

ESTUDIO DE LA SENSIBILIDAD DE LA DISTORSIÓN ARMÓNICA EN
PEQUEÑOS ARTEFACTOS ANTE VARIACIONES DE AMPLITUD Y
DISTORSIÓN EN LA TENSIÓN DE LA FUENTE DE ALIMENTACIÓN

JOSE VELÁSQUEZ MAESTRE
CRISTIAN MARTÍNEZ PABÓN

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERIAS FISICO-MECANICAS
ESCUELA DE INGENIERIA ELECTRICA, ELECTRONICA Y
TELECOMUNICACIONES
BUCARAMANGA

2016

ESTUDIO DE LA SENSIBILIDAD DE LA DISTORSIÓN ARMÓNICA EN
PEQUEÑOS ARTEFACTOS ANTE VARIACIONES DE AMPLITUD Y
DISTORSIÓN EN LA TENSIÓN DE LA FUENTE DE ALIMENTACIÓN

JOSE VELÁSQUEZ MAESTRE
CRISTIAN MARTÍNEZ PABÓN

Trabajo de Grado para optar por el título de
Ingeniero Electricista

Director
CESAR A. DUARTE GUALDRON
Ingeniero Electricista, Ph.D

Codirectores
GABRIEL ORDOÑEZ PLATA
Ingeniero Electricista, Ph.D

GABRIEL MALAGON CARVAJAL
Ingeniero Electricista, MIE

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERIAS FISICO-MECANICAS
ESCUELA DE INGENIERIA ELECTRICA, ELECTRONICA Y
TELECOMUNICACIONES
BUCARAMANGA
2016

DEDICATORIA

Inicialmente deseamos dedicarles este trabajo de grado a todas las personas que siempre creyeron en nuestra capacidad y determinación.

A Dios por habernos permitido llegar hasta este punto y habernos dado salud para lograr nuestros objetivos, además de su infinita bondad y amor.

A nuestros padres ser el pilar fundamental en todo lo que somos, en toda nuestra educación, tanto académica, como de la vida, por su incondicional apoyo perfectamente mantenido a través del tiempo.

A nuestros amigos que nos apoyamos mutuamente en nuestra formación profesional y que hasta ahora, seguimos siendo amigos.

Finalmente a los maestros, aquellos que marcaron cada etapa de nuestro camino universitario, y que nos ayudaron en asesorías y dudas presentadas en la elaboración de la tesis.

“... No hay absolutamente ninguna otra forma de triunfar en la vida si no es por el constante esfuerzo.” – Arnold Schwarzenegger

AGRADECIMIENTOS

Los autores expresan su agradecimiento principalmente a Dios, por permitirnos llegar hasta donde hemos llegado y porque hiciste realidad este sueño anhelado.

A la Universidad Industrial de Santander por darnos la oportunidad de estudiar y ser un profesional.

A nuestro director de tesis, Dr. Cesar Duarte y codirector, Dr. Gabriel Ordoñez quienes con sus conocimientos, experiencias, paciencia y motivación han logrado en nosotros la culminación exitosa de nuestros estudios.

También nos gustaría agradecer especialmente al MSc. Gabriel Malagón, codirector del proyecto, por su apoyo, colaboración y disposición que fue fundamental en el desarrollo de este trabajo.

Agradecemos a Jeison Bello, quien fue parte importante en la realización del proyecto.

Y finalmente agradecer a nuestros profesores durante toda nuestra carrera profesional porque todos han aportado con un granito de arena a nuestra formación.

CONTENIDO

	pág.
INTRODUCCIÓN.....	20
1. DEFINICIÓN DEL PROBLEMA.....	22
2. JUSTIFICACIÓN.....	23
3. OBJETIVOS.....	24
3.1. OBJETIVO GENERAL.....	24
3.2. OBJETIVOS ESPECIFICOS	24
4. MARCO REFERENCIAL.....	25
4.1. ELECTRODOMÉSTICOS	25
4.2. SMPS (SWITH-MODE POWER SUPPLY)	25
4.3. ARMONICOS	26
4.3.1. Índice de distorsión armónica total (THD).....	27
4.3.2. Factor de atenuación (FA).....	27
4.3.3. Factor de agregación (FAG).....	28
4.4. ESTADO DEL ARTE	28

4.4.1. Medición y tratamiento de datos.....	29
4.4.2. Referencias de cargas residenciales.....	29
4.4.3. Los fenomenos de atenuación y diversidad.....	30
4.4.4. Estado del arte en Colombi.....	31
4.5. FUENTE CHROMA.....	31
4.6. MATLAB.....	32
4.7. REGULACIÓN.....	32
5. METODOLOGÍA.....	34
5.1. FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA.....	34
5.1.1. Estado del arte.....	34
5.1.2. Fuente programable y medidor de calidad de la potencia.....	34
5.1.3. Selección y clasificación de los electrodomésticos.....	34
5.2. MEDIDAS PRELIMINARES.....	38
5.3. PROCEDIMIENTO PARA LA EJECUCIÓN DE LAS PRUEBAS.....	39
5.3.1. Selección de la tensión de alimentación.....	40
5.3.2. Procedimiento para la realización de una prueba.....	44
5.3.3. Tiempo necesario para realizar una prueba.....	49

5.4.	ADQUISICIÓN DE MUESTRAS DE LAS SEÑALES	50
5.5.	ANÁLISIS DE DATOS, FORMULACION DE INDICES Y COMPARACIÓN DE RESULTADOS	54
6.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN	57
6.1.	CASO DE ESTUDIO 1	57
6.2.	CASO DE ESTUDIO 2	58
6.3.	CASO DE ESTUDIO 3	62
6.3.1.	Sensibilidad ante variaciones en la distancia del circuito ramal	65
6.3.2.	Sensibilidad ante variaciones en la tensión de alimentación.....	66
6.4.	CASO DE ESTUDIO 4	67
6.5.	CASO DE ESTUDIO 5	71
6.6.	CASO DE ESTUDIO 6	75
6.7.	CASO DE ESTUDIO 7	80
6.8.	CASO DE ESTUDIO 8	84
6.9.	CASO DE ESTUDIO 9	87
6.10.	CASO DE ESTUDIO 10	95
7.	CONCLUSIONES	99

CITAS.....	101
BIBLIOGRAFIA.....	104
ANEXOS.....	105

LISTA DE FIGURAS

	pág.
Figura 1. Diagrama circuital de una SMPS tradicional	26
Figura 2. Forma de onda de la corriente producida por una SMPS de un equipo de sonido	26
Figura 3. Cargas conectadas a un mismo circuito.....	28
Figura 4. Número de clasificación de la pruebas.....	38
Figura 5. Organigrama de medida por electrodoméstico.....	39
Figura 6. Ondas de tensión durante el día	42
Figura 7. Onda de tensión promedio del laboratorio.....	42
Figura 8. Señal de tensión del laboratorio y señales Flat-top y Pointed-top	43
Figura 9. Tablero de distribución TN A308 que energiza la fuente, y los demás circuitos del laboratorio.....	45
Figura 10. Imagen pantalla y botones de mando de la fuente programable Chroma...	46
Figura 11. Automáticos de corte del tablero que esta aguas abajo de la fuente Chroma	46
Figura 12. Conexión del electrodoméstico al montaje	46
Figura 13. Medidor de la calidad de la energía PowerVisa.	47
Figura 14. Medidor PowerVisa conectado a la carga a medir.	48
Figura 15. Diagrama unifilar del montaje para realizar las pruebas.....	48
Figura 16. Tablero de conexión	49
Figura 17. Tarjeta HASP del Dranetz.....	51
Figura 18. Pantalla de inicio Dran-View. Prueba del Electrodoméstico 01	51
Figura 19. Propiedades del programa	52
Figura 20. Ventana de 12 ciclos de los diagramas de las formas de ondas.	52
Figura 21. Congregación de 15 ventanas	53
Figura 22. Lista de datos	53
Figura 23. Exportar datos. Forma de onda.....	54
Figura 24. Corrientes de dos electrodomésticos analizados en este trabajo, alimentados con una señal sinusoidal a 0 metros del punto de acople común y en barrido de tensión	57
Figura 25. Ondas de tensión de alimentación de las pruebas de estabilización	60
Figura 26. Ondas de corriente de las pruebas de estabilización	60

Figura 27. Magnitud de los armónicos frente a variaciones en el tiempo de estabilización	61
Figura 28. Sensibilidad de los armónicos del electrodoméstico 7 (licuadora) a variaciones de longitud del circuito ramal, cuando es alimentado a regulación del 0% y con forma de onda sinusoidal	65
Figura 29. Sensibilidad del electrodoméstico 9 (decodificador) a variaciones de longitud del circuito ramal, cuando es alimentado a regulación del 0% y con forma de onda sinusoidal.....	65
Figura 30. Sensibilidad del electrodoméstico 3 (monitor 19") a variaciones de tensión, cuando es alimentado a regulación del 0% y con forma de onda sinusoidal	66
Figura 31. Sensibilidad del electrodoméstico 9 (decodificador) a variaciones de tensión, cuando es alimentado a regulación del 0% y con forma de onda sinusoidal	67
Figura 32. Porcentajes de THDi del electrodoméstico 14 (TV 21"), frente a variaciones en la forma de onda (a) pointed-top, (b) sinusoidal y (c) flat-top	67
Figura 33. Porcentajes de THDi del electrodoméstico 15 (cargador tablet), frente a variaciones en la forma de onda (a) pointed-top, (b) senosoida y (c) flat-top	69
Figura 34. Porcentajes de THDi del electrodoméstico 2 (equipo de sonido), frente a variaciones de longitud (a) pointed-top, (b) senosoida y (c) flat-top	70
Figura 35. Porcentajes de THDi del electrodoméstico 13, frente a variaciones de longitud (a) pointed-top, (b) senosoida y (c) flat-top	71
Figura 36. Energía de la señal de corriente frente a variaciones en regulación, la distancia y tipo de onda de alimentación del electrodoméstico 3 (monitor led 19")	71
Figura 37. Valor eficaz de corriente frente a variaciones en regulación, la distancia y tipo de onda de alimentación del electrodoméstico 3 (monitor led 19").....	72
Figura 38. Energía de la señal de corriente frente a variaciones en regulación, la distancia y tipo de onda de alimentación del electrodoméstico 6 (computador MAC)..	73
Figura 39. Energía de la señal de corriente frente a variaciones en regulación, la distancia y tipo de onda de alimentación del electrodoméstico 2 (equipo de sonido) ..	74
Figura 40. Ondas de corriente del electrodoméstico 2(equipo de sonido) frente a variaciones de distancia.....	74
Figura 41. Magnitud de los armónicos de corriente del electrodoméstico 3 (monitor 19") alimentado con la señal de tensión sinusoidal, realizando un barrido de tensión	75
Figura 42. Espectros de corrientes del electrodoméstico 3 (monitor 19") alimentado con la señal de tensión sinusoidal	77
Figura 43. Magnitud de los armónicos de corriente del electrodoméstico 2 (equipo de sonido) alimentado con la señal de tensión sinusoidal.....	77
Figura 44. Magnitud de los armónicos de corriente del electrodoméstico 3 (monitor 19") alimentado con la señal de tensión Flat-Top.....	78
Figura 45. Magnitudes de los armónicos de las corrientes del electrodoméstico 3 (monitor 19") alimentado con la señal de tensión sinusoidal (a) y las señales distorsionadas flat-top (b) y pointed-top (c).....	78

Figura 46. Magnitudes de los armónicos de las corrientes del electrodoméstico 11 (batidora) alimentado con la señal de tensión sinusoidal (a) y las señales distorsionadas flat-top (b) y pointed-top (c).....	79
Figura 47. Magnitud de los armónicos de corriente del electrodoméstico 1 (DVD) alimentado con la señal de tensión sinusoidal.	80
Figura 48. Magnitud de los armónicos de corriente del electrodoméstico 4 (monitor flatron) alimentado con la señal de tensión sinusoidal	80
Figura 49. Magnitud de los armónicos de corriente del electrodoméstico 5 (monitor 24”) alimentado con la señal de tensión sinusoidal	82
Figura 50. Magnitudes de los armónicos de las corrientes del electrodoméstico 02 alimentado con la señal sinusoidal(a) y las señales distorsionadas flat-top (b) y pointed-top(c).	82
Figura 51. Magnitud de los armónicos de corriente del electrodoméstico 08 alimentado con la señal de tensión sinusoidal.....	83
Figura 52. Magnitudes de los armónicos de las corrientes del electrodoméstico 3 (monitor 14”) alimentado con la señal sinusoidal y las señales distorsionadas flat-top y pointed-top.....	84
Figura 53. Magnitud y fase de los armónicos de las corrientes del electrodoméstico 2 (equipo de sonido) alimentado con la señal sinusoidal(a) y pointed-top (b).	85
Figura 54. Magnitud y fase de los armónicos de las corrientes del electrodoméstico 01 alimentado con la señal sinusoidal.....	85
Figura 55. Magnitud y fase de los armónicos de las corrientes del electrodoméstico 13 (portátil) alimentado con la señal sinusoidal.....	86
Figura 56. Magnitud y fase de los armónicos de las corrientes del electrodoméstico 12 (portátil) alimentado con la señal sinusoidal.....	87
Figura 57. Factor de atenuación del electrodoméstico 1 (DVD) alimentado con una señal de tensión flat-top	88
Figura 58. Factor de atenuación del electrodoméstico 3 (monitor 19”) alimentado con una señal de tensión flat-top	89
Figura 59. Factor de atenuación del electrodoméstico 8 (decodificador) señal de tensión pointed-top.....	90
Figura 60. Factor de atenuación del electrodoméstico 4 (monitor flatron) alimentado con una de tensión pointed-top.....	91
Figura 61. Factor de atenuación del electrodoméstico 12 (portátil) alimentado con una onda de tensión flat-top	92
Figura 62. Factor de atenuación del electrodoméstico 11 (batidora) alimentado con una de tensión pointed-top	93
Figura 63. Factor de atenuación del electrodoméstico 3 (monitor 19”) alimentado con una onda de tensión pointed-top.....	94
Figura 64. Factor de atenuación del electrodoméstico 3 (monitor 19”) alimentado con una onda de tensión flat-top.....	95

Figura 65. Factor de agregación, magnitud (a) y fase (b) para electrodomésticos 3, 4, 5 y 14, a distancia de 0 metros y regulación del 0%	96
Figura 66. Factor de agregación, magnitud (a) y fase (b) para electrodomésticos 8 y 9, a distancia de 7 metros y forma de onda pointed-top.....	97
Figura 67. Factor de agregación, magnitud (a) y fase (b) para electrodomésticos 6, 12 y 13, a regulación de 5% metros y forma de onda flat-top	98
Figura 68. Panel frontal.....	105
Figura 69. Display de inicio	106
Figura 70. Output more settieng	107
Figura 71. Output waveform selection.....	108
Figura 72. View waveform	109
Figura 73. Output mode	110
Figura 74. Synthesis Flat-Top	111
Figura 75. Synthesis waveform viewer (Flat-Top)	112
Figura 76. Synthesis running (Flat-Top).....	113
Figura 77. Synthesis pointed top.....	114
Figura 78. Synthesis waveform viewer (Pointed-Top)	115
Figura 79. Synthesis running (Pointed-Top).....	116
Figura 80. Menú principal	117
Figura 81. Índices de la opción INICIAR/config.....	118
Figura 82. Selección de las pinzas de corriente	119
Figura 83. Factores de escala.....	120
Figura 84. Tipo de conexión.....	121
Figura 85. Valores nominales	122
Figura 86. Modo operativo	123
Figura 87. Modo monitorear.....	124
Figura 88. Opciones avanzadas	125
Figura 89. Intervalo del jornal.....	126
Figura 90. Tarjeta de memoria.....	127
Figura 91. Monitorear el mismo circuito	128
Figura 92. Toma de datos en curso	129
Figura 93. Corrientes de los electrodomésticos analizados en este trabajo, alimentados con una señal seno a 0 metros del punto de acople común y en barrido de tensión .	130
Figura 94. Corriente eficaz frente a variaciones en regulación, la distancia y tipo de onda de alimentación del electrodoméstico 2 (equipo de sonido)	136

Figura 95. Valor pico de corriente frente a variaciones en regulación, la distancia y tipo de onda de alimentación del electrodoméstico 2 (equipo de sonido) 137

LISTA DE TABLAS

pág.

Tabla 1. Porcentaje de hogares colombianos con dispositivos electrónicos.....	34
Tabla 2. Clasificación de los electrodomésticos seleccionados.....	36
Tabla 3. Espectros de cada señal de tensión de alimentación	41
Tabla 4. Espectro armónico de tensión del laboratorio.....	44
Tabla 5. Orden de armónico para el cual la energía de la señal de corriente es recuperada, por lo menos, en un 97%	58
Tabla 6. Valores de magnitud y ángulo promedio con las desviaciones respectivas ...	59
Tabla 7. Comparativos de la prueba de estabilización	61
Tabla 8. Magnitud de los armónicos a variaciones en la tensión de alimentación, grupos U1 y U2	63
Tabla 9. Magnitud de los armónicos a variaciones en la tensión de alimentación, primer armónico a 1% y el primer armónico a 0%.....	64
Tabla 10. Diferencias absolutas de los grupos U1 y U2	64
Tabla 11. Media y desviación estándar de las diferencias absolutas	65
Tabla 12. Corriente eficaz y pico ante variaciones de distancia, electrodoméstico 2 (equipo de sonido).....	75
Tabla 13. Sensibilidad del electrodoméstico 1 a variaciones de longitud del circuito ramal, cuando es alimentado a regulación del 0% y con forma de onda sinusoidal ..	133
Tabla 14. Sensibilidad del electrodoméstico 5 a variaciones de longitud del circuito ramal, cuando es alimentado a regulación del 0% y con forma de onda sinusoidal ..	133
Tabla 15. Sensibilidad del electrodoméstico 7 a variaciones de longitud del circuito ramal, cuando es alimentado a regulación del 0% y con forma de onda flat-top	133
Tabla 16. Sensibilidad del electrodoméstico 9 a variaciones de longitud del circuito ramal, cuando es alimentado a regulación del 0% y con forma de onda pointed-top	134
Tabla 17. Sensibilidad del electrodoméstico 3 a variaciones de tensión, cuando es alimentado a regulación del 0% y con forma de onda sinusoidal	134
Tabla 18. Sensibilidad del electrodoméstico 8 a variaciones de tensión, cuando es alimentado a regulación del 0% y con forma de onda sinusoidal	135
Tabla 19. Sensibilidad del electrodoméstico 9 a variaciones de tensión, cuando es alimentado a regulación del 0% y con forma de onda sinusoidal	135
Tabla 20. Sensibilidad del electrodoméstico 14 a variaciones de tensión, cuando es alimentado a regulación del 0% y con forma de onda sinusoidal	136

LISTA DE ANEXOS

	pág.
ANEXO A. Manipulación de la fuente programable Chroma	105
ANEXO B. Manipulación del Dranetz PowerVisa	117
ANEXO C. Corrientes de los electrodomésticos analizados.....	130
ANEXO D. Tablas de sensibilidad.....	133
ANEXO E. Grafica de corriente eficaz y valor pico.....	136

RESUMEN

TÍTULO: ESTUDIO DE LA SENSIBILIDAD DE LA DISTORSIÓN ARMÓNICA EN PEQUEÑOS ARTEFACTOS ANTE VARIACIONES DE AMPLITUD Y DISTORSIÓN EN LA TENSIÓN DE LA FUENTE DE ALIMENTACIÓN*

AUTORES: CRISTIAN MARTÍNEZ PABÓN, JOSE G. VELÁSQUEZ MAESTRE**

PALABRAS CLAVE: Distorsión armónica, espectro armónico, armónicos, calidad de la potencia, factor de potencia

DESCRIPCIÓN: Este trabajo de grado tiene como objetivo estudiar el efecto que la distorsión de tensión tiene sobre la distorsión de corriente. El estudio es llevado a cabo en torno a la sensibilidad que presenta una muestra de 15 electrodomésticos ante variaciones en la tensión de alimentación. La sensibilidad se cuantifica por medio de índices como la distorsión armónica de corriente THDi, factor de atenuación (r_{att}), factor de agregación, valor eficaz de corriente, y magnitud y fase del espectro armónico del electrodoméstico.

Para la ejecución del estudio se simularon diferentes escenarios mediante una fuente programable de referencia Chroma 61511 y se tomaron mediciones de manera experimental a una muestra de cargas mediante un analizador de redes Dranetz PowerVisa. Una serie de pruebas fueron realizadas a cada electrodoméstico en las cuales se varía la señal de alimentación, distancia al punto de acople común y amplitud de la tensión.

Los resultados del análisis realizado a 1575 pruebas individuales muestran que alimentar un electrodoméstico con una señal de tensión distorsionada, Flat-Top, genera menor distorsión en la corriente que al alimentar el mismo electrodoméstico con una señal sinusoidal. Caso contrario sucede cuando un electrodoméstico es alimentado con una señal Pointed-Top, causa que la distorsión de corriente sea mayor.

Además se pudo observar que los electrodomésticos tienen mayor sensibilidad a cambios en la longitud del circuito ramal.

* Trabajo de grado

** Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas. Escuelas de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones. Director: César A. Duarte Gualdrón. Codirectores: Gabriel Ordóñez Plata, MSc. Gabriel Malagon

ABSTRACT

TITLE: STUDY OF SENSITIVITY HARMONIC DISTORTION ON SMALL APPLIANCES TO CHANGES IN AMPLITUDE AND VOLTAGE DISTORTION OF POWER SUPPLY *

AUTHORS: CRISTIAN MARTÍNEZ PABÓN, JOSE G. VELÁSQUEZ MAESTRE**

KEY WORDS: Harmonic distortion, harmonic spectrum, harmonics, power quality, power factor

DESCRIPTION: This paper aims to study the effect that voltage distortion has on current distortion. The study is conducted around the sensitivity that presents a sample of 15 appliances to variations in the supply voltage. The sensitivity is measured by comparison of rates as harmonic current distortion THDi, attenuation factor r_{att} , aggregation factor, RMS current, and magnitude and phase of the harmonic spectrum of appliance.

