.

Al momento de realizar la simulación del comportamiento de la corriente en la carga, se pudo observar que la corriente tenía un comportamiento con muchas deformaciones. Este tipo de deformaciones pueden llegar a provocar que los elementos de un circuito no funcionen de manera adecuada y puedan dañarse. Se puede observar el comportamiento de la corriente en la carga en la figura 31.

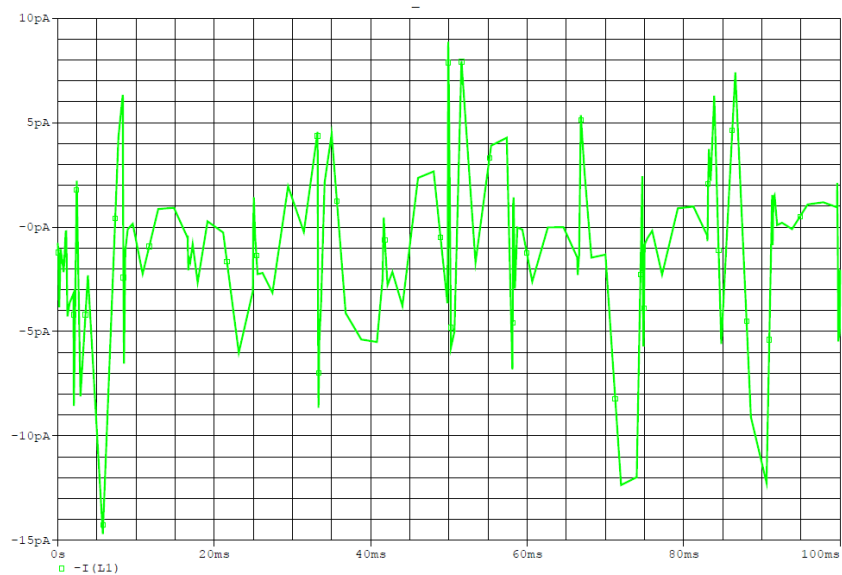


Fig.32 Señal de corriente en la carga. Elaboración propia.

En la fig. 32. se puede observar el espectro de amplitudes de los armónicos en la carga. Se puede evidenciar que, aunque tienen muy baja amplitud, pueden llegar a alterar el funcionamiento de la carga.

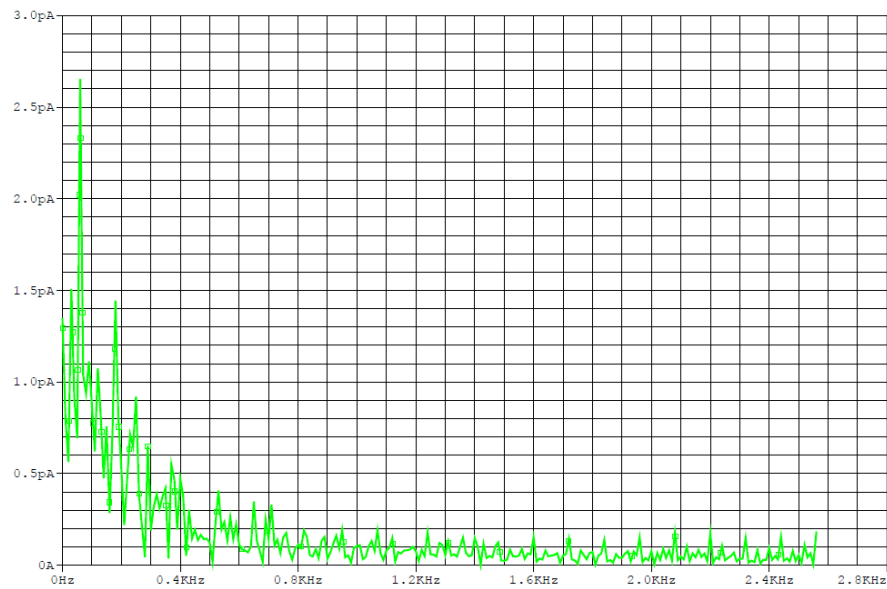


Fig.33 Espectro de amplitud de armónicos de corriente en la carga. Elaboración propia.

Se puede observar en la figura 33 que el espectro de armónicos tiene mucho ruido, esto se debe a que son solo dos pulsadores los que están activos.

➤ Escenario 3

Para este escenario, se realiza el mismo procedimiento, pero con la diferencia que ahora los dos pulsadores activos son los pulsadores V4 y V5, los cuales se observan en la figura 34.

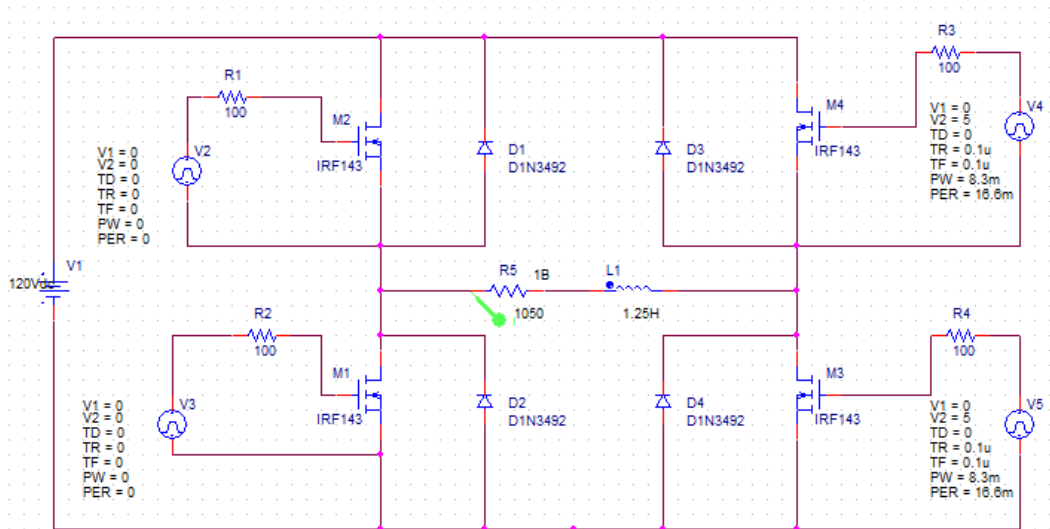


Fig.34 Circuito con pulsadores V4 y V5 activados. Elaboración propia.