For the execution of the study, different sceneries were simulate by a programmable source Chroma 61511 and experimentally measurements were taken at a sample loads by a network analyzer Dranetz PowerVisa. A several test were performed on each appliance in which the signal power, distance to the point of common coupling and voltage amplitude.

The results of the analysis carried out 1575 individual test show that the deed an appliance with a distorted signal voltage, Flat-Top, creates less distortion in the current than the distortion creates when power the same appliance with a sinusoidal signal, the opposite happens with the Pointed-Top signal which produces more distortion. Otherwise happens when an appliance is supplied with a Pointed-Top signal causes distortion of current is the largest.

Besides, it was observed that the appliances are more sensitive to changes in the length of the branch circuit.

* Degree Work

** Faculty of physico-mechanical engineerings. Electrical, Electronic and Telecommunications Engineering School. Director: César A. Duarte Gualdrón. Co-Directors: Gabriel Ordóñez Plata y Gabriel Malagon

INTRODUCCIÓN

Este documento presenta el desarrollo del trabajo de grado en la modalidad de investigación bajo el título “Estudio de la sensibilidad de la distorsión armónica en pequeños artefactos ante variaciones de amplitud y distorsión en la tensión de la fuente de alimentación”, el cual busca realizar una evaluación de la distorsión armónica de cargas no lineales, en electrodomésticos menores. Asimismo, el trabajo está orientado al análisis de la sensibilidad en la respuesta de la corriente distorsionada frente a variaciones en la señal de tensión de alimentación.

Hoy en día, los electrodomésticos facilitan innumerables actividades humanas del quehacer de los hogares, permitiendo un ahorro de tiempo en su ejecución, simplificando las tareas cotidianas y posibilitando la realización de tareas, que por diferentes factores, no se podían hacer en el hogar de manera económicamente rentable. De esta manera, los electrodomésticos se han convertido en parte fundamental de nuestro diario vivir mejorando la calidad de vida de los hogares [1]. Su inserción en las viviendas ha sido un proceso progresivo que en sus inicios tomó mucho tiempo, pero que hoy en día se realiza masivamente, por ende el interés en estudiar los efectos en la distorsión en las redes eléctricas de baja tensión que estas cargas pudieran producir.

Los electrodomésticos desde su primera aparición a mediados del siglo XIX, han avanzado constantemente tanto en su operación como en su eficiencia, puesto que se han desarrollado avances en áreas como la electrónica de potencia que han permitido esto. De esta forma, han ido apareciendo cargas no lineales que causan distorsiones de corriente y de tensión, que pueden llegar a causar problemas en el sistema de distribución [2] y en consecuencia una disminución de la calidad de la potencia de las instalaciones de baja tensión donde se encuentran conectados estos y otros equipos.

Generalmente los electrodomésticos tienen una fuente de alimentación de modo conmutado, la desventaja de esta fuente es que ocasiona distorsión de la tensión y de la corriente. Esta distorsión se modela como una suma fasorial de armónicos, que dependiendo de la tecnología envuelta en la electrónica de potencia tienen un espectro similar, por ejemplo, tercer armónico (180 Hz), quinto armónico (300 Hz) y séptimo armónico (420 Hz), son armónicos comunes en cargas como electrodomésticos. De manera que esta distorsión, ocasiona daños tanto a las redes de eléctricas como a los equipos conectados a ella (especialmente los menos robustos), también producen un incremento en las pérdidas de energía, sobrecalentamiento de cables, transformadores y motores, corrientes excesivas en el neutro y fenómenos de resonancia [3] [4], [5] [6].

Actualmente se han desarrollado equipos sofisticados tales como fuentes programables y equipos de medida como el analizador de redes, los cuales permiten realizar diversos estudios para obtener cierto grado de conocimiento sobre los mismos y así lograr mitigar los efectos que producen. Es preciso resaltar que los armónicos son fenómenos del estado estable y no se deben confundir con los fenómenos transitorios.

Para el análisis propuesto en este trabajo de grado se realizaron pruebas de laboratorio con la fuente AC programable Chroma 61511 y equipos de medición de calidad de la

potencia como el Powervisa Dranetz. Además se diseñaron experimentos enfocados a modelar el comportamiento de las cargas ubicadas espacialmente dentro de una casa, a lo largo de un circuito ramal. Se abordaron aspectos sobre la evaluación armónica, como la atenuación, la agregación de cargas a un punto. Algunos descriptores utilizados para la evaluación de las señales como: la energía de la señal, corriente eficaz y THDi.

1. DEFINICIÓN DEL PROBLEMA

El uso cada vez más frecuente de los electrodomésticos en la mayoría de las actividades cotidianas, tiene una incidencia importante sobre la forma de onda de las señales de tensión y de corriente presentes en el sistema de distribución, afectando necesariamente sus valores eficaces y máximos, a pesar de que la distorsión aportada por un solo electrodoméstico no es lo suficientemente grande para ser considerada, un gran número de usuarios utilizando varios electrodomésticos por hogar, podría llegar a desatar un aumento significativo en la distorsión armónica [7].

Este comportamiento en la variación en la distorsión de corriente bajo nuevas condiciones de alimentación (amplitud y distorsión) y de carga constituye un problema de investigación que es necesario estudiar cuidadosamente.

Este trabajo de grado se ha orientado al estudio de la sensibilidad del espectro armónico de las señales de corriente de la carga, en electrodomésticos, teniendo en cuenta la magnitud del espectro y su ángulo de fase, frente a la variación y distorsión de las señales de tensión de alimentación. Para ello se realizaron experimentos y mediciones eléctricas, presentando un estudio comparativo frente a los cambios en la distorsión armónica que este tipo de cargas podrían introducir en las líneas de suministro eléctrico.

La principal característica por la cual se les denomina a los electrodomésticos como cargas no lineales corresponde a la distorsión que producen, tanto a la tensión como a la corriente del suministro eléctrico, pues poseen fuentes de alimentación que utilizan rectificadores de onda completa para la conversión de corriente alterna (CA) a corriente directa (DC).

Normas y estándares [8], proponen tolerancias permisibles para los niveles de distorsión armónica para diferentes niveles de tensión a fin de mantener la calidad en el suministro eléctrico. Asimismo, en [9] se establecen los límites para los armónicos de corriente en aquellos aparatos que consumen menos de 16 A por fase. En este trabajo de grado, se presenta un estudio de la respuesta en corriente producida por diversas cargas residenciales (que caen dentro de la clasificación dada por [9], como lo son los de la clase A y la clase D) frente a una variación en la distorsión y amplitud de la tensión de alimentación [10].

De los resultados obtenidos a partir de las pruebas realizadas en este trabajo de grado, se dará a conocer el comportamiento del espectro armónico de los electrodomésticos menores frente a las distintas condiciones de alimentación proporcionadas por la fuente Chroma (variación en amplitud y distorsión). Además se podrán observar los efectos en la corriente de carga y su espectro cuando son alimentados con una fuente con unos parámetros que no son los ideales para los cuales no fueron diseñados.

2. JUSTIFICACIÓN

Tres grupos importantes de cargas no lineales están conectados al sistema de baja tensión. El primer grupo contiene las lámparas fluorescentes compactas (CFLs), el segundo grupo involucra las cargas que utilizan el control por fase de tiristores para controlar la tensión de entrada y la potencia que recibe el dispositivo eléctrico, y el tercer grupo, en el cual se profundizó en este trabajo de grado, utiliza como fuente de alimentación un rectificador de puente de diodos con condensador de filtrado, o también llamada SMPS [10]. Este último tipo de cargas constituye un componente fundamental de la mayoría de los electrodomésticos que se encuentran en los hogares, por eso el gran interés en estudiarlos.

Este trabajo de grado se planteó con la idea fundamental de estudiar y dar a conocer, de una manera clara y concisa, el posible impacto que tienen las llamadas SMPSs en la red de baja tensión, a través del estudio de la distorsión armónica. De forma que el diseño de experimentos en laboratorio así como la realización de una serie de mediciones sobre algunos electrodomésticos y la evaluación de índices, como el THDi, pudieran permitir caracterizar el comportamiento de la distorsión de corriente.

Con los experimentos se espera realizar una caracterización inicial de los espectros en magnitud y ángulo de fase de la señal de corriente, de manera que deje entrever la posible aparición de patrones, la descripción del comportamiento de los armónicos, el factor de agregación y los índices de atenuación, energía de la señal de corriente, corriente eficaz y THDi en redes de baja tensión.

La evaluación de la sensibilidad del espectro armónico podría permitir realizar de una mejor manera el proceso de simulación, evaluación y predicción del impacto de las señales distorsionadas de tensión y corriente, y con ello la obtención de una disminución de los costos de diseño de los mecanismos de mitigación, la disminución de los errores en el sobre-dimensionamiento de conductores y transformadores, y el mejoramiento de la calidad de potencia y la operación de equipos conectados a la red.

3. OBJETIVOS

A continuación se presenta el objetivo general y los objetivos específicos planteados para llevar a cabo el proyecto de grado.

3.1. OBJETIVO GENERAL

Realizar el estudio de la sensibilidad del espectro armónico de cargas no lineales de electrodomésticos del hogar ante variaciones de amplitud y distorsión de la tensión de alimentación, mediante prácticas y análisis de laboratorio, realizadas con una fuente programable, equipos de medición de calidad de la energía y software de simulación.

3.2. OBJETIVOS ESPECIFICOS

Para el cumplimiento del objetivo general de la investigación se requiere:

- Definir la muestra de electrodomésticos para el análisis de los mismos, a partir de parámetros como. Pequeños artefactos con mayor presencia en los hogares, marcas más usadas, potencias y tensiones de operación entre otros.
- Definir un procedimiento para la realización de los experimentos en donde se contemplen los criterios para el ajuste de la fuente, el equipo de medida y conexión de los dispositivos.
- Establecer un procedimiento para el análisis de los datos obtenidos en la que se tengan en cuenta los criterios para los algoritmos de cálculo del espectro armónico (magnitud y ángulo de fase) e índices para la evaluación de los fenómenos de diversidad y atenuación.
- Cuantificar el impacto en el espectro armónico de la señal de corriente consumida por los electrodomésticos menores, debido a variaciones en la fuente de alimentación.

4. MARCO REFERENCIAL

En este capítulo se presentan los resultados de algunas investigaciones y antecedentes consultados que ratifican los conceptos básicos utilizados en la metodología, donde se describen los fundamentos y conceptos relacionados con: distorsión armónica, magnitud y ángulo de fase de los armónicos de la corriente de carga, el fenómeno de la atenuación, espectro armónico de señal de corriente y tensión de la carga, señales de alimentación distorsionadas como flat-top, pointed-top y utilización de equipos de laboratorio.

4.1. ELECTRODOMÉSTICOS

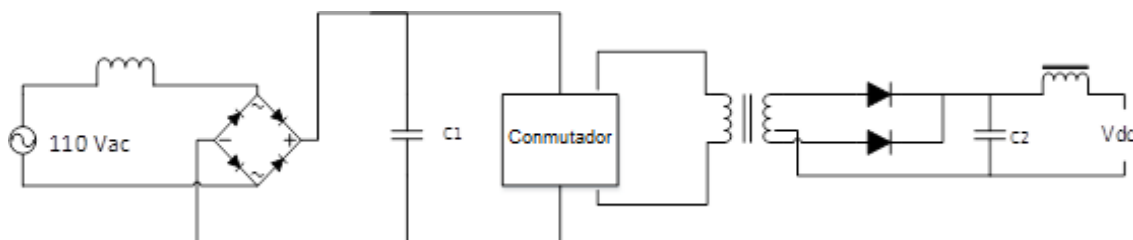
Los electrodomésticos son aparatos que además de agilizar y facilitar la realización de las actividades de la vida diaria, como cocinar, también ofrecen un medio de distracción y esparcimiento. Los electrodomésticos se clasifican según [9], en cuatro clases, A, B, C y D. Además de la clasificación otorgada por la norma IEC, anteriormente nombrada, los electrodomésticos se clasifican en tres líneas, la línea blanca, la línea marrón y pequeños electrodomésticos. En la línea blanca se incluyen aquellos aparatos que sirven para la cocina, el lavado, la refrigeración y la ventilación; aparatos de televisión, video y audio hacen parte de la línea marrón; mientras que las sandwicheras y otros electrodomésticos menores que son utilizados en la cocina, además de otros que se usan para el cuidado personal, pertenecen a los pequeños electrodomésticos.

4.2. SMPS (SWITH-MODE POWER SUPPLY)

Los hogares en la actualidad ya no son como solían ser hace 20 años, y al igual que estos, los electrodomésticos innovan con el paso del tiempo. Con el pasar de los años se han ido desarrollando avances tecnológicos que han permitido un mejor rendimiento, una mayor multifuncionalidad y un menor costo de fabricación. Este mejoramiento se ha hecho posible implementando una fuente de alimentación de modo conmutado, o por sus siglas en inglés, SMPS (Swith-Mode Power Supply), que consta de un circuito rectificador de puente de diodos y un condensador C1 en paralelo para disminuir la tensión de rizado [11]. La Figura 1 nos muestra una SMPS tradicional.

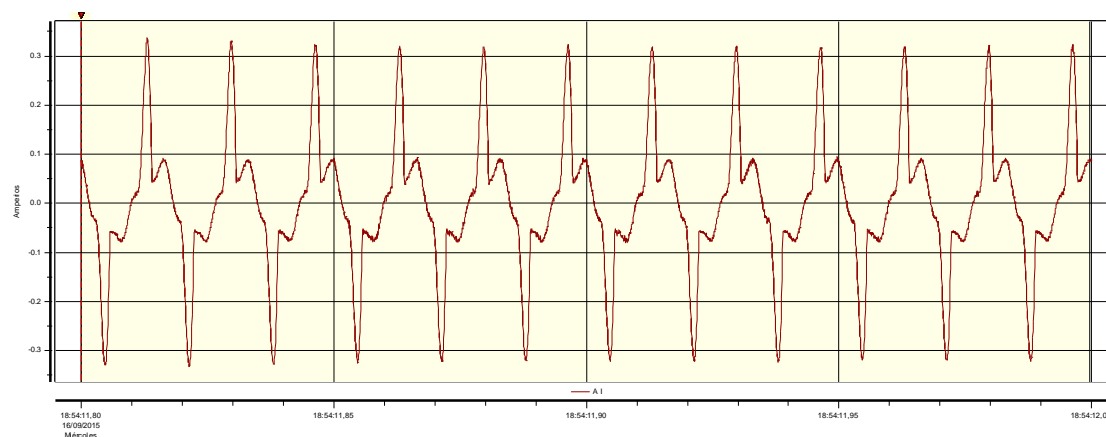
Los beneficios otorgados por este tipo de alimentación, van desde una mayor eficiencia energética hasta un aumento en el rango de tensiones de alimentación. La utilización de las SMPS genera grandes distorsiones en la corriente de entrada sobre todo cuando el valor del condensador C1 tiende a ser mayor, es decir, con un valor de capacitancia pequeño se logra que los armónicos presentes en la corriente de entrada disminuyan, pero a su vez la vida útil de los aparatos también disminuye porque se incrementa la tensión de rizado; en cambio, con un valor de C1 mayor, la tensión de rizado disminuye, haciendo menor el estrés eléctrico y prolongando la vida útil de los electrodomésticos, pero distorsiona la onda de corriente [7].

Figura 1. Diagrama circuital de una SMPS tradicional



Por tal razón la distorsión causada a la onda de corriente por las SMPS provocan que los electrodomésticos y toda carga que las utilice se conviertan en cargas no lineales. Las cargas no lineales producen armónicos de corriente que al interactuar con la impedancia del conductor de la red eléctrica producen a su vez distorsión de la tensión [12], en la Figura 2 se puede apreciar un ejemplo de una señal de corriente distorsionada producida por una SMPS de un equipo de sonido.

Figura 2. Forma de onda de la corriente producida por una SMPS de un equipo de sonido



Por otra parte se tiene que la distorsión armónica producida por una carga no lineal puede llegar a afectar a las demás cargas conectadas a la misma red de baja tensión, puesto que la señal de tensión de alimentación ya no es una señal de tensión sinusoidal pura para la cual fueron diseñadas estas cargas.

4.3. ARMONICOS

La norma [8] define un armónico como el contenido de la señal cuya frecuencia es un múltiplo entero de la frecuencia fundamental. Así, en un sistema de distribución de 60 Hz, como el considerado para este trabajo, una señal distorsionada con una frecuencia para cada orden armónico es expresada por la siguiente formula, donde n es un número natural mayor que 0:

$$f_{armónico} = n \times 60 \text{ Hz.} \quad (1)$$

Como se mencionaba anteriormente, el incremento en las pérdidas de potencia, sobrecalentamiento de transformadores y motores, corrientes excesivas por el neutro, etc., son problemas que trae la distorsión armónica producida por cargas residenciales no lineales. Estos problemas no son nuevos en el sistema energético, de hecho, dichas distorsiones y sus efectos han sido estudiadas y cuantificadas en varios documentos, entre los cuales se encuentra [3], en el cual se detallan algunos índices para cuantificar los niveles de distorsión armónica.

4.3.1. Índice de distorsión armónica total (THD). Uno de los índices más utilizados es la denominada distorsión armónica total, citada en la literatura anglosajona como THD (Total Harmonic Distortion), y aplicable tanto para corriente como para tensión. Este índice se define como la relación entre el valor eficaz del total de las componentes armónicas y el valor eficaz correspondiente a la componente fundamental. Varía entre 0 e infinito, siendo 0 cuando la onda analizada no presenta distorsión alguna. Así para la onda de corriente será [3]:

$$THD_I = \frac{\sqrt{\sum_{k=2}^{\infty} I_k^2}}{I_1} \times 100 \quad (2)$$

Donde:

k : número de armónico.

I_1 : valor eficaz de la onda fundamental de corriente.

I_k : valor eficaz del armónico k.

4.3.2. Factor de atenuación (FA). El impacto que tiene la distorsión de la tensión de alimentación se cuantifica por el factor de atenuación, que es la relación de la suma aritmética total en un armónico h en particular de una señal de tensión distorsionada, en comparación con el caso sinusoidal (caso de referencia). Este factor cuantifica que tanto varía la magnitud de cada orden de armónico de corriente cuando la carga es alimentada a tensión distorsionada, se hace inferior a uno, si el promedio de emisiones del conjunto considerado disminuye para un armónico en particular [13]. El índice para este trabajo se calculará para cada orden armónico.

$$r_{att}^{(k)} = \frac{I_{ARI-DISTORSIONADA}^{(k)}}{I_{ARI-SINUSOIDAL}^{(k)}} \quad (3)$$

Donde:

$I_{ARI-DISTORTED}^{(k)}$: Valor de corriente del orden armónico k con señal de tensión distorsionada.

$I_{ARI-SINUSOIDAL}^{(k)}$: Valor de corriente del orden armónico k con señal de tensión sinusoidal.

4.3.3. Factor de agregación (FAG). Este factor se define como la relación entre la suma fasorial de cada I_k de las distintas cargas acopladas al mismo punto y la suma de magnitudes de cada I_k de las cargas, como se ilustra a continuación.

$$FAG_k = \frac{\sum_{n=1}^C I_{k(n)}}{\sum_{n=1}^C |I_{k(n)}|} \quad (4)$$

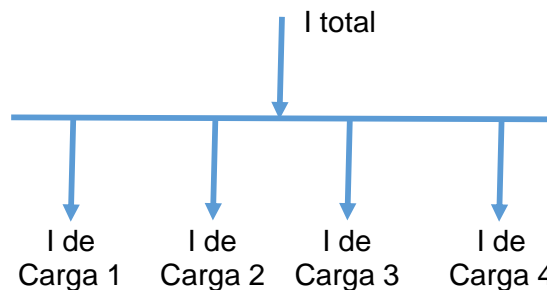
Donde:

$I_{k(n)}$: armónico k (magnitud y fase) de la carga n conectada al mismo punto.

C : número total de cargas conectadas al mismo punto

En la Figura 3 se puede observar un caso en el cual se podría obtener el FAG para la agregación de 4 cargas.

Figura 3. Cargas conectadas a un mismo circuito



Este factor da como resultado un fasor, para el cual la magnitud varía de 0 a 1 y la fase de 0° a 360° . Una magnitud menor a 1 en este factor indica que los desfases en las corrientes de las cargas son dispersos, mientras que una magnitud igual a 1 indica que los ángulos de las corrientes son iguales; una fase cercana a los 180° indica que los ángulos de las cargas están ubicados en su mayoría en el II y III cuadrante, mientras que una fase cercana a 0° indica que los ángulos están ubicados en su mayoría en el I y IV cuadrante. Cabe aclarar que lo afirmado anteriormente tiene validez cuando las cargas agregadas tienen magnitudes de armónicos parecidos, como se aprecia en este trabajo de grado.

4.4. ESTADO DEL ARTE

El tema relacionado con el estado del arte en este trabajo de grado, se centra en tres aspectos principales. El primer aspecto se enfoca en la adquisición de datos (medición) y tratamiento de datos, el segundo aspecto se centra en el estudio de cargas residenciales y el tercer aspecto en el estudio de cargas conectadas en paralelo. Adicionalmente se da a conocer el estado del arte en Colombia.

4.4.1. Medición y tratamiento de datos. La referencia [14] presenta un análisis detallado de cómo se debe realizar un adecuado monitoreo y medición de armónicos. En el estudio también se dan a conocer parámetros importantes a tener en cuenta a la hora de realizar la adquisición y tratamiento de las señales de tensión y corriente. Asimismo, describe la correcta ubicación de los sensores y registradores, frecuencia de muestro, intervalos de observación los cuales definen los datos correctos para el análisis.

De igual modo, [15] se da a conocer cómo deben ser las mediciones que se tomen a partir de un experimento, es decir, ilustra el funcionamiento de los ciclos de agregación según la clase de medida, clase A o clase S, también enseña un estudio detallado de la normatividad relacionada con los procesos de medición. Además de lo relacionado con la toma de datos, el trabajo provee una forma de tratamiento de datos, es decir, obtener las magnitudes y ángulos de los armónicos presentes a partir de la señal censada.

4.4.2. Referencias de cargas residenciales. [16] Elabora un análisis experimental y matemático para examinar las características de calidad de la energía de los electrodomésticos modernos. El análisis desarrollado es usado para predecir el comportamiento de las cargas cuando operan de forma individual y en conjunto. El experimento es realizado en el laboratorio mediante una fuente programable "*California Instruments MX30-3PI*" utilizada para simular diferentes formas de onda. Las cargas puestas a prueba fueron, televisores de varias tecnologías, computadores personales, aires acondicionados con velocidad variable e iluminación. Dentro de las variables analizadas en el estudio se encuentra la corriente RMS, desplazamiento del factor de potencia, distorsión armónica total de la corriente THD_i y orden de los armónicos presentes en la corriente (las magnitudes de los armónicos fueron obtenidas aplicando la transformada rápida de Fourier, FFT).

Asimismo, [11] analiza las características que tiene la corriente de entrada de algunos electrodomésticos, tales como televisores, computadores, CFLs, monitores, etc. El estudio se ha elaborado siguiendo la metodología adoptada [16].

Por otro lado, [12] presenta los resultados de la medición y el análisis armónico de electrodomésticos modernos, cuando son alimentados por ondas de tensión distorsionadas. En el trabajo, los autores utilizan índices como THD_i , THD_v o el factor de atenuación, para caracterizar el efecto de distorsión de la tensión en los armónicos de corriente. Los electrodomésticos bajo prueba incluyen computadores de escritorio y lámparas fluorescentes compactas. Por último, las conclusiones están orientadas a un mejor diseño y control de redes inteligentes.

El artículo [17] presenta un estudio realizado a cargas domésticas, en el cual se evalúa la distorsión que sufre la corriente de las mismas cuando son alimentadas con las tensiones distorsionadas que provienen de las redes de distribución residenciales. Para el estudio fueron medidos los ángulos y las amplitudes de los armónicos de diferentes electrodomésticos. El objetivo de la investigación fue analizar las características de la red de distribución con diversas cantidades de cargas no lineales.

Un análisis matemático del contenido armónico en la corriente de un circuito que representa una carga residencial no lineal es expuesto en [2]. Además, se presenta un estudio realizado de manera experimental en el que se da a conocer la contaminación armónica que este tipo de cargas introduce en las líneas de suministro eléctrico. El estudio experimental fue elaborado conectando en paralelo una variedad de electrodomésticos de diferentes marcas y modelos, los cuales fueron alimentados mediante el suministro de la red eléctrica y monitoreados mediante un analizador de armónicos “*Fluke 41*”.

En [18] se presenta una investigación realizada en Suecia con el fin de observar el impacto que sufre la onda de corriente cuando las lámparas incandescentes son reemplazadas por CFLs o LEDs. Para llevar a cabo el estudio, se elaboraron una serie de experimentos en los cuales se simulaban cargas residenciales alimentadas por la red de baja tensión. Las mediciones se tomaron a través de un “*Dranetz PX5*” y un “*Hioki Memory Recorder 8855*”, y los parámetros usados para medir el impacto fueron: potencia activa, potencia reactiva, THD y armónicos.

4.4.3. Los fenómenos de atenuación y diversidad. La Referencia [19], ilustra los cambios que sufre la onda de corriente cuando diferentes combinaciones de electrodomésticos son conectados con diferentes tipos de lámparas ahorradoras (LEDs y CFLs). Los cambios en la onda de corriente son analizados por medio de parámetros como armónicos, THD, FD, FA y a su vez comparados con los límites dados en las normas IEC 61000-3-12 e IEEE 519. Para la realización del estudio se elaboraron una serie de experimentos a escala real (simulando la distribución que tienen las cargas en una casa) en donde diferentes combinaciones de electrodomésticos eran conectados en paralelo a luminarias ahorradoras, que a su vez eran alimentadas por un transformador de 800[KVA] acoplado a la red de distribución; la medición fue realizada mediante un “*Dranetz PX5*”.

Por su parte en [20] se investiga la inclusión de los efectos de atenuación y diversidad en la evaluación de la distorsión armónica para los sistemas con fuentes de armónicos distribuidos. El estudio se elaboró conectando varias cargas, en este caso computadores personales (PCs), a la red de distribución y tomando mediciones en el punto común para todas las cargas. Para la investigación se usó el instrumento de medición “*Nicolet Data Recorder BE256-LE*”.

La Referencia [21] se centra en la caracterización armónica de las lámparas fluorescentes compactas modernas. En el trabajo se presenta un análisis experimental sobre el efecto de atenuación que sufren las CFLs. El análisis experimental es realizado sobre doce CFLs conectadas en paralelo y de forma individual. El experimento también cubre aspectos como el efecto de la distancia, desde la fuente hasta la carga, sobre la atenuación.

4.4.4. Estado del arte en Colombia. Para conocer el estado del arte en Colombia es necesario ver [22]. En esta tesis la autora quiere dar a conocer el impacto del alumbrado público con LEDs en las redes de distribución; para realizar esta investigación la autora involucra dos frentes de trabajo, el de modelación y simulación, y el de prueba experimental. Del trabajo se destaca la parte experimental debido a que es el tema de interés. Para llevar a cabo el experimento se puso a prueba tres tipos de luminarias y se alimentaron con la red de distribución eléctrica. Se revisaron parámetros como, tensión RMS, corriente RMS, potencia activa, factor de potencia, THD_i y THD_v, los cuales fueron tomados por medio de un analizador de potencia “Yocogawa WT1600” y “Fluke 123”.

Aunque algunas referencias citadas anteriormente no involucran un trabajo directo con electrodomésticos, tienen su cabida en este trabajo, debido al aporte que tienen estas investigaciones en el análisis del espectro armónico de cargas no lineales, y a que el comportamiento presentado por las lámparas CFLs y LEDs se asemeja al comportamiento presentado por cualquier otra carga que involucre SMPSs para su funcionamiento.

Como se pudo observar en los trabajos descritos, el uso de herramientas que faciliten el análisis es indispensable, ya sea para hacer pruebas experimentales (en las que se emplean aparatos de medición y fuentes de alimentación) o para realizar cálculos como la transformada rápida de Fourier, pues facilitan y agilizan el trabajo, logrando así llegar al resultado con un nivel de incertidumbre muy bajo.

4.5. FUENTE CHROMA

Para realizar el estudio de los electrodomésticos es necesario utilizar un equipo sofisticado y de un alto rendimiento que permita simular las condiciones de la señal de tensión de alimentación de forma sinusoidal pura y distorsionada. La Fuente de alimentación de CA marca CHROMA modelo 61511 puede simular una amplia gama de condiciones de alimentación, la fuente cuenta con DSP (microprocesador) encargado de generar la señal de salida, y una etapa de salida PWM que permite la potencia aparente en las cargas. Suministra una tensión de salida entre 0 y 300 VAC y frecuencia de salida de 15 Hz a 1500 Hz. Se puede obtener una señal de salida sinusoidal no estable con pérdida de ciclo, pico transitorio, atenuación de energía y con la distorsión típica menor de 0,3% a 50 / 60Hz. También se pueden proporcionar espectros armónicos, editar la forma de distorsión armónica y establecer componentes interarmónicos [23].

En el presente trabajo de grado, la fuente programable se usa para simular 3 diferentes formas de onda (sinusoidal, flat-top y pointed-top) a 7 tensiones distintas (5%, 3%, 1%, 0%, -1%, -3%, -5% de la tensión nominal), la fuente alimenta una muestra de 15 electrodomésticos, de a uno por vez, en 105 escenarios diferentes Figura 5, con el objeto de obtener la sensibilidad de los mismos ante variaciones en la tensión alimentación.

4.6. MATLAB

Es un software matemático que ofrece un entorno de desarrollo integrado (IDE) con un lenguaje de programación propio, su nombre viene de la abreviatura MATrix LABoratory (“laboratorio de matrices”). Entre sus aplicaciones se encuentran: la manipulación de matrices, la representación de datos y funciones, la implementación de algoritmos, la creación de interfaces de usuario (GUI) y la comunicación con programas en otros lenguajes y con otros dispositivos hardware.

Para el cumplimiento de los objetivos planteados para este trabajo de grado, su desarrollo aborda una etapa que es el tratamiento de las señales con algoritmos en el software Matlab, por ejemplo, para obtener el índice de distorsión total (THD) es necesario elaborar un programa, con extensión .mat, que primeramente halle la magnitud y fase de los armónicos, luego evalúe el índice THD y por último muestre los resultados en una gráfica de barras.

4.7. REGULACIÓN

La norma [24], es aplicable a la seguridad de los aparatos eléctricos para uso doméstico y propósitos similares, cuya tensión nominal no sea mayor de 250 V para aparatos monofásicos y 480 V, para otros aparatos. Esta norma trata sobre los riesgos comunes que las personas encuentran en los aparatos domésticos.

Con el creciente auge del comercio internacional y la globalización, algunos organismos internacionales han venido estandarizando algunos criterios en materia de calidad de potencia, orientadas específicamente a distorsión armónica, Por su parte, la norma [24] propone los porcentajes de distorsión de corriente para cargas no lineales y los niveles de referencia de distorsión que las compañías eléctricas pueden manejar en sus redes.

La normalización se recoge en normas nacionales como la NTC (Norma Técnica Colombiana), y en normas internacionales como la NEC (Código Eléctrico Nacional) que es de origen norteamericano y CENELEC (Comité Europeo de Normalización Electrotécnica) de origen europeo.

En Colombia, se definen estándares para la calidad de la potencia eléctrica en la resolución CREG 070-1998, CREG 024-2005, CREG 016-2007(modificación de CREG 024-2005), y todas ellas hacen referencia al estándar IEEE 519. Además Normas Técnicas Colombianas NTC 5000 y NTC 5001.

Por otro lado, los estándares IEC han sido en su mayoría adoptados por la Comunidad Europea (CENELEC), enmarcándose en las siguientes seis categorías que van desde la parte 1 (Generalidades) hasta la 6 (Varios). En concreto, la normativa relativa a armónicos se encuentra fundamentalmente en las categorías 2 (Ambiente – IEC 61000-2-xx) y 3 (Límites de emisión – IEC 61000-3-xx). En la categoría 4 (Técnicas de ensayo y de medida – IEC 61000-4-xx) aparece tanto armónicos como interarmónicos. Un análisis más detallado sobre el tema puede encontrarse en [25].

5. METODOLOGÍA

Conociendo los aspectos y la temática que aborda este trabajo de grado, a continuación se expondrá el procedimiento a usar para dar un óptimo cumplimiento a los objetivos planteados. El desarrollo del proyecto se realizó por fases, las cuales se citan como sigue: estudiar conocimientos previos acerca del tema, mediciones de prueba, mediciones en los diferentes escenarios planteados, tratamiento de las señales y conclusiones.

5.1. FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA

5.1.1. Estado del arte. Se realizó un estudio de los antecedentes, efectos de armónicos producidos por cargas no lineales y en general la temática correspondiente al proyecto planteado. Asimismo se hizo un estudio del uso de los dispositivos de medición que se emplearon y se revisaron las normas que rigen las técnicas de medición de los armónicos, y el uso de instrumentos para la medición de la calidad de la potencia.

5.1.2. Fuente programable y medidor de calidad de la potencia. Es primordial para toda investigación conocer y utilizar adecuadamente todos los equipos a utilizar. Para esta investigación fue necesario la utilización de fuente programable marca CHROMA modelo 61511, analizador de redes PowerVisa Dranetz, multímetro, osciloscopio y pinza amperimétrica; por ello se hace necesario leer cada uno de los manuales evitando así errores y daños durante la configuración de los diferentes experimentos y lesiones a quienes lo operan.

5.1.3. Selección y clasificación de los electrodomésticos. Con el fin de realizar un estudio representativo se debía hacer una selección adecuada de los electrodomésticos de prueba. Para realizar la selección de dichos electrodomésticos se consultó cuáles son las cargas electrónicas típicas en los hogares colombianos, teniendo en cuenta a cuales de estas se podía tener acceso, por disponibilidad y costos. Como resultado de esta consulta, se encontró que el departamento administrativo nacional de estadística ofrece información acerca de los electrodomésticos más utilizados por los colombianos, con base en una encuesta a nivel nacional.

Como se puede observar en la Tabla 1, los electrodomésticos que más presencia tienen en los hogares colombianos son: el TV convencional, el equipo de sonido y el DVD, seguidos del monitor, la fuente para PC de escritorio y computador portátil, estos datos fueron de gran relevancia debido a que basados en ellos se eligió la muestra a analizar.

Tabla 1. Porcentaje de hogares colombianos con dispositivos electrónicos.

Dispositivo	P (W)	Nacional (%)	Bogotá (%)
Microondas	1080	20.3	36.1

TV convencional	100	77.7	76.5
TV Plasma-Led	100	28.5	44.9
DVD	19	44.7	57.7
Equipo de sonido	75	47.4	58.8
Cámara de video	24	21.1	36.4
Monitor PC	48	26.1	39.7
Fuente de PC de escritorio	475	26.1	39.7
Computador portátil	93	23.3	36.7
Celular	15	94.7	96.3

Fuente. DANE, Encuesta nacional de calidad de vida 2013. [26]

Por otro lado, según [27], los dispositivos electrónicos tienen diferentes topologías internas de acuerdo a las características del circuito de corrección de factor de potencia (PFC). Esas topologías tienen una emisión de armónicos diferentes, cualitativamente hablando, así como un comportamiento en respuesta armónica de corriente diferente para diferentes tipos de distorsión de la tensión de alimentación.

De acuerdo a la topología del circuito de corrección del factor de potencia (PFC), las cargas se clasifican en, NO-PFC, PFC-pasivo y PFC-activo. Los dispositivos NO-PFC por lo general tienen un SMPS simple, que consta únicamente de un puente rectificador y un condensador de circuito intermedio, es decir, cargadores portátiles con potencia nominal inferior a 75W. Los dispositivos con PFC-pasivo tienen condensadores o inductores adicionales para mejorar la forma de onda actual. Por último, los dispositivos de bajo consumo modernos, como algunas fuentes de ordenador y cargadores para vehículos eléctricos utilizan un PFC-activo con diferentes convertidores DC-DC con el fin de obtener una forma de onda de corriente casi sinusoidal con una THDi generalmente por debajo del 10%.

Por otra parte, de acuerdo a la naturaleza y funcionalidad las cargas del hogar podrían clasificarse de la siguiente manera: [28]

- Dispositivos electrónicos (fuente de alimentación conmutada SMPS)
- Energía eficiente dispositivos de iluminación
- Cargas resistivas
- Cargas de motores conectados directamente

De esta forma, de acuerdo a la clasificación antes presentada y para este trabajo de grado en particular esto se profundizará en la categoría de dispositivos electrónicos y cargas de motores conectadas directamente.

5.1.3.1. Cargas electrónicas SMPS

De acuerdo a [28], la legislación en materia de distorsión armónica [29], introducida en 2001, ha dividido esta categoría de carga en varias subcategorías. Por ejemplo, SMPS de potencia nominal <75 W no tiene que cumplir con esta legislación.

Asimismo, los dispositivos con potencia nominal >75 W tienen para satisfacer los límites armónicos, e incluir componentes adicionales, que son “circuitos de corrección del factor de potencia (PFC)” generalmente así denominados.

Estos dispositivos son ampliamente utilizados y los ejemplos incluyen: computadoras personales (PCs), monitores, portátiles, televisores, reproductores de CD DVD, etc.

- TV

Los televisores se clasifican como primarios o secundarios, donde la televisión primaria es de un tamaño más grande. La potencia nominal de la televisión secundaria se asume menor a 75 W (SMPS de baja potencia NO-PFC).

Los Televisores primarios son de potencia mayor a 75 W, e incluyen alguna forma de PFC. Se supone que los televisores más antiguos usan PFC-pasivo, mientras que las nuevas tecnologías, es decir, los televisores LCD y Plasma, usan un PFC-activo.

- Decodificadores / DVD / CD / Cargas Vídeo

Se establecen que todos los decodificadores, reproductores de DVD /CD/ VIDEO son SMPS de baja potencia. Por lo tanto, estas cargas se asumen como SMPS NO-PFC.

- Cargas de Tecnología de la información y la comunicación

Incluyen dispositivos como: ordenadores, monitores, portátiles, impresoras y dispositivos de multifunción (MFD). Por lo general, la potencia nominal de los monitores utilizados en el sector residencial es menor a 75 W, y se asume como una carga SMPS no-PFC.

Los computadores de escritorio son SMPS de alta potencia y se supone que el 90% son de PFC-pasivo y el 10% son PFC-activo, mientras que las impresoras son PFC-pasivo. También se ha concluido que alrededor de 2/3 de las computadoras portátiles son no-PFC y 1/3 son PFC-activo.

5.1.3.2. Motor conectado directamente

Los motores de inducción monofásicos conectados directamente se utilizan en una amplia gama de aplicaciones en el sector de carga residencial, incluyendo: neveras, lavavajillas, licuadoras, toma de agua, lavadora, batidora, secadoras y congeladores. En este trabajo se asume tales dispositivos de acuerdo a esta clasificación.

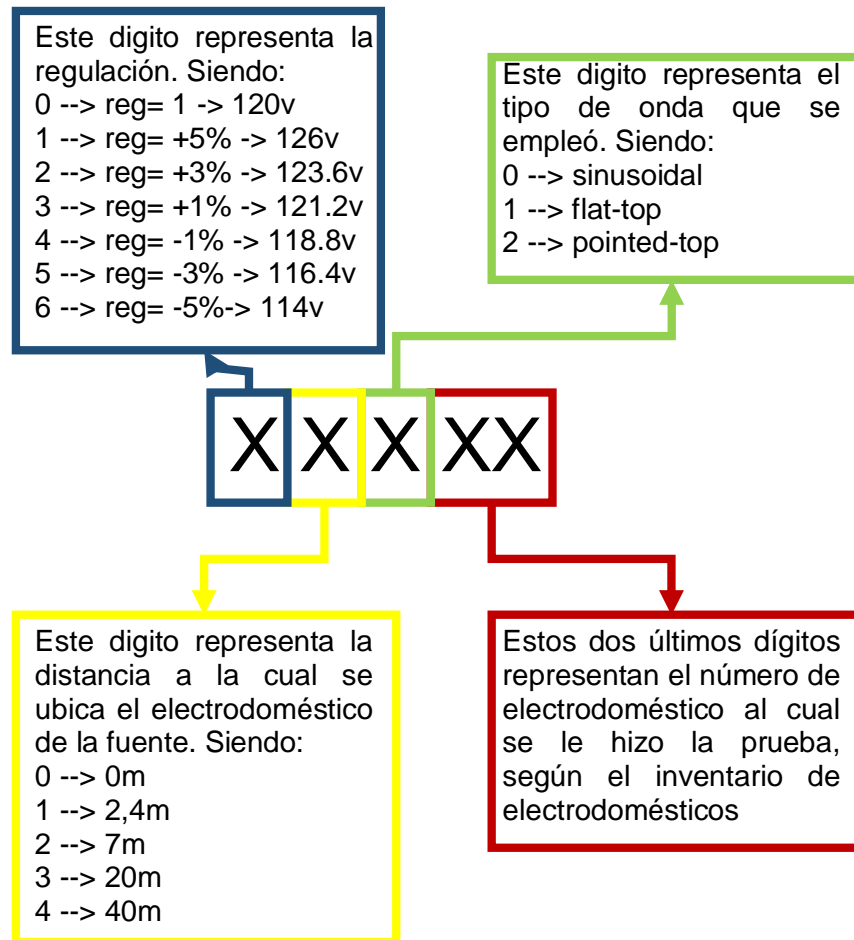
Tabla 2. Clasificación de los electrodomésticos seleccionados.

N°	Nombre	Marca	P (W)	V (V)	F (Hz)	I (A)	Topología
1	Reproductor de CD/DVD	SONY	9	110/240	50/60	-	NO-PFC
2	Equipo de sonido	PHILIPS	55	110/127	50/60	-	NO-PFC
3	Monitor de 19" - SyncMaster S19B150	SAMSUNG	20	100/240	50/60	0,7	NO-PFC
4	Monitor Flatron	LG	-	100/240	50/60	2	NO-PFC

5	Monitor de 24" - V241	HP	-	100/240	50/60	1	NO-PFC
6	Mac mini 1.33/2x512/80/COMBO/AP/BT- SPA	APPLE	110	100/240	50/60	2	P-PFC
7	Licudadora de 3 velocidades	Osterizer	600	127	60	-	MOTOR
8	Decodificador DSB-646CO- 58919	Telefónica	50	90/240	50/60	-	NO-PFC
9	Decodificador DSB-646CO- 58873	Telefónica	50	90/240	50/60	-	NO-PFC
10	Impresora - Photosmart C6280	HP	570	100/240	50/60	1,3	P-PFC
11	Batidora de 5 velocidades	Hamilton Beach	100	120	60	-	MOTOR
12	Portatil 2GHz, Intel Dual-Core, 4Gb	COMPAQ	-	100/240	50/60	1,7	NO-PFC
13	Portatil 2.2GHz, Intel i5-5200, 8Gb	LENOVO	65	100/240	50/60	1,8	NO-PFC
14	Televisor 21" - Trinitrom	SONY	90	120	60	-	P-PFC
15	Tablet Galaxy Note 2 - 16Gb	SAMSUNG	-	100/240	50/60	0,3	NO-PFC

Para la clasificación de las pruebas tomadas en el laboratorio se utilizó un número de 5 dígitos el cual representa la regulación, distancia, señal y número de electrodoméstico bajo prueba. La codificación del número se expone a continuación:

Figura 4. Número de clasificación de la pruebas



La distorsión armónica podría verse afectada por la distorsión de la tensión de alimentación y la variación de la distancia en los circuitos ramales. Con el fin de caracterizar el impacto que la distorsión de la tensión de alimentación y la distancia tienen sobre los armónicos de corriente, se realizaron una serie de experimentos de laboratorio los cuales se describen en la sección 5.3.