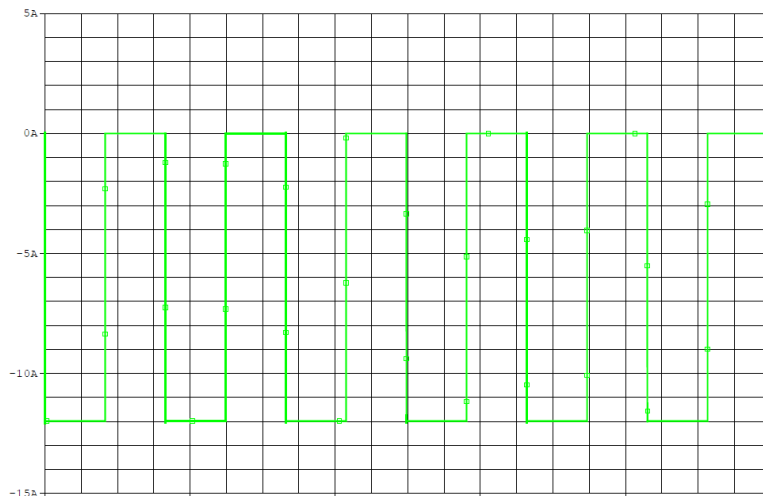


Fig.35 Corriente de entrada al circuito en el escenario de simulación. Elaboración propia.

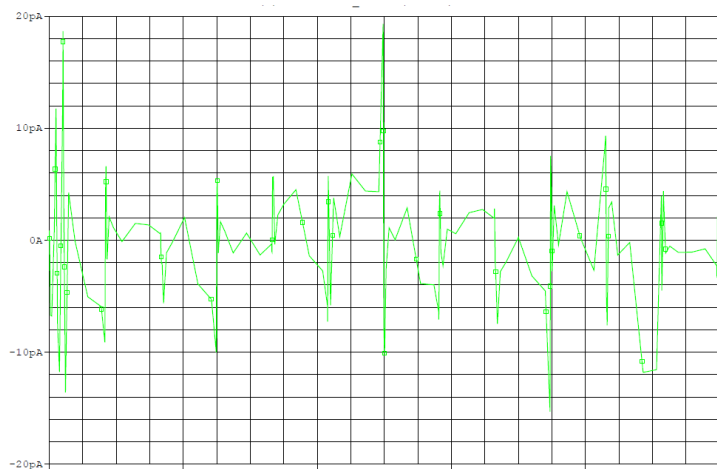


Fig.36 Corriente en la carga. Elaboración propia.

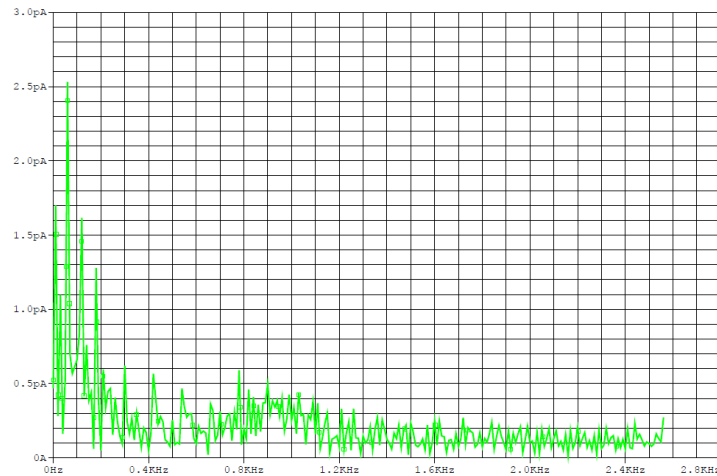


Fig.37 Espectro de amplitudes de armónicos de corriente en la carga. Elaboración propia.

➤ Escenario 4

En este caso se dejan los pulsadores V2 y V5 activos como se muestra en la figura 38.

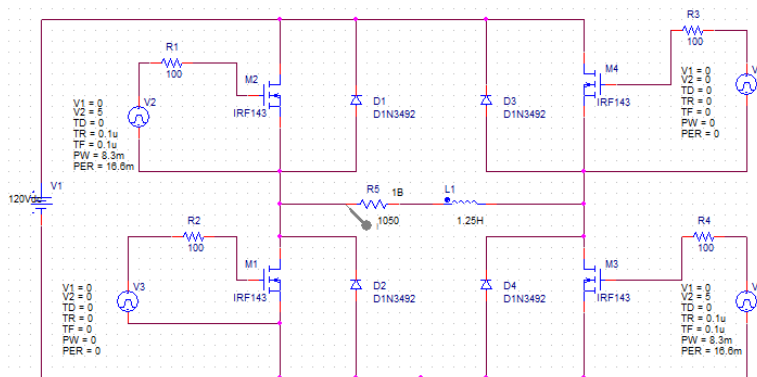


Fig.38 Circuito con pulsadores V2 y V5 activos. Elaboración propia.

Para este caso, como se detalla en la figura 39, la forma de onda de la corriente en la entrada del circuito vuelve a tener una forma mucho más cuadrada, aunque con unos picos que son los encargados de introducir los armónicos.

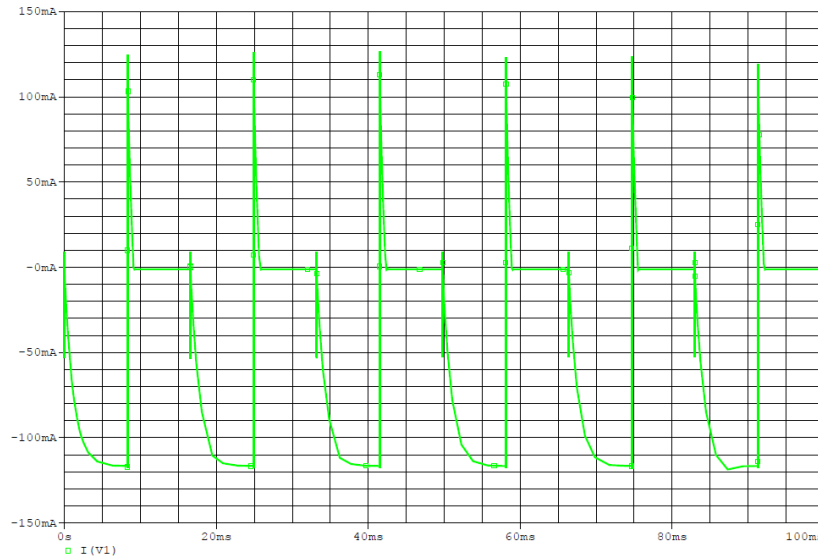


Fig.39 Corriente de entrada al circuito en el escenario 4. Elaboración propia.