5.2. MEDIDAS PRELIMINARES

En esta fase del proyecto se buscó realizar una serie de mediciones iniciales con las que se pretende tener una referencia de cómo utilizar los equipos de medida y la fuente programable Chroma. Además se obtuvo una estimación del tiempo que se empleó al realizar una prueba, esto con el objetivo de definir los diferentes escenarios de evaluación para no exceder el tiempo de duración del proyecto. Para la realización de las medidas se adecuó el laboratorio, lo cual incluyó preparar los diferentes escenarios de prueba y hacer una instalación apropiada de la fuente programable Chroma a la red.

Las mediciones preliminares fueron realizadas a 15 electrodomésticos, los cuales fueron alimentados con tres tipos de señales diferentes: una sinusoidal, una pointed-top y una flat-top, configuradas en la fuente programable Chroma. En la sección 5.3.1 se explica el porqué de su elección.

Luego se tomaron mediciones por medio de un equipo analizador de red cuando los electrodomésticos se ubicaban a 0, 2.4, 7, 20 y 40 metros de distancia del punto de acople común y se variaba la tensión (5%, 3%, 1%, 0% -1%, -3%, -5% de la tensión fundamental). Las tensiones y distancias anteriores tienen su origen debido:

Tensiones:

- 0%, se quiso tener la referencia del comportamiento cuando la tensión no sufre variaciones en regulación.
- 5% y -5%, por norma (NTC 2050) la regulación máxima permitida para el sistema eléctrico, en condiciones normales, es de 5% y -5%.
- 3% y -3%, por norma (ESSA 2.1.4.2) los porcentajes de regulación máximos admitidos en redes de baja tensión en zonas urbanas son de 3% y -3% de la tensión nominal del sistema.
- 1% y -1%, se quiso establecer un valor intermedio de regulación para analizar que sucede con la corriente cuando se varía tan solo un 1% y -1% en la regulación.

Distancias:

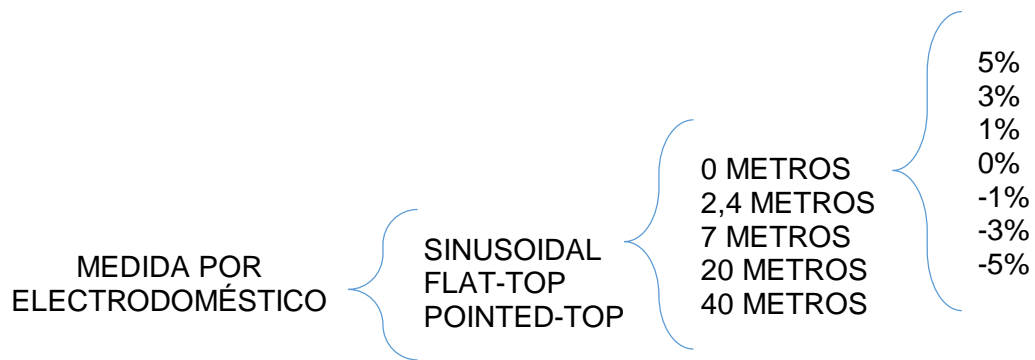
- 0 metros, se quiso tener una referencia del comportamiento en el punto de acople común.
- 2.4 metros, por norma (NTC 2050) en los hogares debe haber un tomacorriente cada 2.4 metros.
- 7 metros, es uno de los circuitos más cortos en un hogar.
- 20 metros, es la distancia del circuito más largo en un apartamento promedio (65 m²).
- 40 metros, es la distancia del circuito más largo en una casa promedio (150 m²).

Los resultados obtenidos fueron exportados a través de software Dran-View y procesados a través del software Matlab.

5.3. PROCEDIMIENTO PARA LA EJECUCIÓN DE LAS PRUEBAS

Ahora se explica el proceso mediante el cual se ejecutó las diferentes pruebas para cada uno de los escenarios planteados en el proyecto. Asimismo, se mostrará la configuración empleada para cada instrumento de medición tal como [26], la fuente programable Chroma y el equipo de la calidad de la potencia Dranetz, los cuales son utilizados para llevar a cabo las mediciones.

Figura 5. Organigrama de medida por electrodoméstico



En la Figura 5 se muestra las mediciones realizadas para cada electrodoméstico de la sección 5.1.3. A cada uno de ellos se les variaron parámetros como la distancia, la señal de alimentación, y la tensión.

5.3.1. Selección de la tensión de alimentación. La mayoría de los estudios que analizan la emisión armónica de cargas no lineales realizan modelos que usan una fuente de corriente ideal que representa el valor de corriente a frecuencias múltiplos de la fundamental. Estos modelos son de gran utilidad para representar el comportamiento de una carga no lineal, pero pueden conllevar a equivocaciones si no se especifican las condiciones del modelo, es decir, si no se especifica, por lo menos, para que tipo de onda de alimentación fue realizado, esto con el fin de obtener resultados que sean fácilmente comparables con los resultados de otras posibles investigaciones en la misma línea.

Para el análisis del conjunto de electrodomésticos fueron seleccionadas tres diferentes señales de tensión de alimentación, sinusoidal, flat top y pointed top. Estas distorsiones se eligieron de acuerdo a que en el sector residencial, la tensión muestra una distintiva forma de onda denominada "flat-top", causada por el uso masivo de rectificadores monofásicos, mientras que en el sector industrial la señal de tensión tiende a ser una "pointed-top" debido a la presencia masiva de rectificadores de seis pulsos en este sector. Para simular estos tipos de onda se utilizaron los primeros armónicos impares, magnitud y ángulo de fase, y la distorsión armónica total (THD) de las ondas de tensión [13].

Los valores obtenidos para estas señales provienen de las señales presentadas en [13], las cuales fueron obtenidas de mediciones realizadas a consumidores residenciales ubicados en diferentes redes de baja tensión de Alemania. Para cada consumidor se midió la magnitud y ángulo de fase de los primeros 50 armónicos durante una semana cada 30 minutos. En [30] se amplía la información acerca del experimento realizado.

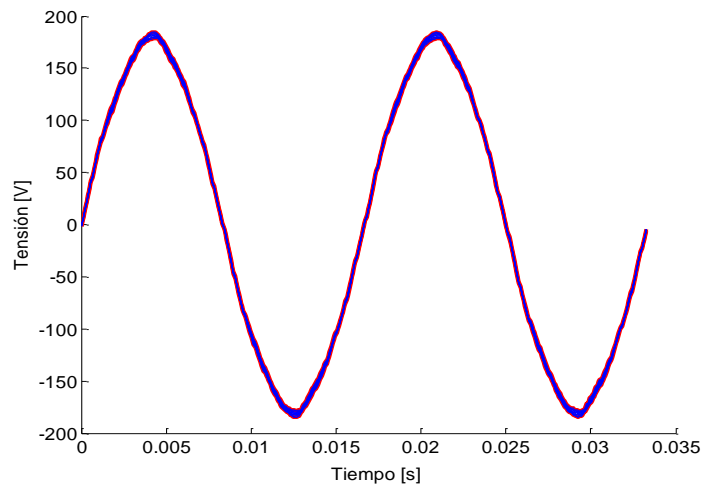
A pesar de que las señales planteadas en la referencia anterior están basadas en un sistema de 230 V 50 Hz estas fueron adaptadas para un sistema de distribución de 120 V (Tabla 3). De esta forma se decidió realizar este trabajo basado en las señales de la tabla mostrada a continuación, debido a que en Colombia no se tiene un estudio concreto que clasifique las ondas de tensión presentes en el sistema de distribución.

Tabla 3. Espectros de cada señal de tensión de alimentación

Armónico	Sinusoidal	Flat-top	%	Ángulos	Pointed-top	%	Ángulos
1	120	116,6087	97,17	0	120	100	0
3	-	2,7652	2,30	0	3,6528	3,0435	180
5	-	1,9304	1,61	180	3,6528	3,0435	0
7	-	1,0435	0,87	0	0,0574	0,0478	0

Asimismo, se decidió analizar la señal de tensión presente en el Laboratorio de Integración Energética del grupo GISEL, ubicado en el Parque Tecnológico de Guatiguará, con el ánimo de conocer el comportamiento que la onda de tensión presenta. Cabe resaltar que el análisis realizado no fue intensivo debido al tiempo y recursos disponibles. No obstante, este trabajo se realizó durante las horas comprendidas entre 7am y 9pm, para un solo día en particular, considerando así las horas de máxima demanda y algunas de mínima demanda. Las ondas de tensión obtenidas durante las distintas horas del día (color azul) se grafican en la Figura 6, junto con el límite máximo y mínimo (color rojo).

Figura 6. Ondas de tensión durante el día



Con base en los siguientes índices se concluyó que las variaciones que sufre la onda de tensión durante el día no son significativas, es decir, la variación que presenta un ciclo de la onda tomado a las 8:00am respecto un ciclo tomado a la 3:00pm es relativamente baja, tanto así, que la máxima variación del THDv es del 3%, del valor pico del 6%, del Vrms de 2.1% y de la energía de la señal de tensión del 4%.

$$V_{rms} = 126.2669 \pm 1.3246 \text{ [V]}$$

$$V.Pico = 182.0452 \pm 2.8219 \text{ [V]}$$

$$\text{Energía de la señal de tensión} = (15.9431 \pm 0.3331) \cdot e+03 \text{ [V}^2\text{]}$$

$$\text{THDv} = 1.829 \pm 0.277 \text{ [\%]}$$

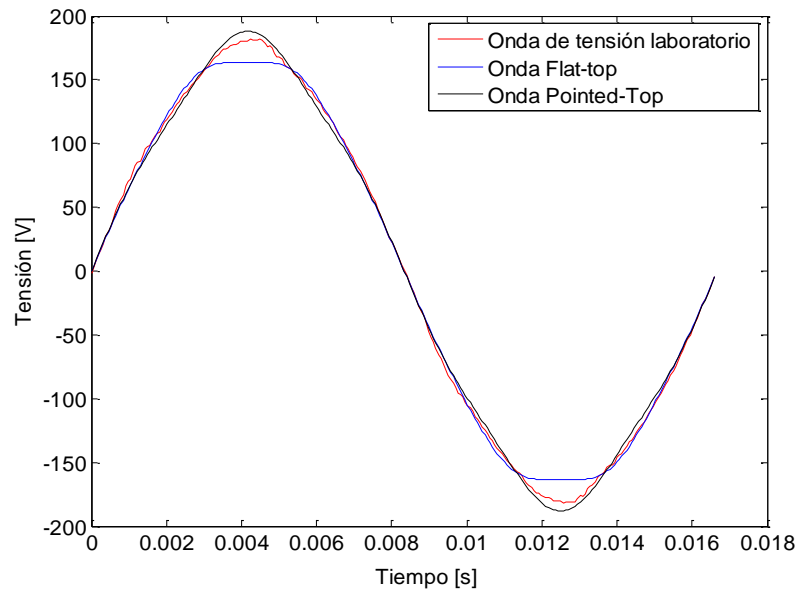
Figura 7. Onda de tensión promedio del laboratorio



Del análisis realizado se pudo obtener una señal promedio Figura 7, la cual da una estimación del comportamiento de la tensión durante el día. Este promedio se elaboró siguiendo el procedimiento expuesto en [31] para la agregación de ciclos.

Teniendo en cuenta lo propuesto anteriormente, se lleva a cabo la comparación entre la onda de tensión del laboratorio y los propuestos en [13];

Figura 8. Señal de tensión del laboratorio y señales Flat-top y Pointed-top



Índices de la señal de tensión del Laboratorio de Integración Energética del grupo GISEL.

$V_{rms} = 125.3918$ [V]

Energía de la señal de tensión = $15.7231e+03$ [V²]

THDv = 0.0230

V.pico= 181.75 [V]

Índices de distorsión total de tensión para las señales flat-top y pointed-top

THDv señal flat-top = 3.03%.

THDv señal Pointed-top = 4.30%.

Tabla 4. Espectro armónico de tensión del laboratorio

Armónico	Var.Tension [%]	Fase [Grados]
1	100	0
3	0,272	-103,232
5	2,112	-3,662
7	0,529	43.5013

Como se puede observar en la Figura 8, la tensión medida en el laboratorio tiende a tener la forma característica de la señal Pointed-Top, partiendo de esta suposición, se comparan los armónicos de la señal anterior, dados en la Tabla 4, con los armónicos expuestos en [13] (Tabla 3) para las señales Flat-Top y Pointed-Top.

Debido al comportamiento que presenta el ángulo fase y la magnitud en los diferentes armónicos, y la semejanza en las formas de onda expuestas en la Figura 8, se logró concluir que la onda de tensión presente en el laboratorio se asemeja a una onda Pointed-Top.

Por otro lado, para la obtención del procedimiento para la ejecución de las pruebas, se plantean dos escenarios de medición principales los cuales son planteados a continuación:

- ✓ Manteniendo la distancia al punto de acople común constante y variando el porcentaje de regulación (barrido en regulación).
- ✓ Fijando la tensión en un valor constante y variando la distancia del punto de acople común (barrido en distancia).

Cabe resaltar que estos dos escenarios de evaluación se realizan para cada señal de alimentación (sinusoidal, flat-top, pointed-top). De esta forma es posible hallar el número total de pruebas para un electrodoméstico el cual está dado por la siguiente expresión:

$$\text{Número total de pruebas por electrodomestico} = s * D * R \quad (5)$$

Dónde:

s= cantidad de señales

D= cantidad de distancias

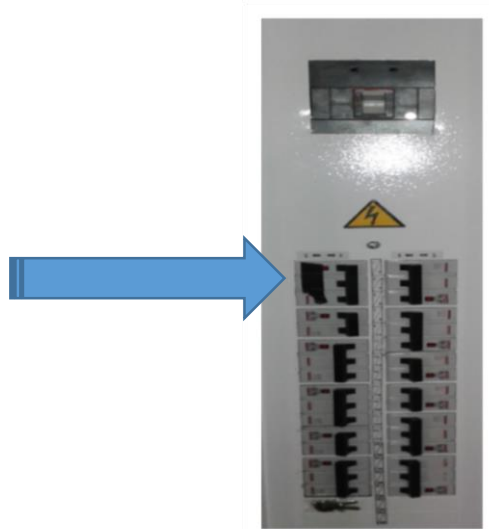
R= cantidad de variaciones en la tensión

Como resultado se tienen 105 pruebas por cada electrodoméstico, y para un total de 15 electrodomésticos se tienen 1575 pruebas.

5.3.2. Procedimiento para la realización de una prueba. Para la realización de las medidas es importante conocer cómo funcionan los equipos con los que se trabajarán, esto para la protección de los medidores y la integridad física de los operarios, por ello se dará una serie de pasos para llevar a cabo una prueba de forma correcta.

- Para energizar la fuente programable Chroma, el primer paso es activar el breaker trifásico de 50A del tablero de distribución TN A308 ubicado en el cuarto de servicios. (Figura 9)

Figura 9. Tablero de distribución TN A308 que energiza la fuente, y los demás circuitos del laboratorio.



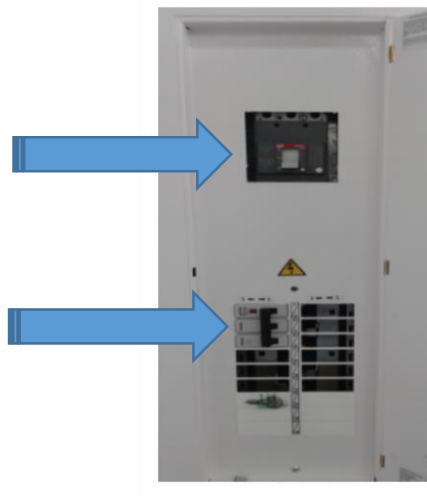
- Después de haber energizado el breaker trifásico, del paso anterior, se puede proceder a encender la fuente Chroma, se le establecerá la configuración creada para el tipo de señal objeto de prueba, esta configuración y procedimiento para el set en la fuente se explica en el ANEXO A con más detalle.

Figura 10. Imagen pantalla y botones de mando de la fuente programable Chroma.



- Luego se procede a activar el totalizador trifásico de 40A y el breaker trifásico de 30A del tablero de distribución principal situado aguas abajo de la fuente Chroma, dentro del laboratorio (Figura 11), esto con el objeto de alimentar el tablero de conexión.

Figura 11. Automáticos de corte del tablero que esta aguas abajo de la fuente Chroma



- A continuación se procede a conectar el electrodoméstico a medir al circuito ramal, mediante un conector diseñado para acoplar las pinzas de tensión, la pinza de corriente del PowerVisa y permitir aumentar o disminuir la longitud del circuito ramal, tal y como lo muestra la siguiente imagen.

Figura 12. Conexión del electrodoméstico al montaje



- Luego se procede a conectar el equipo medidor de la calidad de la energía PowerVisa, al cual se le establecerá la configuración creada para la obtención de la mayor cantidad de eventos mediante la definición de umbrales, de forma que el equipo permita obtener las formas de onda de las señales, a través del muestreo de los diferentes ciclos durante el evento. La configuración y su elaboración será explicada en el ANEXO B más detalladamente.

Figura 13. Medidor de la calidad de la energía PowerVisa.

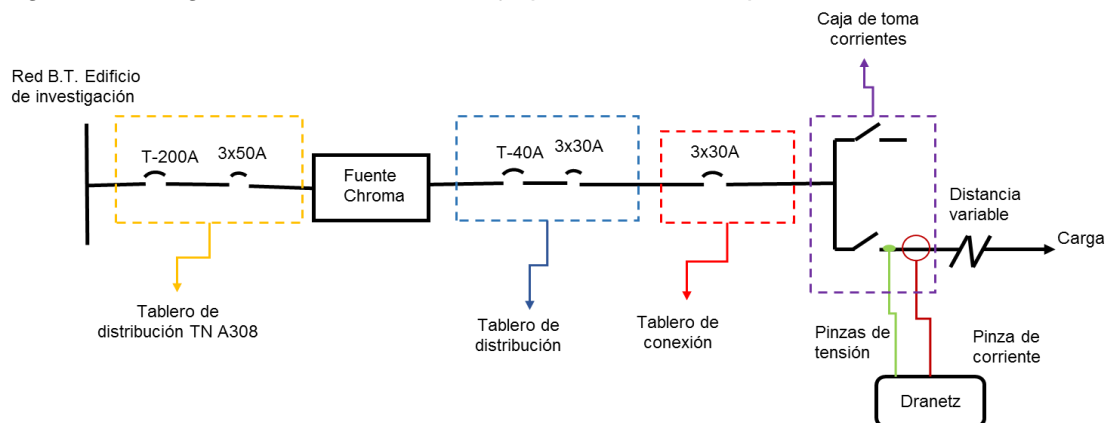


- Se continúa con la conexión del equipo medidor de la calidad de la energía con la carga seleccionada. En la Figura 14 se puede apreciar el medidor PowerVisa conectado a la carga seleccionada, en este caso un monitor de 24". El medidor está conectado por medio de las pinzas de tensión y corriente a la carga de acuerdo a la Figura 15 , en donde podemos observar el diagrama unifilar del circuito utilizado para la realización de los diferentes escenarios de prueba.

Figura 14. Medidor PowerVisa conectado a la carga a medir.



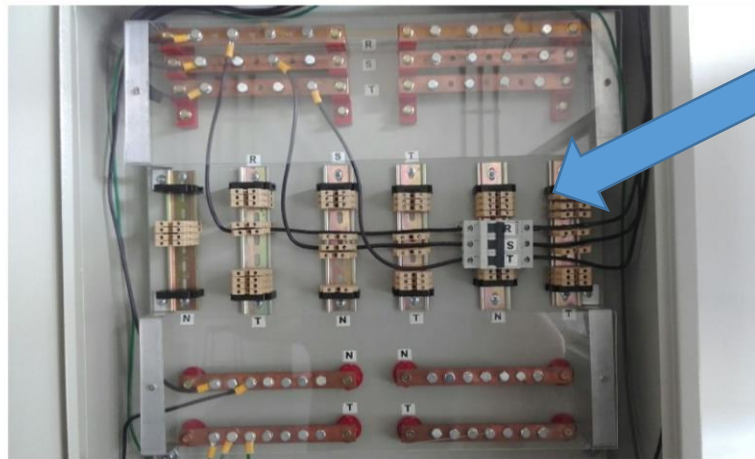
Figura 15. Diagrama unifilar del montaje para realizar las pruebas



- Antes de terminar, se procede a alimentar la carga, enviando la señal de tensión de alimentación de la fuente programable Chroma hacia la carga, mediante el botón OUT/QUIT (botón azul)

- *Figura 10*), el cual eleva la tensión progresivamente hasta el valor fijado evaluando posibles errores de conexión en un valor de tensión pequeño.
- Por último se energiza el breaker trifásico de 30A, ubicado en el tablero de conexión (*Figura 16*). Seguido de esto, se enciende el electrodoméstico y se inicia la recopilación de datos por medio del medidor PowerVisa.

Figura 16. Tablero de conexión



Cabe recordar que la posición de todas las protecciones mostradas en la Figura 15, debe ser generalmente en estado cerrado u off mientras no se trabaje con la fuente, de forma que se recomienda al finalizar el trabajo con la fuente bajar las protecciones y dejar todo debidamente organizado.

5.3.3. Tiempo necesario para realizar una prueba. Antes de comenzar a tomar las mediciones en cada escenario, los electrodomésticos permanecen encendidos por lo menos 10 segundos, esto con el ánimo de que ningún transitorio vaya a afectar la medición. Este procedimiento se aborda según lo indica la norma [9] numeral 6.2.3.3.