En la figura 39 se puede evidenciar un comportamiento de la corriente mucho más estable y con muy poco ruido o deformación. Aun así, hay armónicos debido a los pulsadores activos, estos se pueden observar en la figura 40.

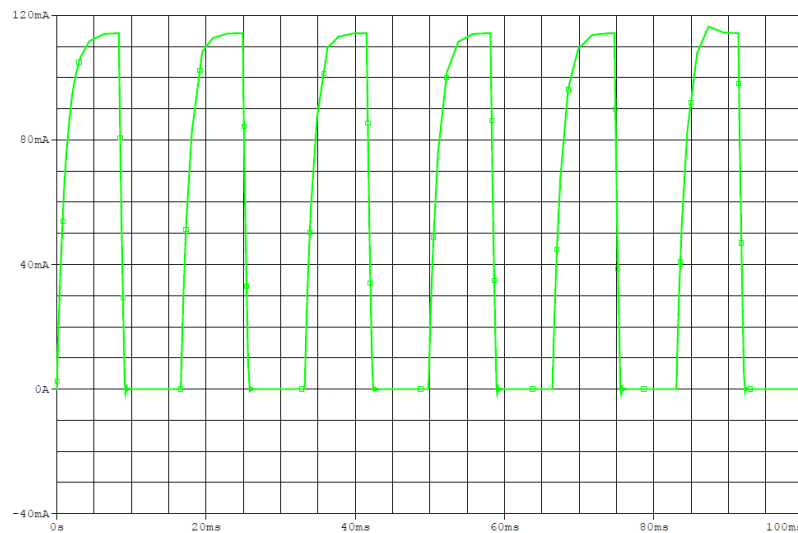


Fig.40 Señal de corriente en la carga en el escenario 4. Elaboración propia.

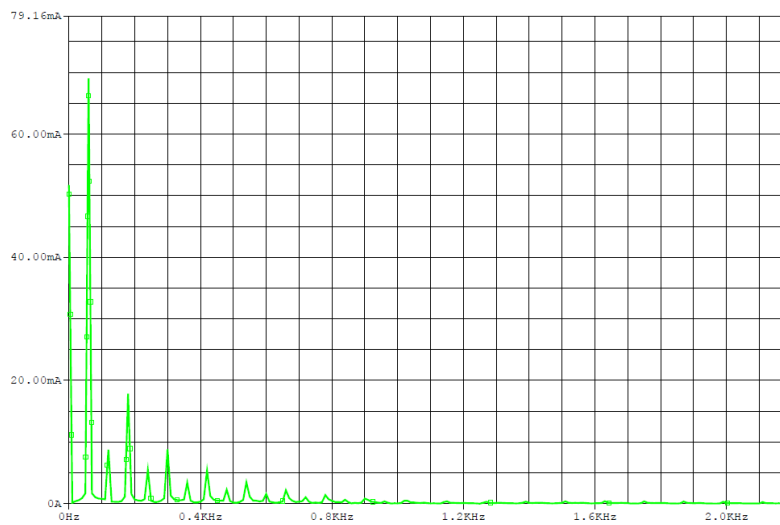


Fig.41 Espectro de amplitudes de armónicos de corriente en la carga. Elaboración propia.

Los armónicos en este escenario tienen un comportamiento distinto a los vistos en los escenarios 3 y 2, esto es debido a que la corriente de entrada tiene un comportamiento mucho más estable que en los otros escenarios.

➤ Escenario 5

Este escenario se simula dejando activos los pulsadores V3 y V4, como se ve en la figura 39.

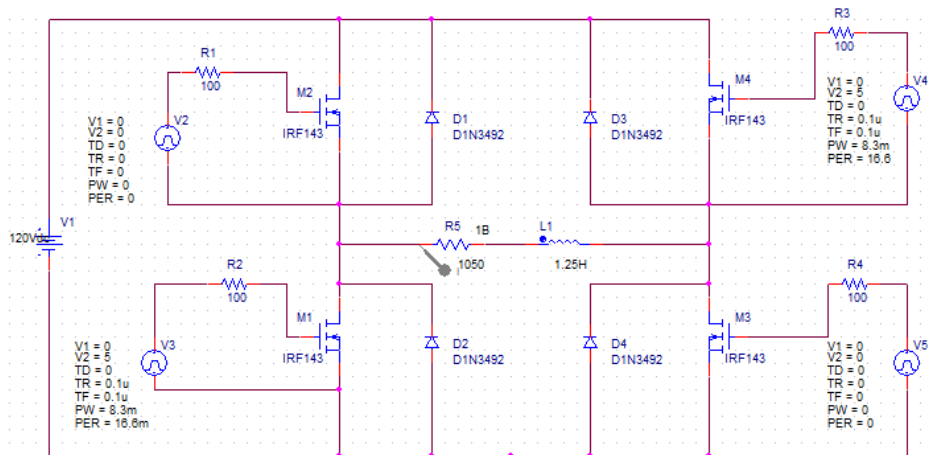


Fig.42 Circuito con pulsadores V3 y V4 activados. Elaboración propia.

Como se puede evidenciar en la figura 43. La corriente de entrada solo tiene un pico alto, a partir de ahí, esta tiene un comportamiento constante con picos de muy baja amplitud cada 35 milisegundos. Debido a este tipo de comportamiento se puede evidenciar en la fig. 45 que el espectro de armónicos en este caso tiene menores amplitudes a los vistos en escenarios anteriores.

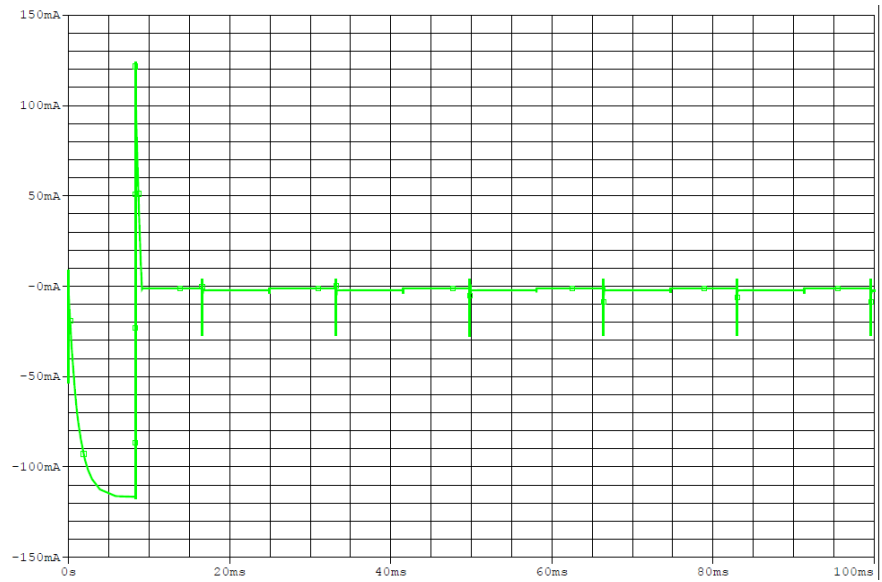


Fig.43 Corriente de entrada en el escenario 5. Elaboración propia.