Luego se procede a obtener las señales de cada prueba por medio del software Dran-View. El número de muestras obtenidas de cada prueba debe representar al menos 180 ciclos de la onda (unas 46080 muestras aproximadamente, debido a que el medidor PowerVisa arroja 256 muestras por ciclo). Se escogen 180 ciclos (o 150 ciclos para 50Hz) de acuerdo a los ciclos de agregación que ilustra el estándar [31]

Con lo mencionado anteriormente se necesitarán 15 ventanas de observación con 12 ciclos cada una, esto para generar los 180 ciclos que se requiere para cumplir con el estándar [31]. Con las medidas preliminares se determinó que el instrumento de medición PowerVisa se demoraba 20 segundos en tomar las 46080 muestras necesarias. Teniendo en cuenta el error del instrumento en empezar a medir y del operario se estableció que la duración de cada medida debía ser de 30 segundos

$$t_{total} = 20 + 30 = 50 \text{ seg} \quad (5)$$

Este sería el tiempo necesario para realizar una medición.

5.4. ADQUISICIÓN DE MUESTRAS DE LAS SEÑALES

En esta etapa se procede a adquirir las muestras de las medidas realizadas, para ello se utiliza la herramienta Dran-View, los pasos para llevar a cabo este proceso se ilustran como sigue:

Primero se procede a organizar los archivos .DDB, es decir, que los archivos relacionados con las mediciones realizadas a los 15 electrodomésticos queden debidamente organizados en subcarpetas que representan la onda y la distancia a la cual se toman las pruebas.

Luego se procede a obtener la señal muestreada de cada prueba por medio del software Dran-View, el número de muestras obtenidas de cada prueba debe representar 180 ciclos de la onda (unas 46080 muestras, debido a que el analizador de redes utilizado toma 256 muestras por ciclo). Se escogen 180 ciclos (o 150 ciclos para 50Hz) de acuerdo a la metodología propuesta por ciclos de agregación que ilustra la norma [31].

Para organizar los datos medidos y almacenados durante la adquisición es importante conocer la herramienta con la cual trabaja el equipo Dranetz (Dran-View), esto con el objetivo de realizar una buena administración de los datos. Por lo anterior, se da una serie de pasos de cómo se lleva a cabo el almacenamiento de la muestra del electrodoméstico 1 (DVD).

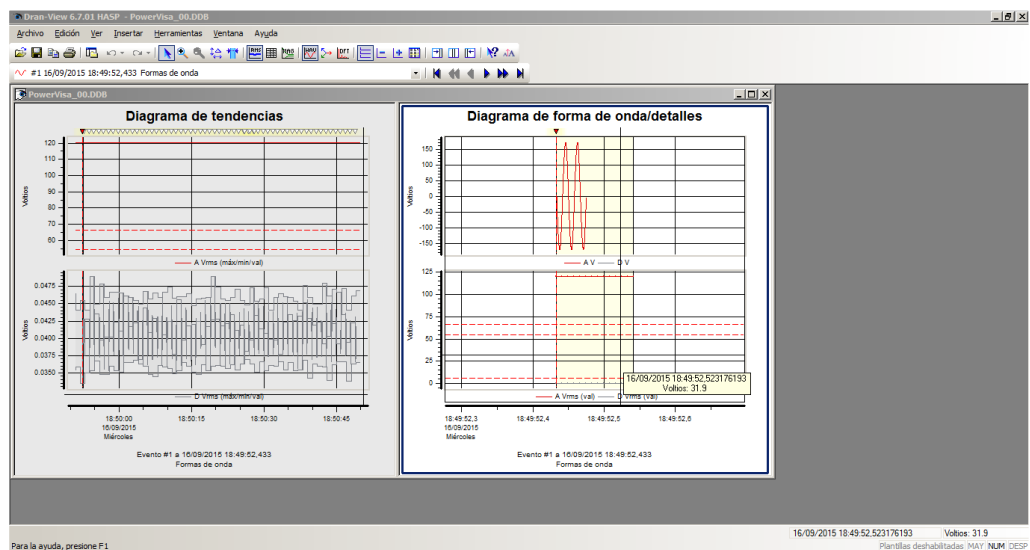
Nota: El programa Dran-View posee una tarjeta HASP, la cual es una llave electrónica similar a una tarjeta USB que sirve para evitar la redistribución y piratería del software original.

Figura 17. Tarjeta HASP del Dranetz



- **Paso 1:** Acoplar la llave HASP en el puerto USB
- **Paso 2:** Se procede a abrir la prueba a analizar en el programa Dran-View

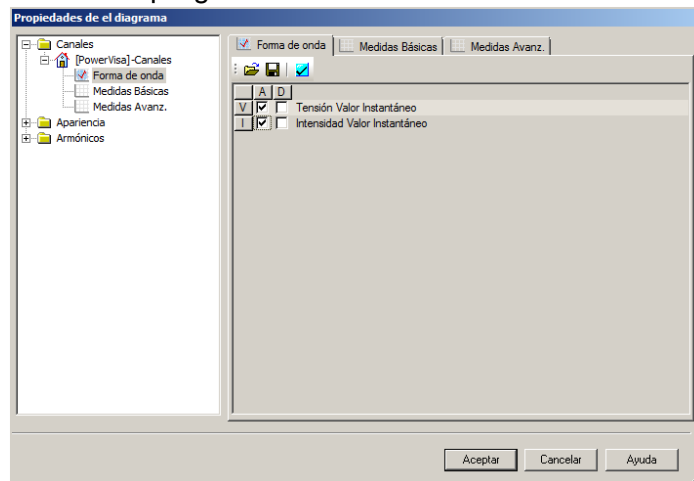
Figura 18. Pantalla de inicio Dran-View. Prueba del Electrodoméstico 01



En la Figura 18, se observa la pantalla que despliega el programa Dran-View al ser abierto, donde se muestran dos diagramas, uno de forma de onda y otro de tendencias.

- **Paso 3:** Se procede a dar clic en la opción propiedades del diagrama y seleccionar los parámetros de medida que se desean observar.

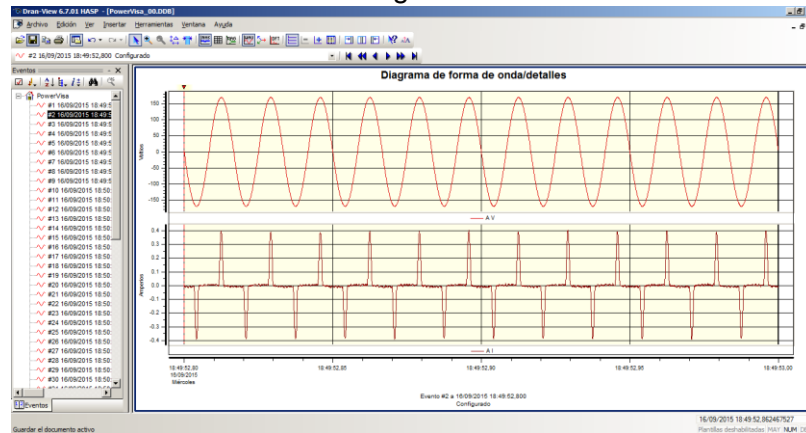
Figura 19. Propiedades del programa



En la Figura 19, propiedades del diagrama, se ven las variables seleccionadas que se desean observar como: valor instantáneo de la tensión del canal A y D y valor instantáneo de la corriente del canal A y D, para este caso en particular nos interesa valor instantáneo de la tensión del canal A y valor instantáneo de la corriente del canal A, seguido de esto se da clic en aceptar.

- **Paso 4:** Se procede a ejecuta la opción Alternar Barra Eventos, para observar todas las ventanas de observación con los distintos eventos guardados.

Figura 20. Ventana de 12 ciclos de los diagramas de las formas de ondas.



En la Figura 20, se observa la forma de la señal de tensión y corriente seleccionadas, así como todos los eventos almacenados que se despliegan al oprimir la opción Alternar Barra Eventos.

- **Paso 5:** Luego se procede a seleccionar las 15 ventanas de 12 ciclos.

En la

Figura 21 se observa la agrupación de las 15 ventanas de 12 ciclos seleccionadas una vez se ha escogido el tiempo inicial y final dando doble clic en el eje del tiempo de la gráfica.

- **Paso 6:** Luego de tener seleccionadas las 15 ventanas se procede a listar los datos en la opción Lista de Datos.

Figura 21. Congregación de 15 ventanas

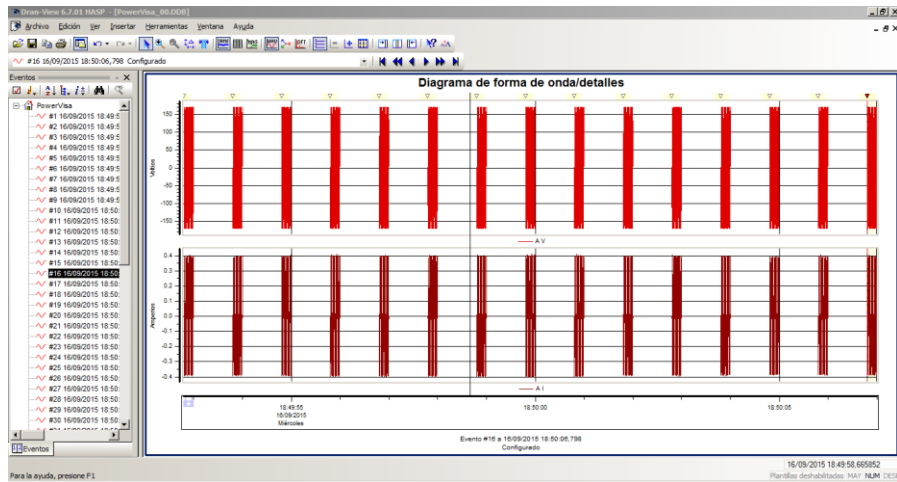
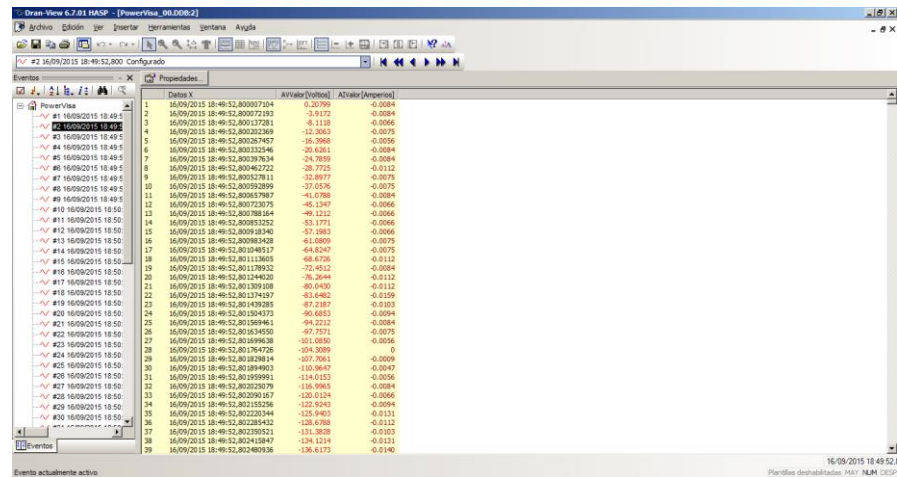


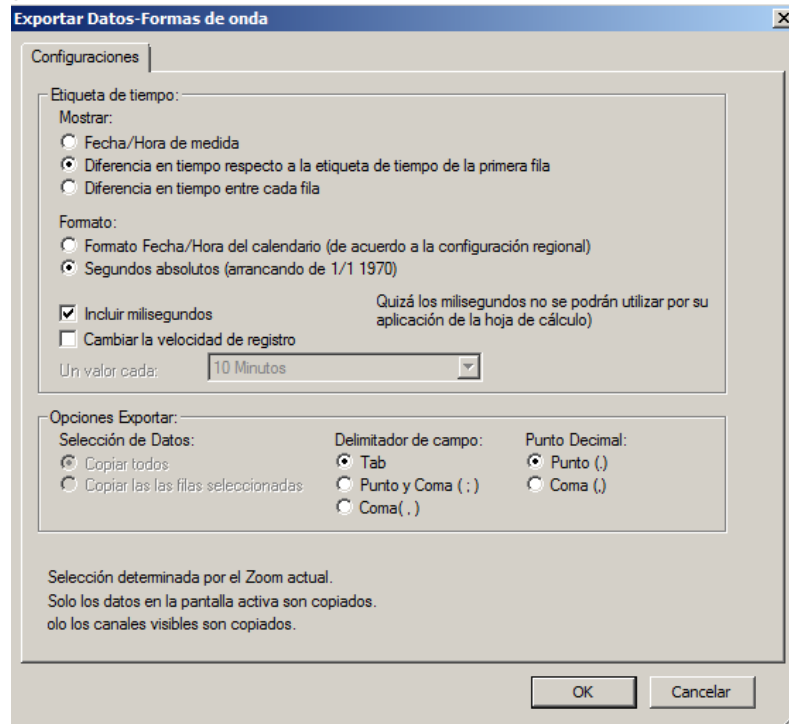
Figura 22. Lista de datos



En la Figura 22, se observan los valores medidos de tensión y corriente al desplegar la opción Lista de Datos.

Paso 7: Se procede a exportar los datos en la opción guardar como.

Figura 23. Exportar datos. Forma de onda



En la Figura 23 se observa la selección de los parámetros establecidos para la configuración de exportar los datos. Este procedimiento fue realizado para las 1575 pruebas, con una duración estimada de 3 segundos por prueba.

5.5. ANÁLISIS DE DATOS, FORMULACION DE INDICES Y COMPARACIÓN DE RESULTADOS

Para el análisis de los datos obtenidos a partir de los diferentes algoritmos, se procede analizar algunos índices como la distorsión armónica total THD, índice de diversidad, índice de agregación, energía, los cuales permiten evidenciar el comportamiento del espectro armónico de las señales. Para ello se propone realizar casos de estudios como los citados a continuación:

- Caso de estudio 1: Este caso de estudio tiene como fin determinar hasta cual armónico es conveniente trabajar, esto con el objetivo de disminuir los tiempos de análisis sin llegar a incurrir en errores en los resultados. De esta manera, se fijó que la energía de la señal reconstruida a partir de las magnitudes y ángulos de fase de los armónicos de corrientes considerados deben recuperar por lo menos el 97% de la energía de la señal original. Se espera que la mayor parte de la energía este contenida en los primeros armónicos, en otras palabras, que el armónico limite esté entre el 11 y el 15.

- Caso de estudio 2: Este caso se elabora con el objetivo de analizar la desviación que poseen los datos a lo largo de la medición, es decir, se comparan los resultados de las diferentes ventanas de observación de 12 ciclos para un periodo de 3 s; para así concluir, si es o no necesario analizar las 15 ventanas de observación de 12 ciclos.
Además, se presenta la sensibilidad de la corriente de un electrodoméstico cuando este sufre cambios en su temperatura de funcionamiento (se calienta). De este experimento se espera un incremento en la corriente, debido a que los componentes electrónicos del electrodoméstico aumentan su temperatura de funcionamiento aumentando así el consumo de corriente.
- Caso de estudio 3: Este caso de estudio tiene como finalidad ver la sensibilidad que presenta la distorsión de corriente frente a las variaciones de la señal de tensión y distancia del punto de acople común. Se espera que las variaciones de tensión sean mayores que las variaciones en la longitud del circuito, debido a que el cambio en la magnitud de la tensión es menor para las diferentes distancias.
- Caso de estudio 4: Este caso de estudio tiene como fin determinar el comportamiento del índice de distorsión armónica total THDi para los casos en que se varía la longitud del circuito ramal y en los que se varía la tensión de alimentación, y ver como se ve afectada la sensibilidad de los mismos. Para este caso se espera que el índice THDi no sobrepase el 100%, porque se supone que la magnitud de las distorsiones no deben superar la de la fundamental.
- Caso de estudio 5: Este caso se aborda la variación que tiene la onda de corriente de los diferentes electrodomésticos, frente a cambios en las condiciones de alimentación y distancia al punto de acople común. Se espera que la señal de corriente con mayor energía sea la originada por una alimentación pointed-top debido a que es la señal con mayor energía.
- Caso de estudio 6: Este caso de estudio tiene como objetivo determinar el comportamiento que tiene el espectro armónico en magnitud y fase de cada electrodoméstico variando la distancia del punto de acople común, la señal de tensión de alimentación y manteniendo el porcentaje de regulación constante en 0%. Para este caso se espera que a mayor distancia los armónicos aumenten su magnitud y el ángulo de fase cambie.
- Caso de estudio 7: Este caso tiene como objetivo principal determinar el comportamiento que tiene el espectro armónico en magnitud y fase de cada electrodoméstico cuando se varía la tensión, las señales de alimentación y fijando la distancia del punto de acople común a 0 m. Para este caso de estudio no se puede generalizar un comportamiento debido a que este es impredecible por tratarse de cargas no lineales.
- Caso de estudio 8: Este caso se realizó con el propósito de determinar el tipo de corrección del factor de potencia que poseen los electrodomésticos, y así comparar los resultados presentados en [27]. Este estudio se elaboró para los casos de estudio 6 y 7, mencionados anteriormente. De acuerdo a las potencias de los electrodomésticos, se espera que estos sean NO-PFC.

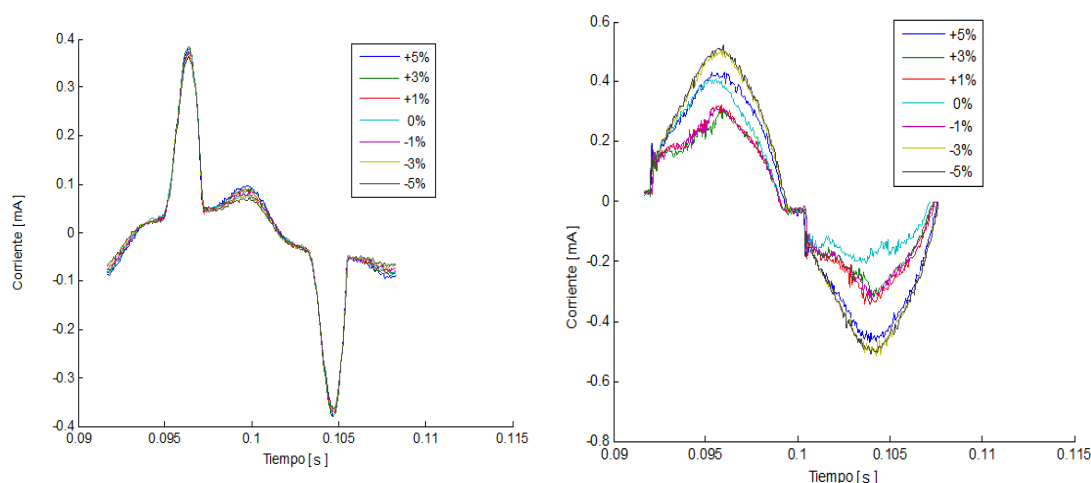
- Caso de estudio 9: Este caso de estudio compara la respuesta a la señal de tensión de alimentación tipo flat-top y pointed-top, que tienen los electrodomésticos, con respecto a la respuesta que se presenta con la señal seno. Además se calcula la variación del factor cuando se varía la tensión de alimentación y la distancia al punto de acople. Se espera que el factor de atenuación, para cada armónico, sea mayor que uno, porque se supone que si se alimentó con una señal pura la respuesta va a tender a un THDi bajo.
- Caso de estudio 10: Este caso se elabora con el fin de observar cuál es el comportamiento de la corriente total resultante de la agregación de cargas a un mismo punto. Para ello se elaboran 5 diferentes grupos de carga, los cuales se basan en electrodomésticos de la misma topología y electrodomésticos que usualmente se encuentran acoplados a un mismo circuito ramal. Se espera que para una agrupación de cargas del mismo tipo el factor sea cercano a uno, mientras que para cargas de distintos tipos el factor sea cercano a cero, porque se supone que las cargas del mismo tipo arrojan ángulos de fase parecidos los cuales no producen cancelación.

Finalmente se espera que mediante el análisis de los diferentes resultados de los casos de estudio y el análisis de tablas, índices y gráficas se pueda observar el posible comportamiento del espectro de corriente, esto frente a cambios en la amplitud y distorsión de la señal de tensión de alimentación, asimismo se espera pueda comprender de una mejor manera el comportamiento de los índices frente a cambio de parámetros como la longitud de los circuitos ramales y la cantidad de electrodomésticos conectados con referencia al punto de acople común.

6. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En este capítulo se explican detalladamente los resultados obtenidos de la realización de las pruebas, con base en los algoritmos realizados en Matlab y el cálculo de algunos índices para caracterizar las señales medidas y su espectro armónico como son: la magnitud y fase de corriente, la sensibilidad del espectro frente a la variación de tensión, sensibilidad del espectro frente a la variación de longitud del circuito ramal, valores eficaces de las señales, energía, además de otros índices como la distorsión armónica total, el factor de atenuación y el factor de agregación.

Figura 24. Corrientes de dos electrodomésticos analizados en este trabajo, alimentados con una señal sinusoidal a 0 metros del punto de acople común y en barrido de tensión



(a) Equipo de sonido

(b) Computador Mac mini

Las corrientes de los electrodomésticos faltantes se pueden ver en el ANEXO C.

6.1. CASO DE ESTUDIO 1

En este caso de estudio, se pretende encontrar hasta qué orden de armónico se representa mejor la señal real, es decir, que tan similar es la señal reconstruida a partir de los armónicos respecto a la señal original. Para hallar la aproximación que la onda generada tiene a la original, se usa como indicador la energía de la señal.