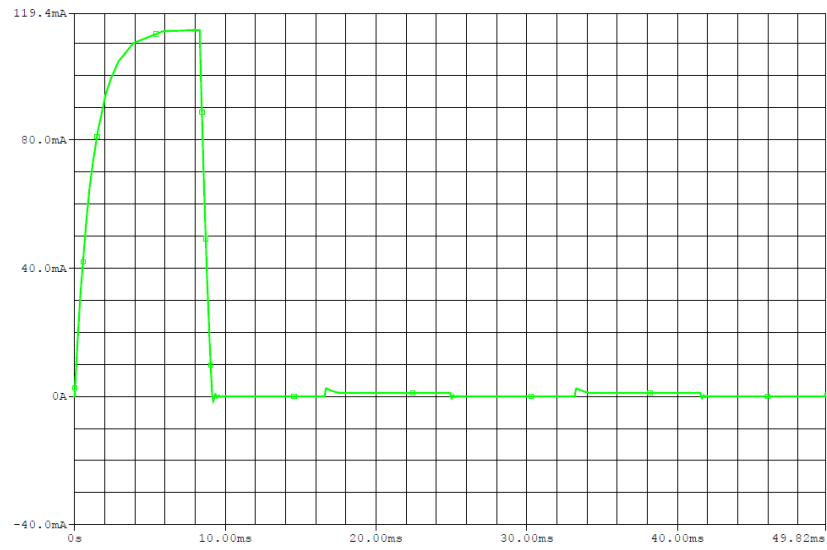


Fig.44 Corriente en la carga en el escenario 5. Elaboración propia.



Fig.45 Espectro de amplitudes de armónicos en la carga en el escenario 5. Elaboración propia.

➤ Escenario 6

En este caso se simula el circuito con los 4 pulsadores activos, como se muestra en la figura 43. Se puede observar el comportamiento de la corriente de entrada, siendo una onda cuadrada, pero con valores negativos, figura 46. Este comportamiento hace que la corriente en la carga tenga forma triangular con pequeñas distorsiones, como se ve en la figura 48.

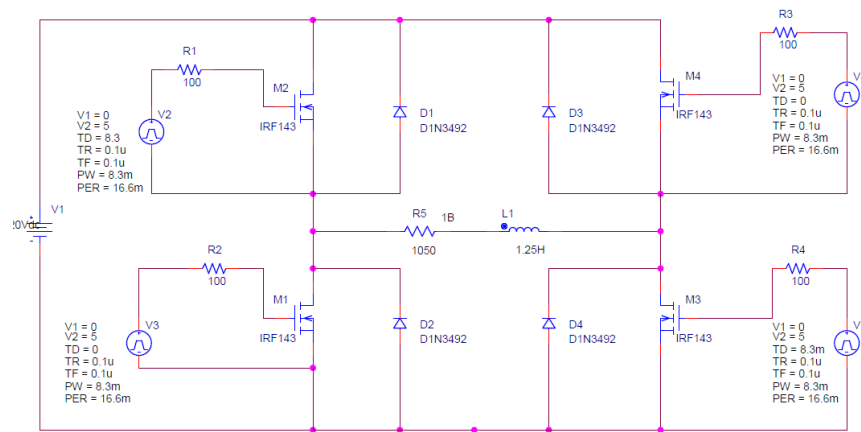


Fig.46 Circuito con los 4 pulsadores activos en el escenario 6. Elaboración propia.

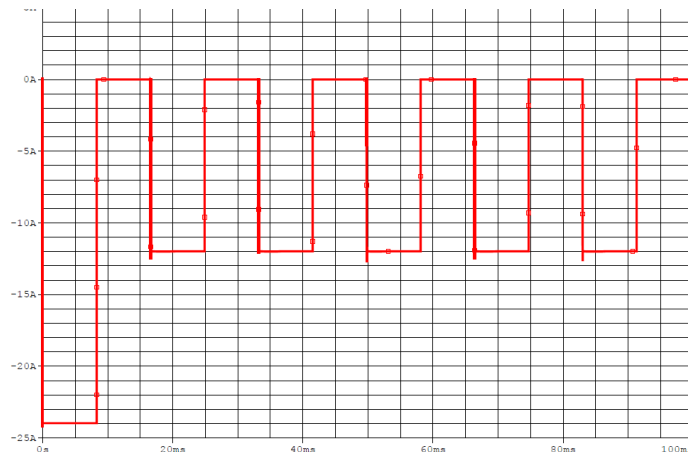


Fig.47 Corriente de entrada en el escenario 6. Elaboración propia.

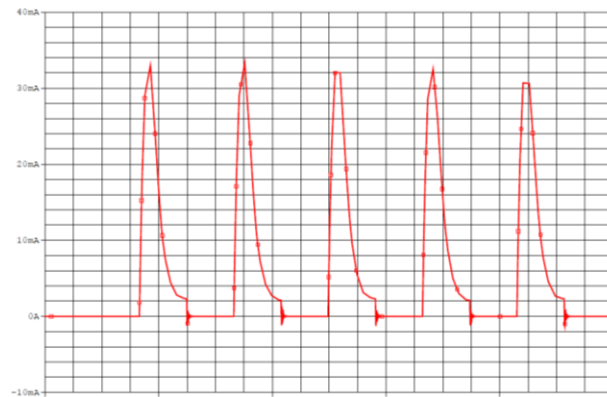


Fig.48 Corriente en la carga en el escenario 6. Elaboración propia.

En este escenario los armónicos tienen amplitud alta en muy baja frecuencia pero que se disminuye rápidamente conforme se aumenta esta última, esto es debido a la forma de onda de la corriente de entrada. También cabe aclarar que las señales dependen también de los parámetros de los pulsadores y de la misma carga.

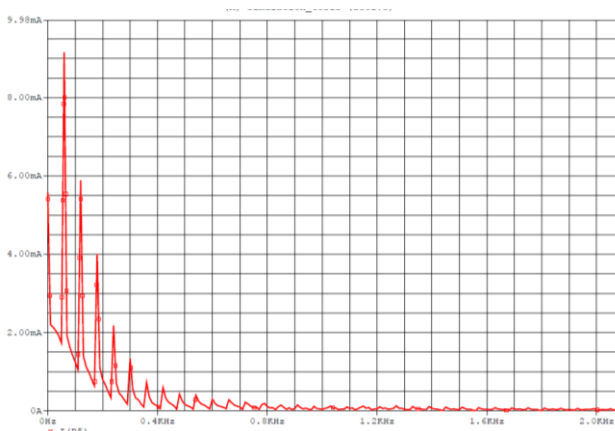


Fig.49 Espectro de amplitudes de armónicos de corriente en la carga. Elaboración propia.

Se realizó un último escenario cambiando los parámetros de los pulsadores para observar como cambiaban las señales de la corriente y tensión, y para observar si el comportamiento mejoraba la forma de la señal o, al contrario, la deformaba aún más.

➤ Escenario 7

Este escenario tiene los 4 pulsadores activos, pero con parámetros distintos:

- Valor inicial (V1): 10V
- Valor pulsado (V2): 0V
- Tiempo de retraso (TD): 0ns
- Tiempo de levante (TR): 10ns
- Tiempo de caída (TF): 10ns
- Ancho de pulso (PW): 0.5ms
- Periodo: 1ms

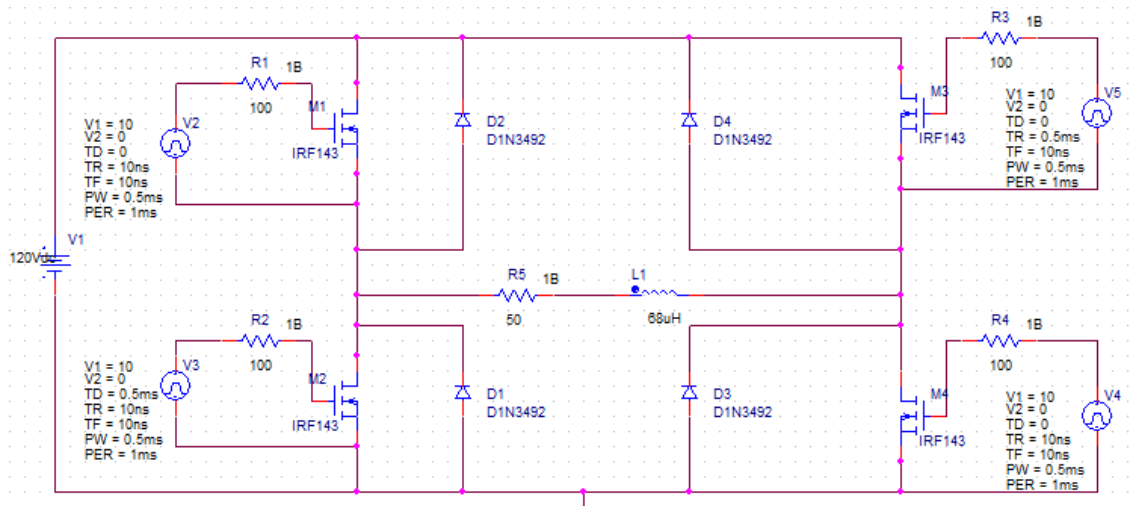


Fig.50 Circuito con nuevos parámetros en el escenario 7. Elaboración propia.

Como se puede observar en la fig.50, la corriente de entrada tiene un comportamiento casi constante debido a que cada cierto tiempo ocurren unos picos de gran amplitud negativa. Estos picos son los que introducen los armónicos.

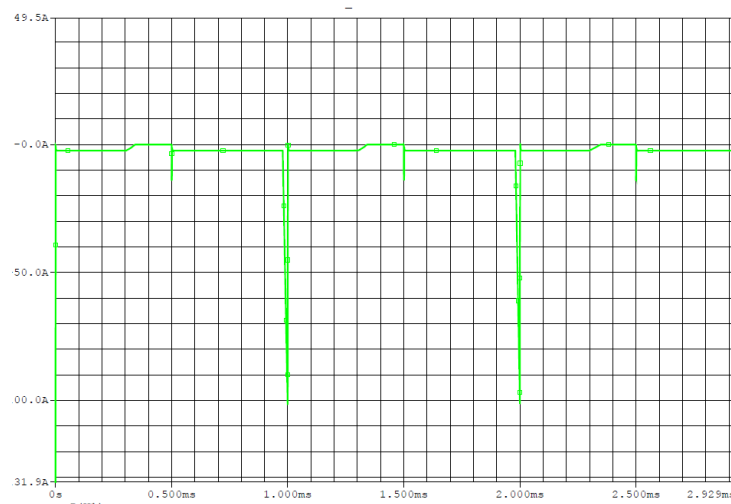


Fig.51 Corriente de entrada al circuito en el escenario 7. Elaboración propia.

En la figura 51. Se puede observar que la corriente en este escenario tiene una forma mucho más cuadrada y sin distorsiones en su comportamiento. En este escenario la corriente tiene una gran amplitud, en comparación a los otros escenarios.

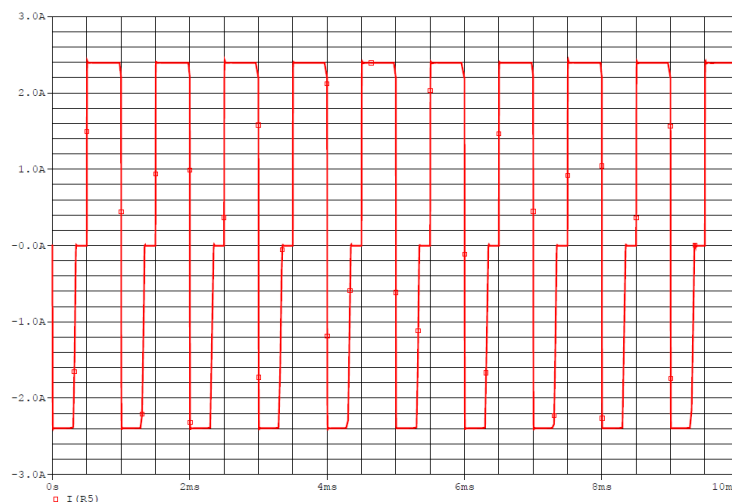


Fig.52 Corriente en la carga en el escenario de simulación 7. Elaboración propia.