El procedimiento necesario para el cálculo del armónico límite es expuesto a continuación:

- Se eligen tres pruebas diferentes para cada electrodoméstico, donde cada prueba escogida debe ser resultado de un tipo de onda diferente y donde la distancia y regulación a la cual se hizo la prueba es aleatoria.
- Para cada prueba elegida, se halla la energía de la señal de corriente a partir de las muestras tomadas y resultado se fija como la energía de referencia, luego se procede a hallar la energía de la señal reconstruida cuando se desprecian armónicos, finalmente se encuentra el armónico para el cual la energía de la señal reconstruida es mayor al 97% de la energía de referencia.
- El armónico límite para cada prueba es almacenado en una tabla, como la mostrada a continuación, para posteriormente hallar el armónico de mayor orden.

Tabla 5. Orden de armónico para el cual la energía de la señal de corriente es recuperada, por lo menos, en un 97%

Electrodoméstico	Tipo de onda		
	Seno	Flat Top	Pointed Top
1	10	8	12
2	4	4	6
3	16	18	20
4	8	10	10
5	10	12	12
6	17	18	20
7	1	1	2
8	16	16	20
9	16	17	20
10	19	19	20
11	2	2	2
12	18	18	20
13	20	20	20
14	10	10	14
15	10	12	12

Con base en la tabla anterior se logró determinar que el armónico hasta el cual se debía analizar era el 21, esto debido a que era el armónico impar siguiente al armónico mostrado por la tabla, si se llegase a escoger el armónico impar anterior habría una señal para la cual la reconstrucción no recuperaría el 97% de la energía de la señal original.

6.2. CASO DE ESTUDIO 2

Se decidió analizar la onda de corriente de varias pruebas, escogidas aleatoriamente, en búsqueda de la variación que se produce en los armónicos cuando estos son calculados para distintas ventanas de observación, es decir, se buscó cuantificar qué tan dispersos se encontraban los datos de cada armónico, obtenido a partir de la ventana de observación de 12 ciclos, respecto a ese mismo armónico obtenido para la ventana de observación de 180 ciclos siguiendo el procedimiento de los ciclos de agregación.

En la siguiente tabla se muestran los resultados obtenidos de la prueba realizada al monitor led de 24" cuando es alimentado con la señal de tensión sinusoidal a distancia 0[m], en ella se especifica el orden de armónico, la magnitud y fase que cada armónico tendría si este fuese calculado para una ventana de 180 ciclos. Además también se especifica la desviación estándar, en magnitud y fase, que los armónicos tuvieron cuando se calcularon para las 15 ventanas, de 12 ciclos, por aparte.

Tabla 6. Valores de magnitud y ángulo promedio con las desviaciones respectivas

Armónico	Magnitud [mA]	Desvest magnitud [mA]	Angulo [°]	Desvest ángulo [°]
1	222,386	0,120	104,453	0,036
3	201,674	0,122	-62,315	0,096
5	177,413	0,112	136,653	0,161
7	145,662	0,112	-23,747	0,230
9	110,085	0,165	177,368	0,327
11	75,190	0,204	21,446	0,472
13	45,342	0,263	-127,784	0,738
15	25,729	0,301	99,567	0,847
17	20,873	0,370	-17,723	1,154
19	22,943	0,224	-150,557	0,739
21	22,485	0,150	62,792	0,905

De lo anterior se logró concluir que la variación sufrida por los armónicos se considera despreciable, esta hipótesis se aprecia con más claridad en los armónicos inferiores en los cuales la variación es cercana a milésima parte del valor considerado como verdadero (Columna 2, Tabla 6).

Por otro lado, se tiene una prueba de estabilización realizada a varios electrodomésticos, la cual se elaboró con el objetivo de comparar el comportamiento de la corriente y la variación de los armónicos a través del calentamiento de los electrodomésticos, los resultados y la realización del experimento se muestran a continuación.

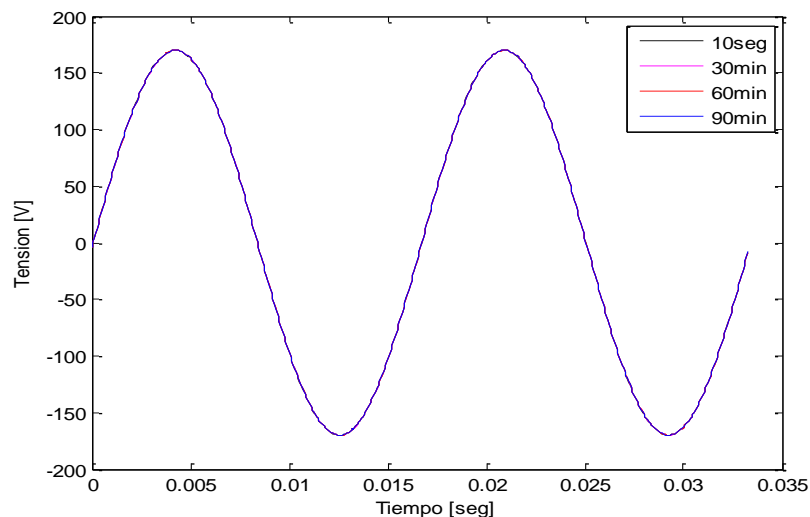
El experimento para la realización de la prueba de estabilización le fue ejecutado al electrodoméstico 5, este fue conectado a 0 metros del punto de acople común y alimentado con una onda sinusoidal con 0% de regulación; el electrodoméstico 5 se

trata de un monitor LED de 24" conectado a un computador mostrando una imagen fija. El procedimiento para la toma de datos fue el siguiente:

- Se enciende el electrodoméstico y 10 segundos después se comienza la toma de medidas durante 15 segundos, transcurrido este tiempo se deja medir pero el electrodoméstico sigue encendido.
- 30 minutos después de la medida anterior, se toman medidas durante 15 segundos y transcurrido este tiempo se deja medir pero el electrodoméstico sigue encendido, esto se repite hasta que el electrodoméstico tiene un tiempo de encendido total de 90 minutos (4 tomas de datos).

Como se puede apreciar en la Figura 25, la tensión de alimentación es constante durante toda la prueba de estabilización, esto da un grado de confiabilidad necesario para analizar los cambios en corriente que se presentan en el electrodoméstico.

Figura 25. Ondas de tensión de alimentación de las pruebas de estabilización



En la Figura 26, se muestra la variación de la corriente a través del tiempo de estabilización, en ella podemos ver que para un tiempo de estabilización alrededor de los 90 minutos el valor pico de la corriente se ve disminuido en un 40%. Además se observa que la onda de corriente a los 90 minutos es la más distorsionada de las cuatro. Algunos índices que dicen más acerca de este comportamiento son expuestos en la Tabla 7.

Figura 26. Ondas de corriente de las pruebas de estabilización

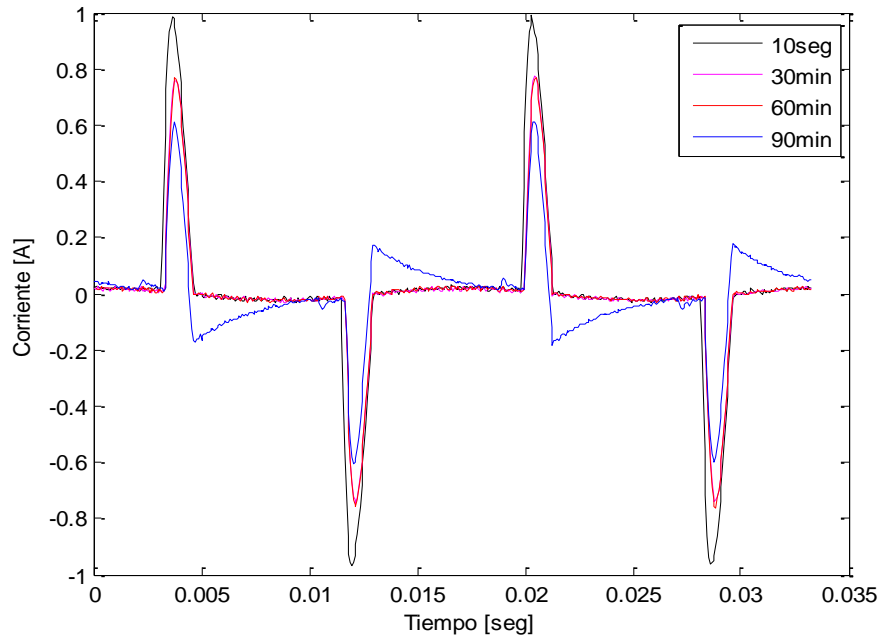
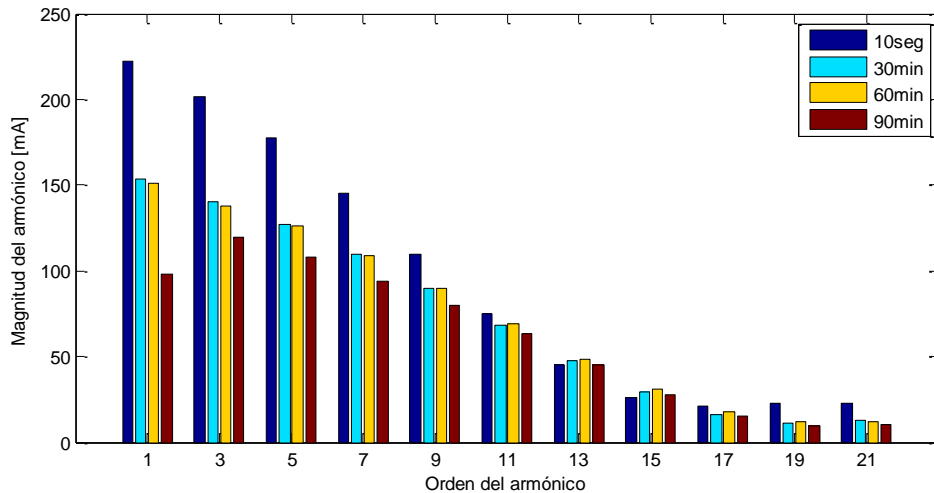


Tabla 7. Comparativos de la prueba de estabilización

	10 seg	30 min	60 min	90 min
Tension [Vrms]	120,166	120,166	120,166	120,166
Corriente [Arms]	0,288	0,210	0,209	0,171
Potencia [W]	18,288	12,606	12,419	3,948
F.P.	0,529	0,499	0,495	0,192
THDv	1,5255	1,6533	1,6673	2,2487

El comportamiento de la magnitud de los armónicos a medida que el tiempo de estabilización es mayor se expone en la Figura 27, en ella se observar que para todos los armónicos el mayor es el fundamental, excepto para el tiempo de 90 minutos para el cual el armónico más grande es el tercero.

Figura 27. Magnitud de los armónicos frente a variaciones en el tiempo de estabilización



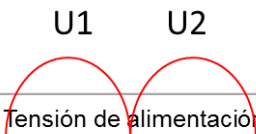
6.3. CASO DE ESTUDIO 3

En esta sección se exponen los resultados de la sensibilidad que presenta la energía de la señal de corriente, el valor eficaz de la corriente y la magnitud de los armónicos, cuando se varía la distancia del circuito ramal y la tensión, a continuación son expuestas las gráficas de la variación que sufren los parámetros. Ver tablas de sensibilidad ANEXO D.

El cálculo de la sensibilidad se realizó siguiendo el procedimiento descrito a continuación. El ejemplo considerado halla la sensibilidad del primer armónico de un electrodoméstico frente a variaciones del 1% en la tensión de alimentación.

- Se identifican las columnas que tienen entre sí un 1% de diferencia en la tensión de alimentación, que para este caso es U1 (1% y 0%) y U2 (0% y -1%) Ver Tabla 8.

Tabla 8. Magnitud de los armónicos a variaciones en la tensión de alimentación, grupos U1 y U2



Orden Armo. [A]	Tensión de alimentación						
	5%	3%	1%	0%	-1%	-3%	-5%
1	0,0868	0,0883	0,0898	0,0945	0,0917	0,0961	0,0930
3	0,0791	0,0803	0,0815	0,0858	0,0837	0,0869	0,0845
5	0,0700	0,0711	0,0720	0,0749	0,0731	0,0756	0,0737
7	0,0585	0,0592	0,0595	0,0611	0,0600	0,0611	0,0598
9	0,0449	0,0454	0,0452	0,0453	0,0449	0,0450	0,0444
11	0,0313	0,0312	0,0305	0,0298	0,0301	0,0290	0,0286
13	0,0186	0,0184	0,0173	0,0163	0,0167	0,0156	0,0160
15	0,0082	0,0074	0,0067	0,0056	0,0059	0,0049	0,0049
17	0,0002	0,0003	0,0007	0,0015	0,0018	0,0022	0,0017
19	0,0044	0,0046	0,0049	0,0054	0,0051	0,0056	0,0053
21	0,0062	0,0062	0,0063	0,0062	0,0063	0,0063	0,0059

- A continuación, se halla el valor absoluto de la diferencia entre el primer armónico a 1% y el primer armónico a 0%. Ver Tabla 9.

$$|0,0898 - 0,0945| = 0,0047$$

Tabla 9. Magnitud de los armónicos a variaciones en la tensión de alimentación, primer armónico a 1% y el primer armónico a 0%

Orden Armo. [A]	Tensión de alimentación						
	5%	3%	1%	0%	-1%	-3%	-5%
1	0,0868	0,0883	0,0898	0,0945	0,0917	0,0961	0,0930
3	0,0791	0,0803	0,0815	0,0858	0,0837	0,0869	0,0845
5	0,0700	0,0711	0,0720	0,0749	0,0731	0,0756	0,0737
7	0,0585	0,0592	0,0595	0,0611	0,0600	0,0611	0,0598
9	0,0449	0,0454	0,0452	0,0453	0,0449	0,0450	0,0444
11	0,0313	0,0312	0,0305	0,0298	0,0301	0,0290	0,0286
13	0,0186	0,0184	0,0173	0,0163	0,0167	0,0156	0,0160
15	0,0082	0,0074	0,0067	0,0056	0,0059	0,0049	0,0049
17	0,0002	0,0003	0,0007	0,0015	0,0018	0,0022	0,0017
19	0,0044	0,0046	0,0049	0,0054	0,0051	0,0056	0,0053
21	0,0062	0,0062	0,0063	0,0062	0,0063	0,0063	0,0059

- Luego, se realiza el paso anterior para el primer armónico a 0% y el primer armónico a -1%. Tabla 10.

$$|0,0945 - 0,0917| = 0,0028$$

Tabla 10. Diferencias absolutas de los grupos U1 y U2

Orden armónico	U1	U2
1	0,0047	0,0028

- Finalmente, después de tener todas la diferencia absolutas, se procede a hallar la media y la desviación estándar de los valores antes hallados. Tabla 11.

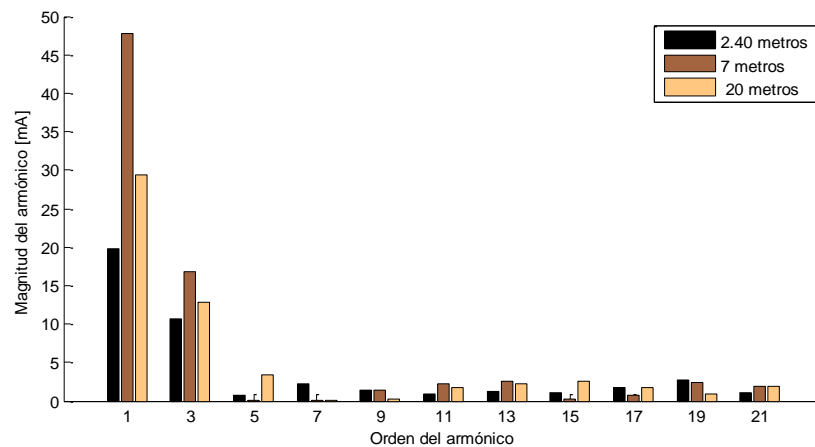
Tabla 11. Media y desviación estándar de las diferencias absolutas

Orden armónico	U1	U2	Media	Desv. Estandandar
1	0,0047	0,0028	0,00375	0,00134

El valor de la media, indica la sensibilidad que tiene el electrodoméstico frente a variaciones del 1% en la tensión de entrada, mientras la desviación estándar indica la incertidumbre de la sensibilidad.

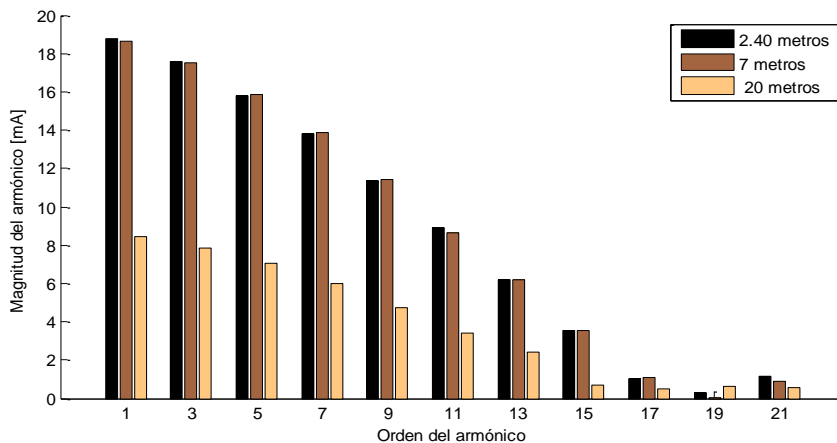
6.3.1. Sensibilidad ante variaciones en la distancia del circuito ramal. Para la variación de la distancia del circuito ramal se fijaron variaciones de 2.4 metros, 7 metros y 20 metros. Los casos analizados fueron, a) aumenta de 0 a 2.4 metros, b) aumento de 0 a 7 metros y c) aumento de 0 a 20 metros y de 20 a 40 metros.

Figura 28. Sensibilidad de los armónicos del electrodoméstico 7 (licuadora) a variaciones de longitud del circuito ramal, cuando es alimentado a regulación del 0% y con forma de onda sinusoidal



En la Figura 28, se observa la variación que tiene la magnitud de cada armónico cuando la distancia al punto de acople común cambia, por ejemplo, cuando la distancia del acople común cambia de 0 a 2.4 [m], la magnitud del primer armónico varía de 1.7898[A] a 1.7699[A], es decir, tiene una sensibilidad de 19.85 [mA]. La variación en magnitud que presenta este electrodoméstico es poco significativo para variaciones de la distancia, ya que este valor de corriente no supera el 10% de la corriente nominal de la licuadora en ninguna de las distancias medidas.

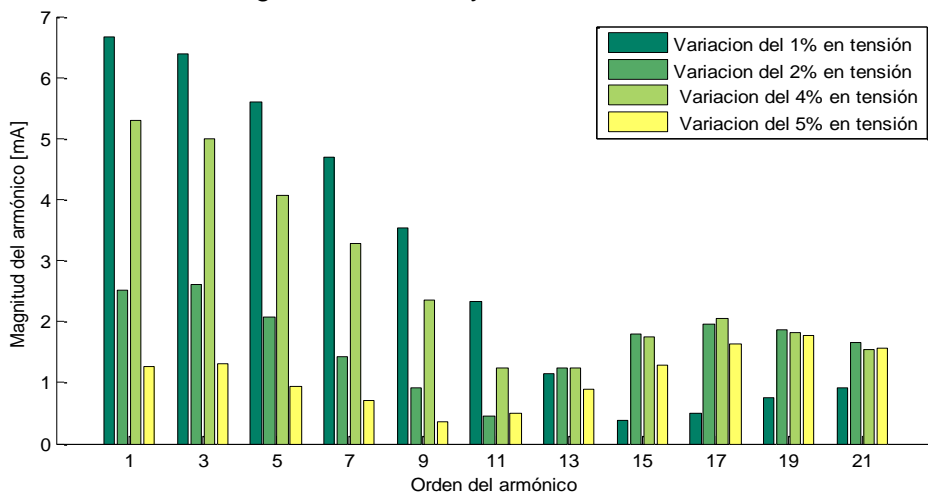
Figura 29. Sensibilidad del electrodoméstico 9 (decodificador) a variaciones de longitud del circuito ramal, cuando es alimentado a regulación del 0% y con forma de onda sinusoidal



Para el caso de sensibilidad del electrodoméstico 9, la corriente eficaz del electrodoméstico pasa de 112.5[mA] a 93.2[mA], para una variación en la distancia de 2.4 [m], es decir, la sensibilidad en la corriente eficaz es de 19,35[mA]. Ver *Tabla 16*

6.3.2. Sensibilidad ante variaciones en la tensión de alimentación. Para la variación de la tensión se fijaron variaciones de 1%, 2%, 4% y 5%.

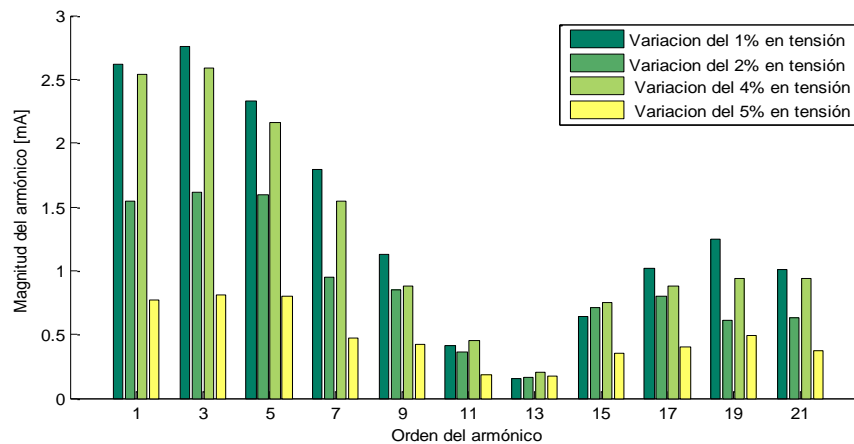
Figura 30. Sensibilidad del electrodoméstico 3 (monitor 19") a variaciones de tensión, cuando es alimentado a regulación del 0% y con forma de onda sinusoidal



En la Figura 30, se observa la variación que tiene la magnitud de cada armónico cuando la tensión de entrada cambia, por ejemplo, cuando la tensión de entrada cambia un 1%, la magnitud del primer armónico, tiene una sensibilidad de 6.65 [mA]. Se aprecia un

cambio insignificante en la sensibilidad de la magnitud de los armónicos de corriente, ya que este valor varía poco con respecto a la corriente nominal del electrodoméstico.

Figura 31. Sensibilidad del electrodoméstico 9 (decodificador) a variaciones de tensión, cuando es alimentado a regulación del 0% y con forma de onda sinusoidal



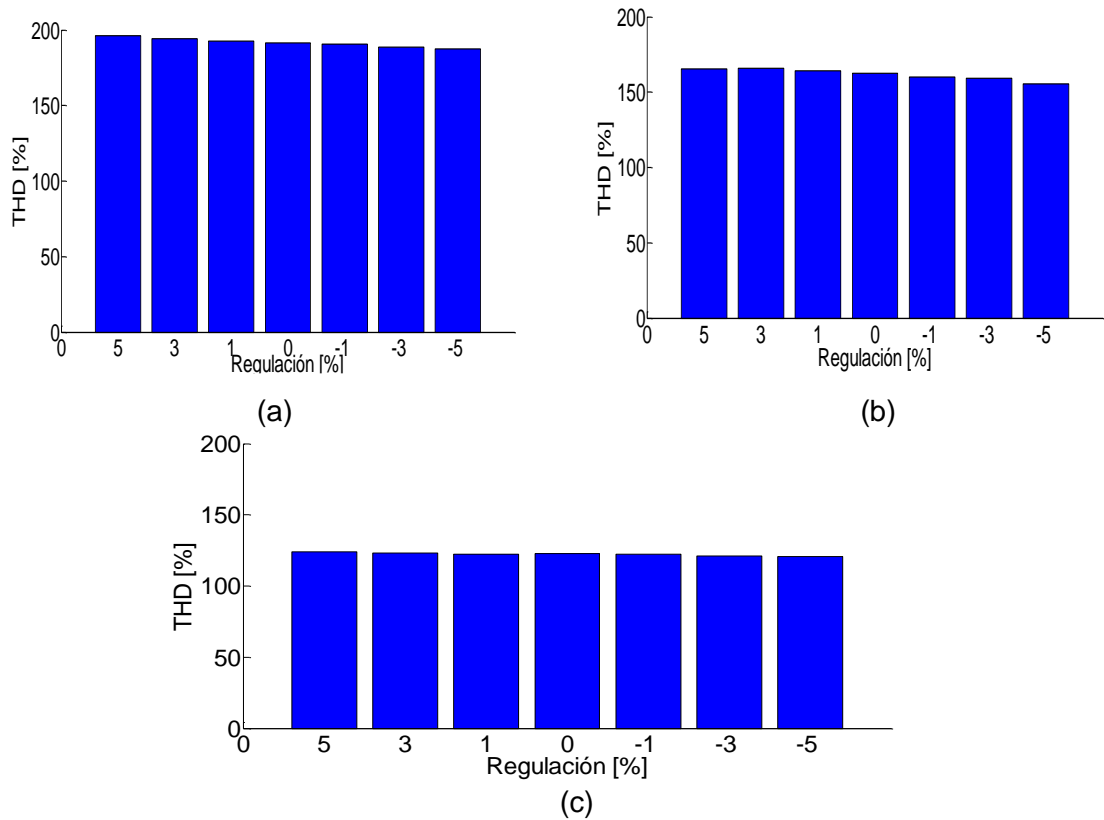
Para el caso de la sensibilidad del electrodoméstico 9, la corriente eficaz del electrodoméstico pasa de 103.3[mA] a 97.2[mA], para una variación del 1% en la tensión de entrada, es decir, la sensibilidad en la corriente eficaz es de 6.15[mA]. Ver *Tabla 19*

Respecto a la sensibilidad, se puede concluir que los cambios en la longitud del circuito ramal provocan sensibilidades mayores, tanto en los armónicos como en la corriente eficaz y energía de la señal de corriente, siendo esto sujeto a futuros estudios sobre su impacto, ya que la sensibilidad de corriente varía poco respecto a la corriente nominal de los electrodomésticos.

6.4. CASO DE ESTUDIO 4

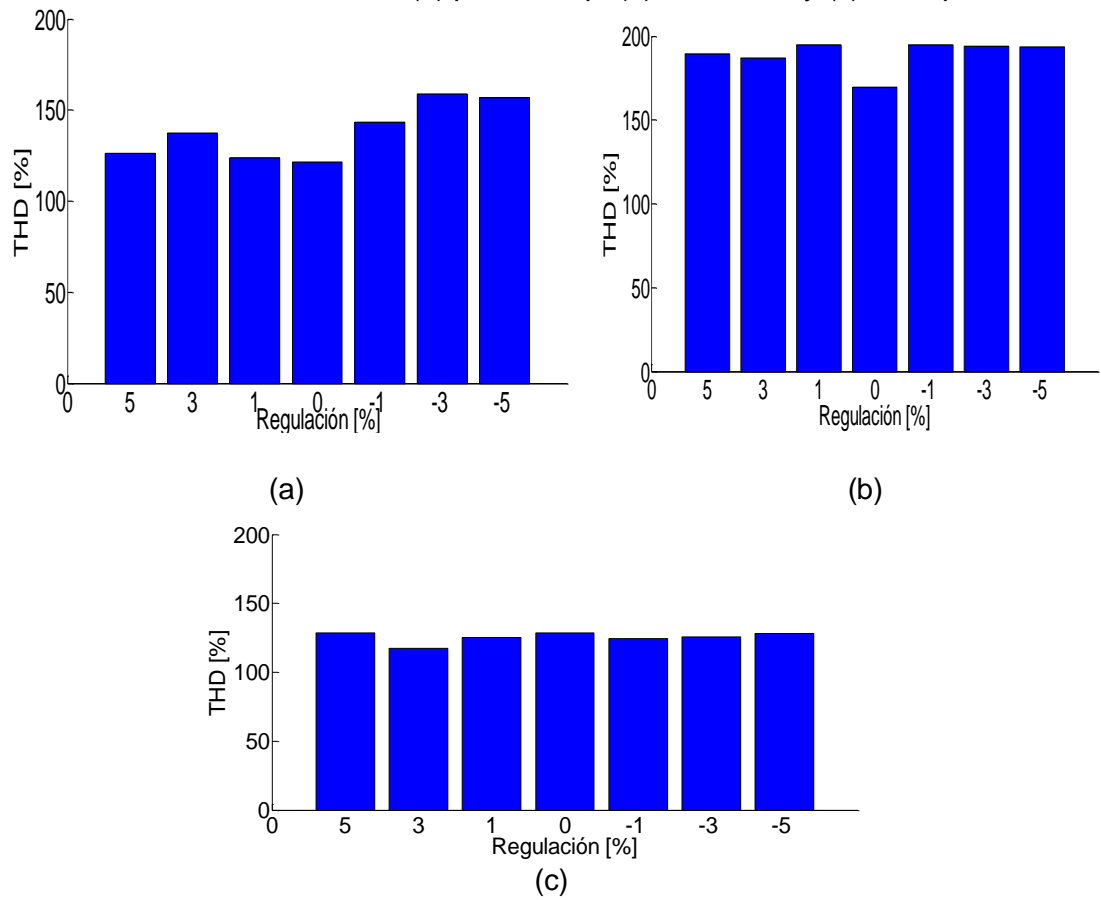
En esta sección se presenta la variación de la distorsión armónica total de la corriente (THDi) para cada electrodoméstico, realizando un barrido de tensión a distancia constante de 0 metros, como también haciendo un barrido en longitud del circuito ramal manteniendo el porcentaje de regulación en 0%.

Figura 32. Porcentajes de THDi del electrodoméstico 14 (TV 21”), frente a variaciones en la forma de onda (a) pointed-top, (b) sinusoidal y (c) flat-top



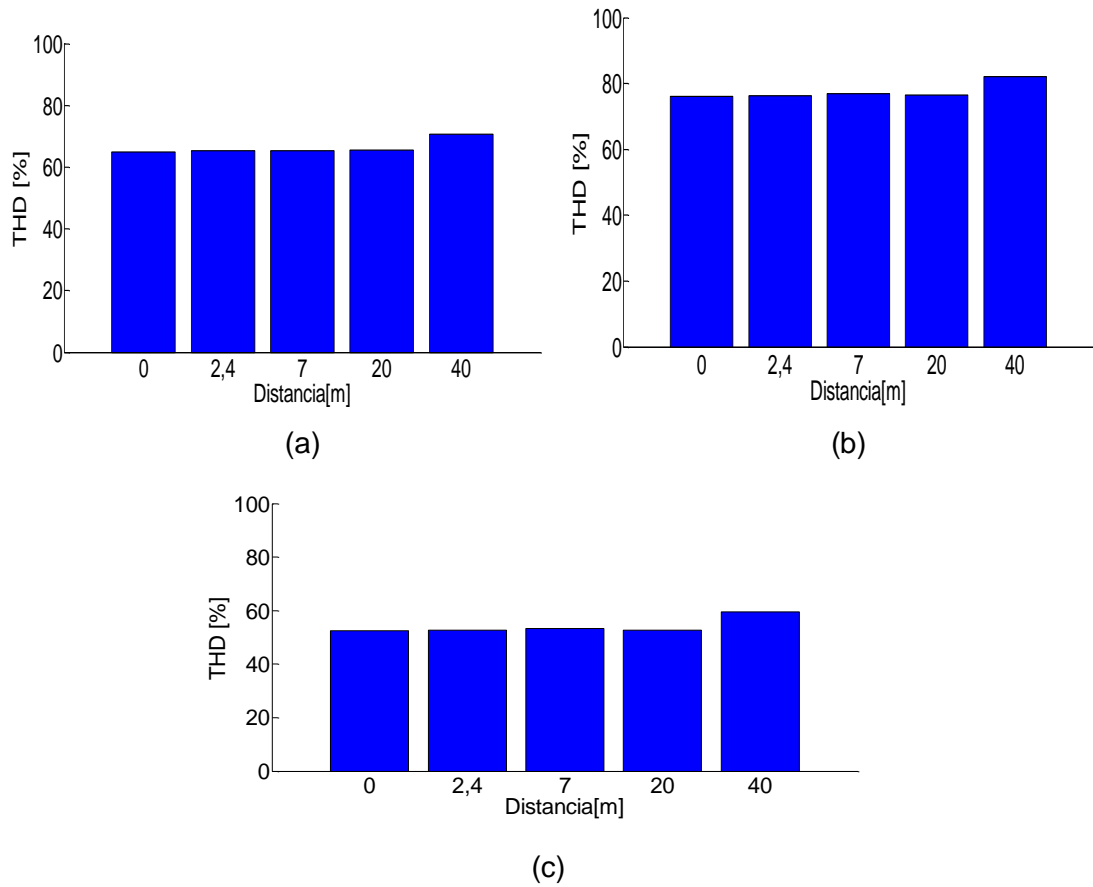
En la Figura 32, se observa un comportamiento que es común para las tres señales de alimentación, el THDi decrece a consecuencia de que la tensión disminuye. Los porcentajes del THDi son muy elevados para las tres señales de tensión, ya que superan el 100% de este índice para este electrodoméstico.

Figura 33. Porcentajes de THDi del electrodoméstico 15 (cargador tablet), frente a variaciones en la forma de onda (a) pointed-top, (b) senosoida y (c) flat-top



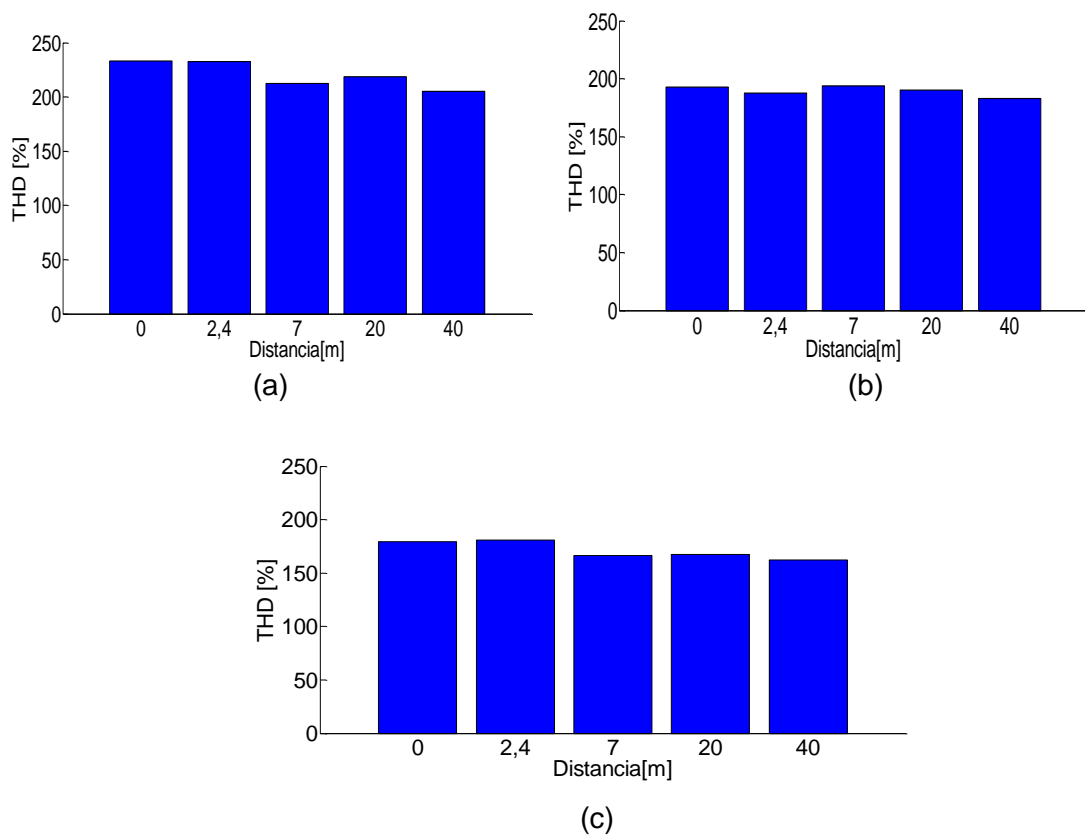
En la Figura 33, se observa un comportamiento variable del THDi para las tres formas de onda de alimentación, donde la tensión disminuye, con esta figura se concluye que no todos los THDi presentan una linealidad respecto a la regulación.

Figura 34. Porcentajes de THDi del electrodoméstico 2 (equipo de sonido), frente a variaciones de longitud (a) pointed-top, (b) senosoida y (c) flat-top



En la Figura 34, se observa un comportamiento que es similar para las tres señales de alimentación, el THDi aumenta a razón de incrementar la longitud del circuito ramal, presentando en este electrodoméstico una mayor distorsión a medida que se aumenta la impedancia de línea.

Figura 35. Porcentajes de THDi del electrodoméstico 13, frente a variaciones de longitud (a) pointed-top, (b) senosida y (c) flat-top



En la Figura 35, se observa un comportamiento voluble del THDi para las tres formas de onda de alimentación, donde la longitud del circuito ramal fue aumentando del punto de acople común de 0(metros).

Del análisis anterior se puede concluir que la señal de alimentación que produce mayor distorsión en la corriente es la pointed-top, comportamiento que ya era esperado porque es la señal de tensión que tiene mayor distorsión (ver sección 5.3.1). Por el contrario la distorsión que introduce la onda flat-top es la menor, comportamiento que no era esperado debido a que se supuso, que la señal de tensión seno, al no ser distorsionada, iba a producir menos distorsión que las otras señales de alimentación.

6.5. CASO DE ESTUDIO 5

Los primeros resultados que se analizan en esta sección, se basan en la sensibilidad que tiene la energía de la señal y el valor eficaz de corriente frente a cambios en la distancia, la tensión, y el tipo de onda con que se alimentan los electrodomésticos. Figura 36. Energía de la señal de corriente frente a variaciones en regulación, la distancia y tipo de onda de alimentación del electrodoméstico 3 (monitor led 19")

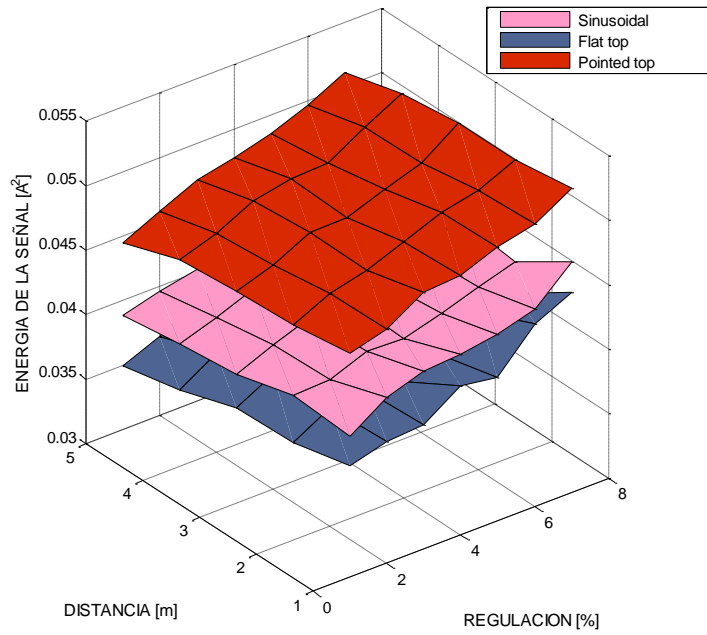
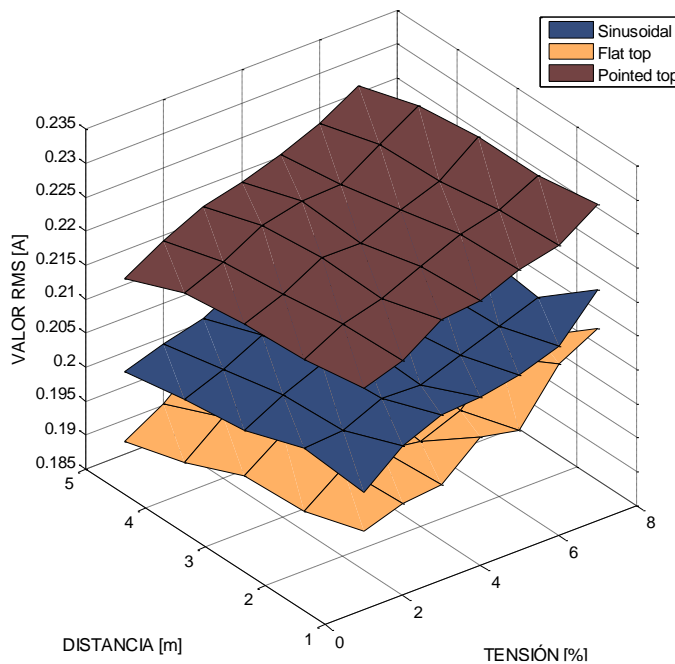


Figura 37. Valor eficaz de corriente frente a variaciones en regulación, la distancia y tipo de onda de alimentación del electrodoméstico 3 (monitor led 19")

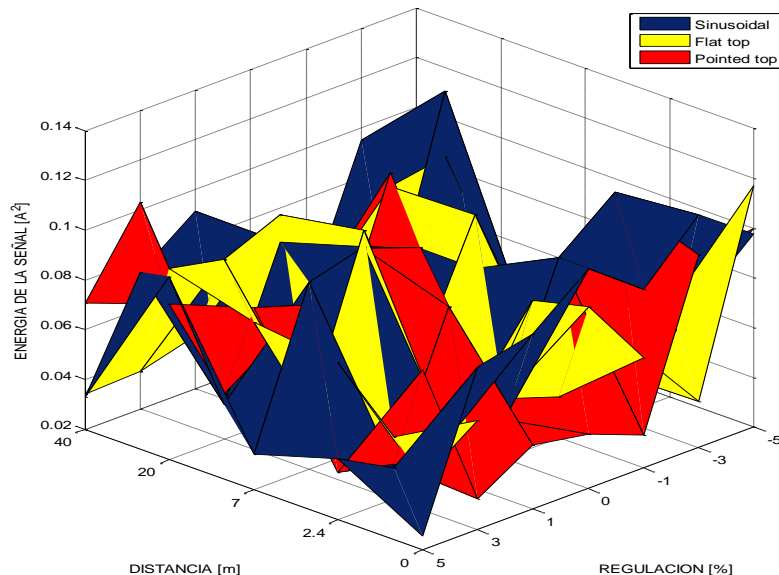


En las Figura 36 y Figura 37 se aprecia que la energía de la señal de corriente y valor eficaz es mayor para la respuesta a la señal pointed-top, como era de esperarse debido a que la señal pointed-top es la señal que más energía posee de las tres (seno, flat-top y pointed-top). Por el contrario la respuesta a la onda flat-top es la menor.

El comportamiento anteriormente descrito es repetitivo para los electrodomésticos 1, 2, 3, 5, 7, 11 y 14, a pesar que este comportamiento se aprecia en los electrodomésticos nombrados anteriormente, este efecto es más notorio en los monitores LED y en el televisor de 21" (electrodomésticos 3,5 y 11).

Para los electrodomésticos (4, 6, 8, 9, 10, 12, 13 y 15), no considerados anteriormente, el comportamiento se vuelve impredecible, puesto que la señal de corriente con mayor valor eficaz puede aparecer tanto para una tensión de alimentación como para las otras cuando se varia la distancia al punto de acople común o la tensión, Figura 38, esto puede ser atribuido a que estos equipos pueden tener diferentes estados durante su operación, por ejemplo el cambio de canal en el decodificador (8) o un cambio de tarea como la lectura de un cd en computador portátil (12), este comportamiento es ilustrado en la figura a continuación.