En la Fig. 53. se puede ver el contenido de armónicos. Se puede observar que en este caso los armónicos tienen una amplitud muy significativa sobre todo, los primeros 5 armónicos. En este caso se puede evidenciar con mejor claridad el comportamiento de la corriente y tensión en la carga. La tensión se puede ver en la Fig. 51.

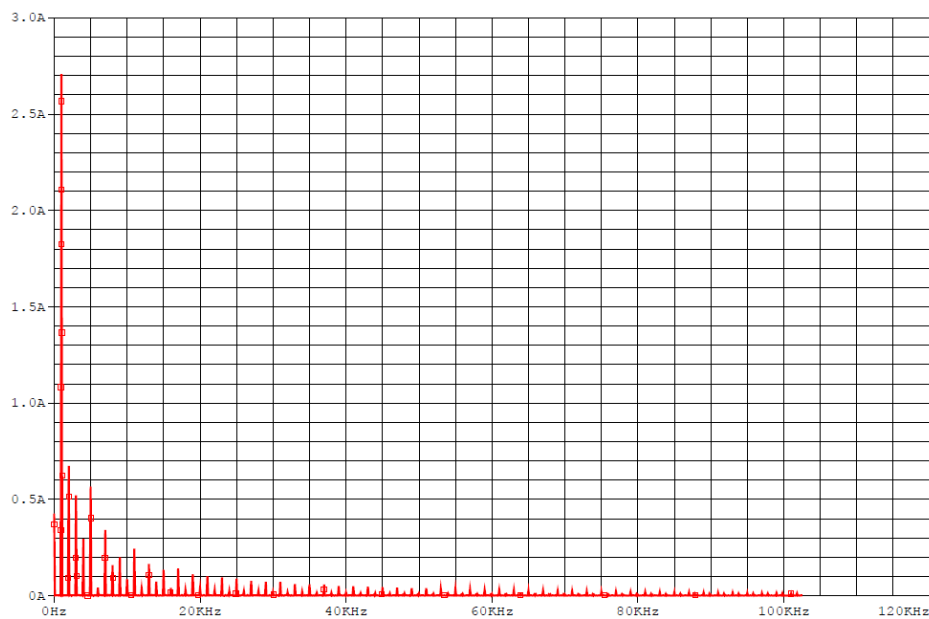


Fig.53 Espectro de amplitudes de armónicos de corriente en la carga en el escenario 7. Elaboración propia.

Se puede ver el comportamiento de la señal de tensión, siendo casi en su totalidad de forma cuadrada, pero por la distorsión generada por el circuito inversor no lo es en su totalidad.

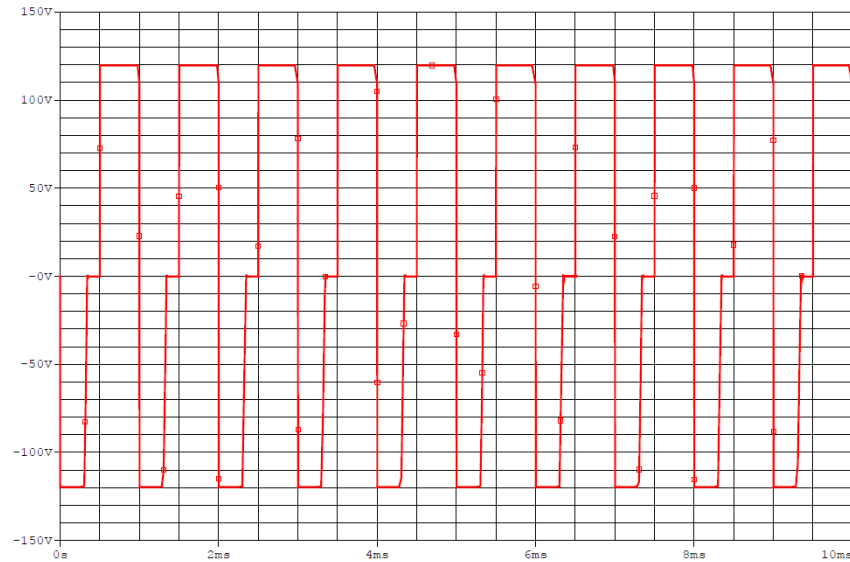


Fig.54 Tensión en la carga en el escenario de simulación 7. Elaboración propia.

G. Comentarios

Con el fin de lograr los objetivos planteados al inicio de esta tesis, toda la información sobre los resultados obtenidos en NEPLAN, se compararon en los diferentes escenarios de operación para poder tener un buen entendimiento del comportamiento del porcentaje de distorsión de tensión en una red eléctrica. Posterior a eso se realizaron las simulaciones respectivas con el circuito de generación de armónicos seleccionado para poder ver cómo era la afectación de los armónicos en la carga que representa una lavadora.

Uno de los objetivos planteados era efectuar la comparación de los porcentajes de distorsión en el electrodoméstico, con curvas o limitantes establecidas en normativa, pero esta comparación no se pudo efectuar debido a la inexistencia de estas curvas de inmunidad.

En un principio, en la investigación realizada se pensó que existía literatura que abarcara el tema de curvas de inmunidad de electrodomésticos, esto con el fin de poder comparar los resultados obtenidos con este tipo de curvas. Esta actividad no se pudo realizar debido a la inexistencia de literatura de estas curvas como se mencionó anteriormente. Por tal motivo para poder subsanar este objetivo, se diseñó un circuito de una red de distribución en baja tensión con el fin de poder ver como una fuente generadora de armónicos afecta a la carga conectada a los nodos de esta misma.

VI. Conclusiones

- Con el desarrollo de las simulaciones realizadas en NEPLAN, se pudo evidenciar que la inclusión de los centros de carga de vehículos eléctricos a la red eléctrica, provocan el incremento del THD de tensión en los nodos próximos al sistema.
- Una de variables que hace que se incremente el THD de tensión en un sistema de distribución es la baja potencia de los transformadores de distribución. Esto es debido a que la carga que está conectada a ese transformador es de bajo consumo y por ende este último sea vulnerable.
- El circuito seleccionado para la generación de armónicos diseñado en ORCAD es el más adecuado, debido a que este circuito se puede llegar a implementar ya que contienen componentes que se pueden conseguir y manipular con la idea de poderlo armar.
- Como se pudo observar en los resultados con los escenarios simulados en el numeral E, las formas de las ondas de tensión y la corriente en la carga, dependen del tiempo y de los pulsadores que estén activos en el circuito. Se puede ver también que, si hay uno o dos pulsadores activos, el espectro de amplitudes armónicas tendrá mucho ruido y por ende este ruido más los armónicos presentes harán que la onda de corriente tenga un comportamiento distorsionado. Este ruido puede ser eliminado usando filtros y así se podrá ver bien definidos los espectros de amplitudes armónicas.
- Al dejar activos los 4 pulsadores como se observa en el escenario 7 y cambiando los parámetros se pudo observar que la señal de tensión y corriente tienen un comportamiento estable y sin ruido. Adicional a esto se puede ver que el espectro de amplitudes de corriente está bien definido.
- Los espectros de armónicos con ruido vistos en las simulaciones del numeral E en los escenarios 2 y 3 hacen que la señal de corriente tenga un comportamiento distorsionado. Este comportamiento puede hacer que los dispositivos electrónicos de una lavadora presenten fallas debido a que estos dispositivos están hechos para que funcionen con una forma de onda que tiene sus cruces por cero definidos en tiempos y amplitudes específicos.
- Como aspecto a tener en cuenta se espera que quienes sigan esta investigación utilicen estos circuitos diseñados para que los implementen y puedan ver si los resultados obtenidos se puedan aplicar a la inyección de armónicos de un electrodoméstico.
- La observación de los porcentajes de distorsión de tensión en los electrodomésticos como lavadoras resultan unos porcentajes de distorsión muy pequeñas, tal como queda evidenciado en los resultados obtenidos. Es recomendable que en trabajos futuros se observen contenidos armónicos de tensión y corriente en circuitos que alimenten varios electrodomésticos sensibles.

- En concordancia con lo que se menciona en la conclusión anterior, a futuro resultaría recomendable el establecimiento de límites de inyección de armónicos de corriente directamente desde las cargas de los usuarios, principalmente de aquellos electrodomésticos que incorporan fuentes conmutadas y electrónica de potencia. Este cambio en el enfoque de la normativa presentado en IEEE-519, permitiría un tratamiento más de raíz, imponiendo limitantes para evitar distorsión de la onda del operador.

VII. Referencias

- [1] Universidad Politecnica Salesiana, «Armonicos en las Redes Electricas,» 23 Octubre 2011. [En línea]. Available: http://www.academia.edu/10629493/CAPITULO_2_ARMONICOS_EN_LAS_REDES_ELECTRICAS.
- [2] M. J. A. M. G. M. L. A. C. R. M.C. Mario Salvador Esparza González, «Las cargas no Lineales, su Repercusión en las Instalaciones Eléctricas y sus Soluciones,» Aguas calientes , 2006.
- [3] E. T. Ramírez, «ANG Group,» 01 Mayo 2000. [En línea]. Available: agngroup.net/papers/Distorsion%20Armonica.pdf.
- [4] I. T. Ramírez, «Distorsion Armonica,» Automatizacion, productividad y calidad S.A. de C.V., Puebla
- [5] G. A. Putrus, P. Suwanapingkarl, D. Johnston, E. C. Bentley, and M. Narayana, "Impact of Electric Vehicles on Power Distribution Networks," IEEE, pp. 827-831, 2009.
- [6] Centros de Excelencia Tecnica Unidad Normalizacion y Laboratorios, «EPM,» 01 05 2018. [En línea]. Available: www.epm.com.co/site.
- [7] C. P. B. J. C. R. G. César, «Análisis y evaluación del comportamiento el THDi a causa de la conexión masiva de vehículos eléctricos en una estación de carga,» Bogotá, 2016.
- [8] R. S. Zapata, «Impacto en la demanda de energía eléctrica en Colombia debido a la penetración de vehículos híbridos-eléctricos y eléctricos,» Medellín, 2009.
- [9] Comisión de Regulación de Energía y Gas, «CREG,» [En línea]. Available: <http://www.creg.gov.co>.
- [10] Ministerio De Minas y Energia, «Minminas,» RETIE, 30 Agosto 2013. [En línea]. Available: <https://www.minminas.gov.co>.
- [11] Enel, «linkinormas,» Codensa S.A, [En línea]. Available: <http://linkinormas.micodensa.com>.
- [12] Schlumberger Company, «Fairchild,» [En línea]. Available: www.digchip.com.
- [13] Nissan, «Nissan,» Nissan, 2017. [En línea]. Available: www.nissan.es/vehiculos/nuevos-vehiculos/leaf.
- [14] Instituto Colombiano de Normas Tecnicas y Certificacion, Codigo Electrico Colombiano-NTC 2050, 1998.
- [15] Schneider Electric, «Schneider Electric,» [En línea]. Available: www.schneider-electric.com.

VIII. Anexos

ANEXO 1

RESULTADOS SIMULACIÓN CIRCUITO DE DISTRIBUCIÓN

- Simulación variando generador de armónicos con carga lenta (generador I = 16 A), cc=100 MVA y trafo a 112.5 kVA

Nodo 8 0,208 kV U=203,6 V THD=0,87 %	Nodo 8 0,208 kV U=203,6 V THD=0,46 %	Nodo 8 0,208 kV U=203,6 V THD=0,66 %	Nodo 8 0,208 kV U=203,6 V THD=0,46 %	Nodo 8 0,208 kV U=203,6 V THD=0,28 %
---	---	---	---	---

Fig. 55. Resultados de tensión en el nodo 8 variando generador de armónicos a los nodos 8, 5, 6, 11 y 1 respectivamente

- Simulación variando potencia del transformador a 45 kVA y con carga lenta y cc quieta 100 MVA

Nodo 8 0,208 kV U=199,9 V THD=1,25 %	Nodo 8 0,208 kV U=199,9 V THD=0,86 %	Nodo 8 0,208 kV U=199,9 V THD=1,05 %	Nodo 8 0,208 kV U=199,9 V THD=0,86 %	Nodo 8 0,208 kV U=199,9 V THD=0,68 %
---	---	---	---	---

Fig. 56. Resultados de tensión en el nodo 8 variando generador de armónicos a los nodos 8, 5, 6, 11 y 1 respectivamente

Simulación variando la cc a 50 MVA y trafo 112.5 kVA, en carga lenta

Nodo 8 0,208 kV U=203,6 V THD=0,87 %	Nodo 8 0,208 kV U=203,6 V THD=0,47 %	Nodo 8 0,208 kV U=203,6 V THD=0,67 %	Nodo 8 0,208 kV U=203,6 V THD=0,47 %	Nodo 8 0,208 kV U=203,6 V THD=0,28 %
---	---	---	---	---

Fig. 57. Resultados de tensión en el nodo 8 variando generador de armónicos a los nodos 8, 5, 6, 11 y 1 respectivamente

ANEXO 2

RESULTADOS SIMULACIÓN CIRCUITO #4

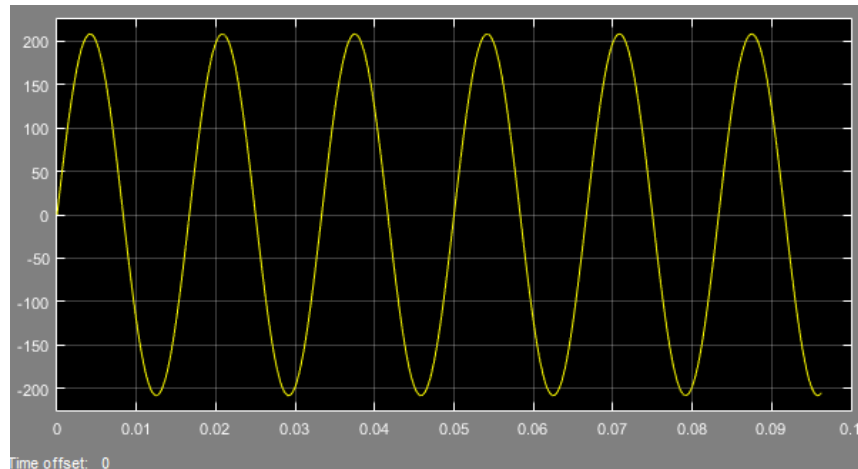


Fig. 58. Forma de onda de la corriente en software de Simulink. Elaboración propia.

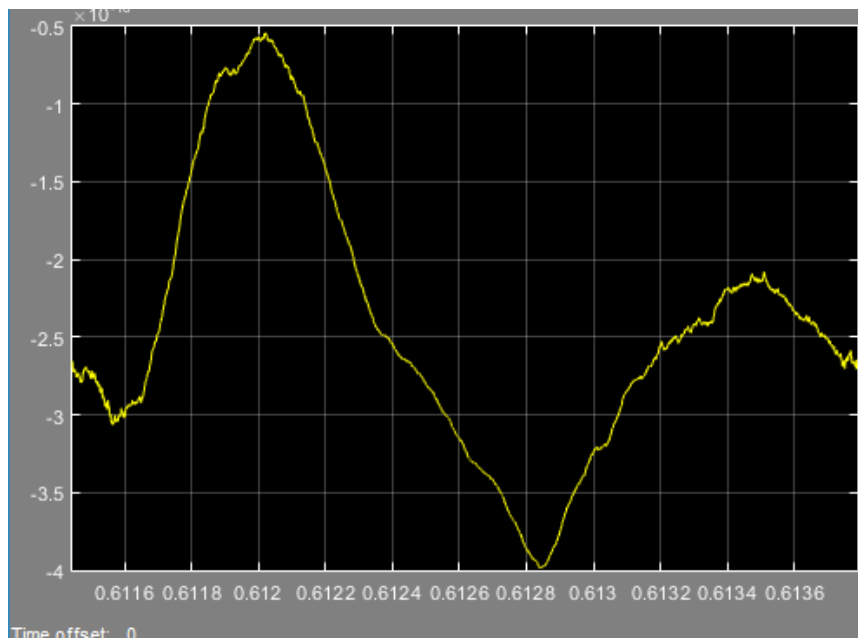


Fig. 59. Forma de onda de la corriente siendo afectada por armónicos en software de Simulink. Elaboración propia.

ANEXO 3

RESULTADOS SIMULACIÓN CIRCUITO #3

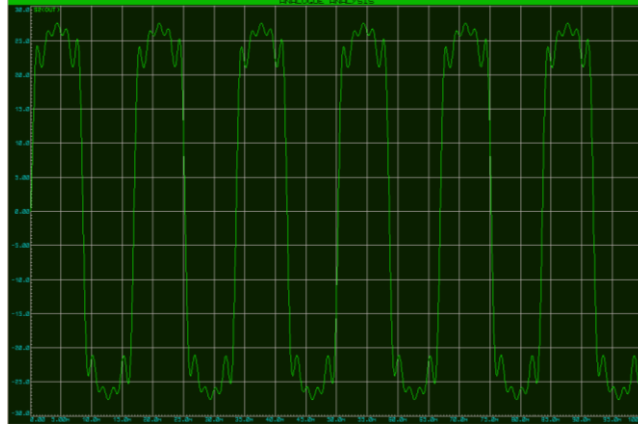


Fig. 60. Forma de onda de la corriente con contenido armónico en software de Proteus.
Elaboración propia.



Fig. 61. Espectro de amplitud de armónicos de tensión en la carga con todas las fuentes activas en software de Proteus. Elaboración propia.

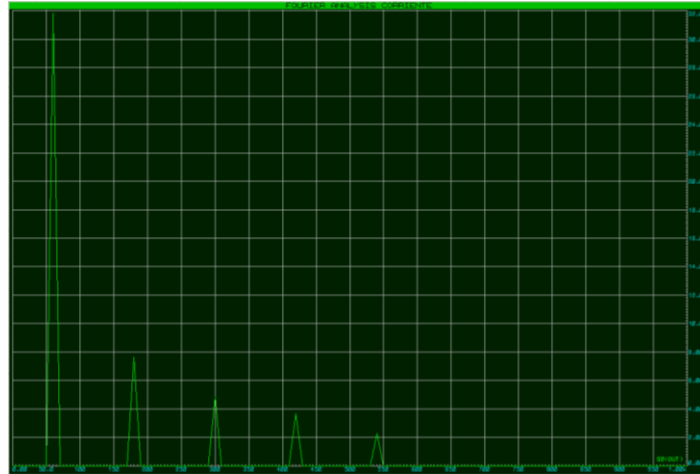


Fig. 62. Espectro de amplitud de armónicos de corriente en la carga con todas las fuentes activas en software de Proteus. Elaboración propia.