Figura 38. Energía de la señal de corriente frente a variaciones en regulación, la distancia y tipo de onda de alimentación del electrodoméstico 6 (computador MAC)

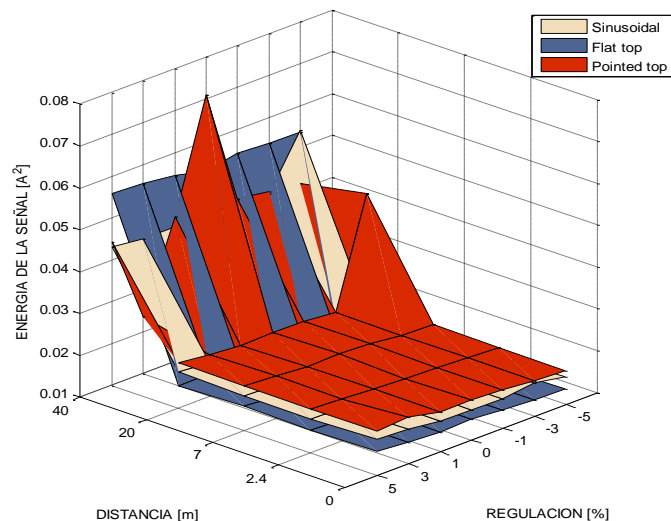


Dejando lo anterior de un lado, en la Figura 39 se puede apreciar un fenómeno en donde a 40 metros del punto de acople común la energía de las señales de corriente crece en comparación con las otras distancias, este fenómeno también se presenta en el valor eficaz y el valor pico de la señal (ANEXO E), el comportamiento es repetitivo para las diferentes tensiones y las diferentes ondas de tensión de alimentación.

Este fenómeno puede estar relacionado con el fenómeno de resonancia en el que la tensión aplicada en los terminales del mismo circuito, y la corriente absorbida, están en fase, este fenómeno de resonancia se manifiesta para una o varias frecuencias, dependiendo del circuito, pero nunca para cualquier frecuencia, aunque se necesita profundizar más en este comportamiento con un barrido que tenga el paso más fino sobre los 40 metros para descartar otros fenómenos.

Asimismo, también es importante conocer si este comportamiento se presenta para otras posibles distancias, sobre las cuales no se realizaron mediciones, sin embargo cabe aclarar que las pruebas que se tomaron a una longitud de 0m no tienen su punto de inicio en la bornera de la fuente, sino que se toma a partir de la caja de toma corrientes (ver Figura 15) la cual se ubica a 10 metros de la bornera de la fuente, es decir, lo que se tomó como punto de 0 metros en realidad está a 10 metros de la fuente. Se aconseja un experimento el cual se varíe la distancia entre 0 metros y 20 metros en pasos de 1 metro, partiendo de la bornera de la fuente, para así garantizar que la distancia crítica queda cubierta por las medidas, además se sugiere incluir electrodomésticos que posean características similares a los que presentaron el fenómeno en esta ocasión.

Figura 39. Energía de la señal de corriente frente a variaciones en regulación, la distancia y tipo de onda de alimentación del electrodoméstico 2 (equipo de sonido)



De igual forma, en la Figura 40, se aprecia como este efecto tiene repercusiones en el valor pico de la corriente, con variaciones cercanas al 100%, (ver Tabla 12). Adicionalmente se observó que el fenómeno tiene efectos directos sobre la magnitud de los primeros armónicos (1er, 3er y 5to armónico), para los cuales se ve un aumento de cerca del 100% con respecto a los armónicos de distancia cero. En cuanto respecta a la fase, se observa un cambio de casi 100% para los armónicos 11, 15 y 19 pero para los armónicos, que sufrieron un cambio en la magnitud, la fase varió tan solo 4%. También se pudo observar que los incrementos en la magnitud y fases de los armónicos afectan la distorsión de la onda de corriente, esto se puede explicar debido a que el factor THDi varió de 65,45% a 70,69.

Figura 40. Ondas de corriente del electrodoméstico 2(equipo de sonido) frente a variaciones de distancia

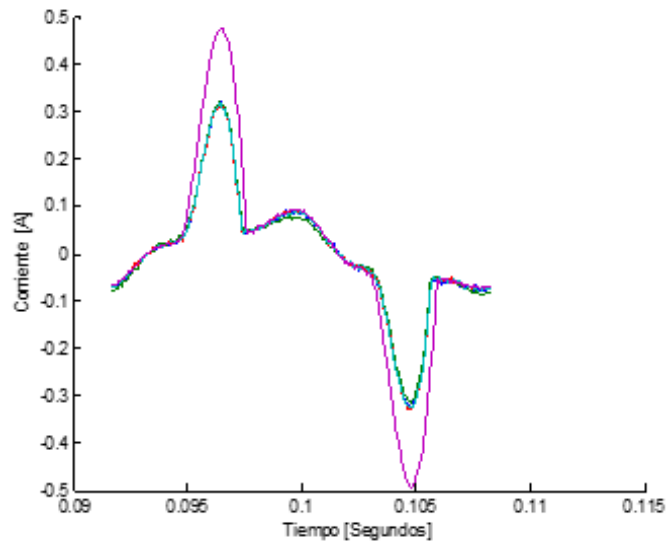


Tabla 12. Corriente eficaz y pico ante variaciones de distancia, electrodoméstico 2 (equipo de sonido).

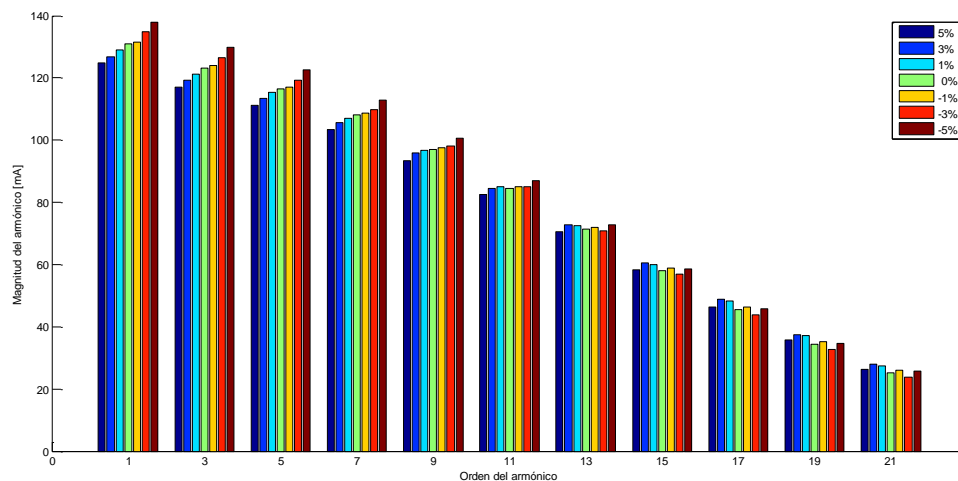
Distancia [m]	0	2,4	7	20	40
Irms [A]	0,1319	0,1315	0,1316	0,1322	0,2034
I pico [A]	0,3362	0,3381	0,3259	0,3278	0,4935

El fenómeno anteriormente descrito, también se presentó para el electrodoméstico 15 (cargador Samsung Galaxy note 10.1), para el cual las variaciones en energía eran cercanas al 400%.

6.6. CASO DE ESTUDIO 6

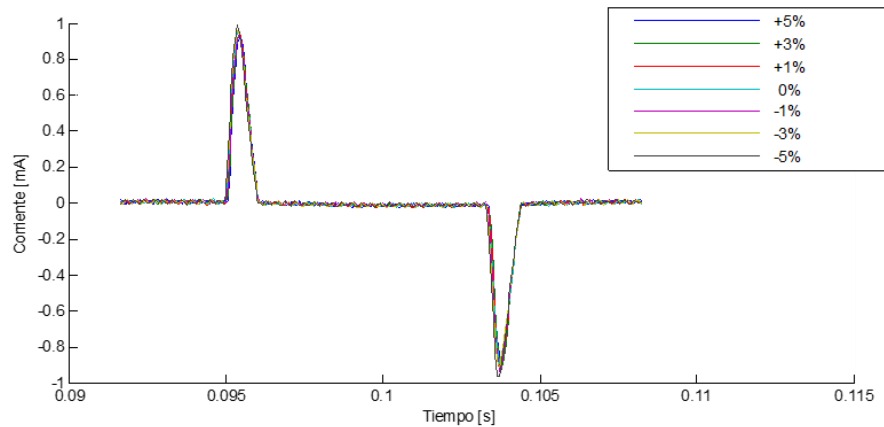
Este caso de estudio tiene como objetivo determinar el comportamiento que presenta la sensibilidad del espectro armónico en magnitud y fase de cada electrodoméstico, variando la tensión y dejando fijo el punto de acople común a 0(metros), además, para cada uno de estos casos se varió la forma de onda de la tensión de alimentación.

Figura 41. Magnitud de los armónicos de corriente del electrodoméstico 3 (monitor 19”) alimentado con la señal de tensión sinusoidal, realizando un barrido de tensión



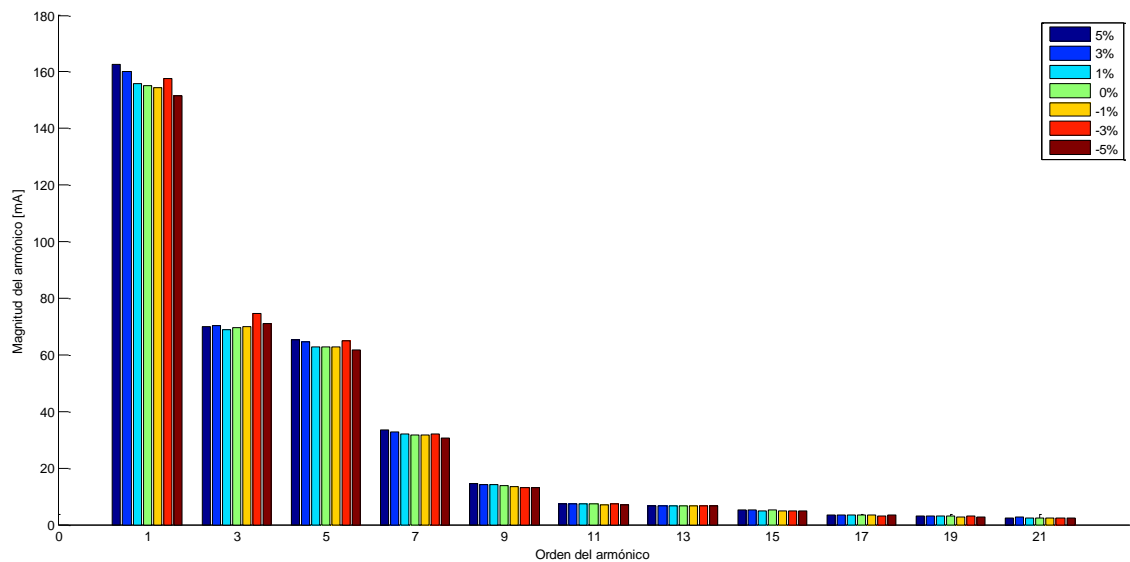
En la Figura 41, se observa un comportamiento creciente en la magnitud de los armónicos a medida que la tensión disminuye, además se observa que la magnitud para los diferentes armónicos disminuye a medida que el orden armónico aumenta, este comportamiento tiende a ser similar al de los electrodomesticos 1 (DVD), 5 (monitor 24"), 8 (decodificador), 9 (decodificador), 13 (portatil) y 14 (TV de 21").

Figura 42. Espectros de corrientes del electrodoméstico 3 (monitor 19") alimentado con la señal de tensión sinusoidal



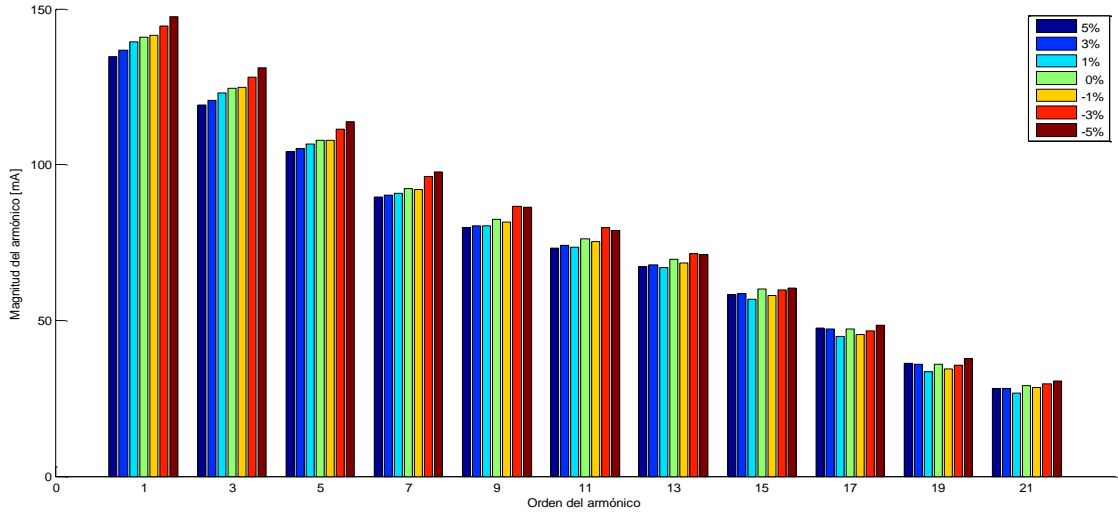
La Figura 42, muestra los espectros de corriente del barrido de las siete magnitudes de tensión donde no se evidencia un cambio significativo en el comportamiento de las ondas de corriente. Para este electrodoméstico se refuta el comportamiento esperado, el cual sería que no variara el espectro de corriente a medida de hacer un barrido en tensión, dejando la distancia fija.

Figura 43. Magnitud de los armónicos de corriente del electrodoméstico 2 (equipo de sonido) alimentado con la señal de tensión sinusoidal.



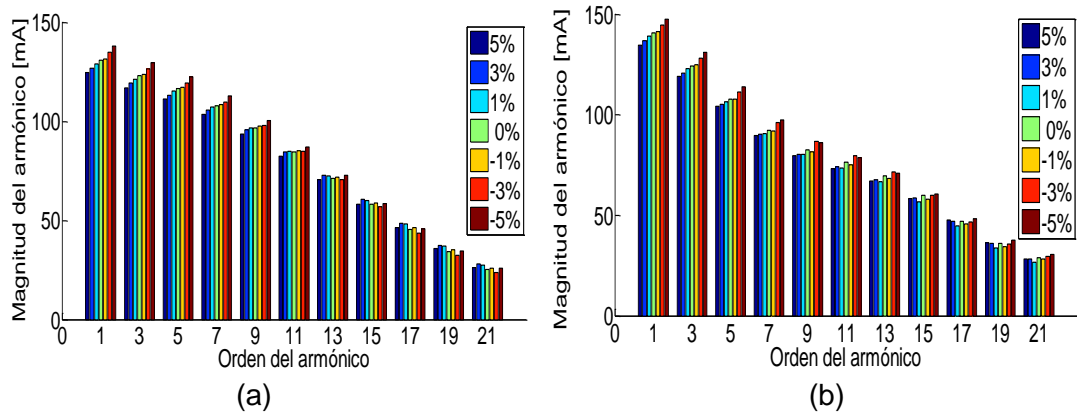
En la Figura 43, se observa un comportamiento en el cual las magnitudes de los armónicos tienden a ser estable a variaciones en la tensión, este comportamiento se presenta en el electrodoméstico 11 (batidora) y es repetitivo en el 2 (equipo de sonido) y el 6 (Mac mini).

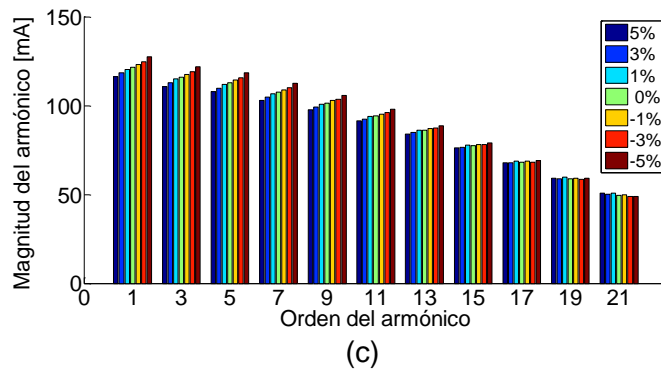
Figura 44. Magnitud de los armónicos de corriente del electrodoméstico 3 (monitor 19”) alimentado con la señal de tensión Flat-Top.



En la Figura 44, se observa un comportamiento en el cual los armónicos aumentan a medida que la regulación disminuye. Este comportamiento también se presenta en los electrodomésticos 1 (DVD), 4 (monitor flatron) y 14 (TV 21”).

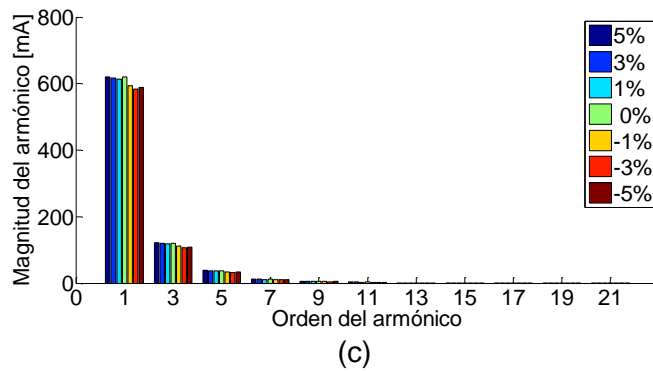
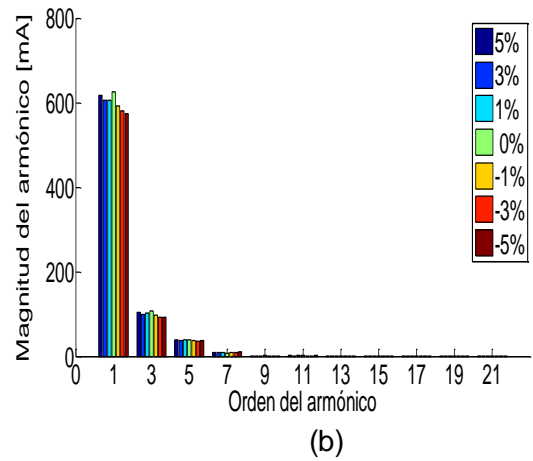
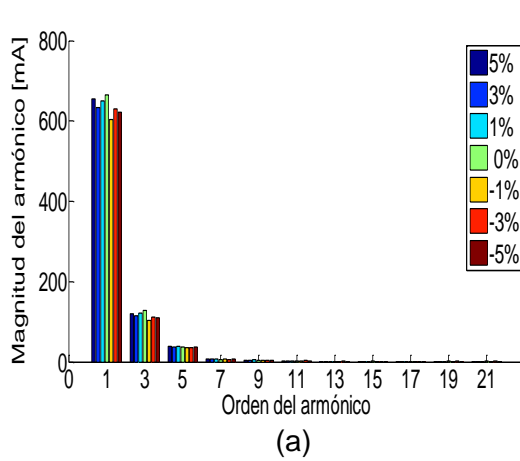
Figura 45. Magnitudes de los armónicos de las corrientes del electrodoméstico 3 (monitor 19”) alimentado con la señal de tensión sinusoidal (a) y las señales distorsionadas flat-top (b) y pointed-top (c)





En la Figura 45, se observa un comportamiento de los armónicos de corriente semejante para las tres formas de onda de alimentación, donde se aprecia que a menos tensión los armónicos tienden a aumentar en magnitud.

Figura 46. Magnitudes de los armónicos de las corrientes del electrodoméstico 11 (batidora) alimentado con la señal de tensión sinusoidal (a) y las señales distorsionadas flat-top (b) y pointed-top (c)

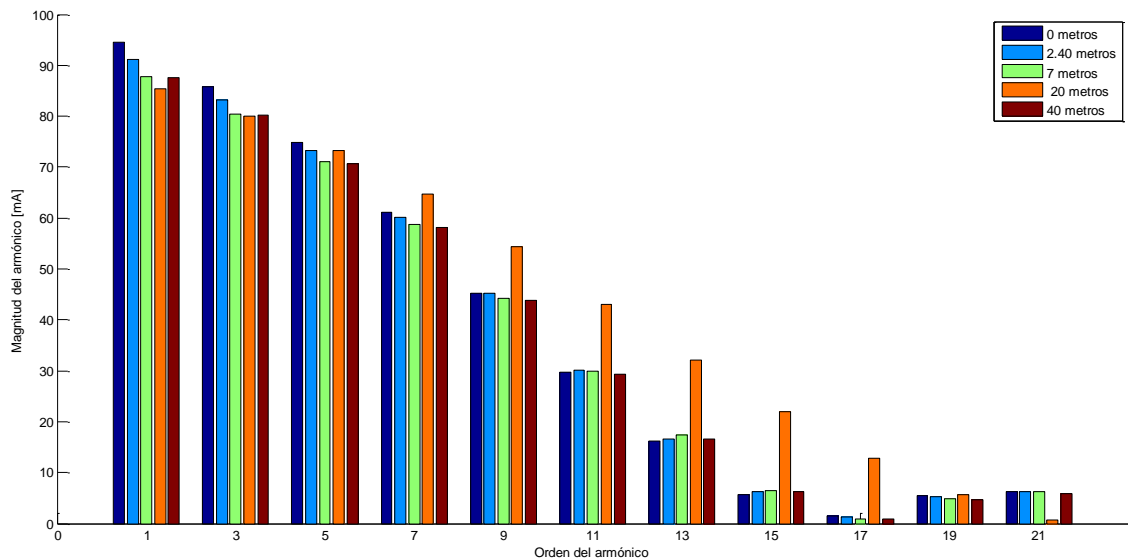


En la Figura 46, se observa que los armónicos de corriente tienen un comportamiento semejante para las tres formas de onda de alimentación, esto indica que no existe un cambio severo al reducir la tensión en los tres escenarios.

6.7. CASO DE ESTUDIO 7

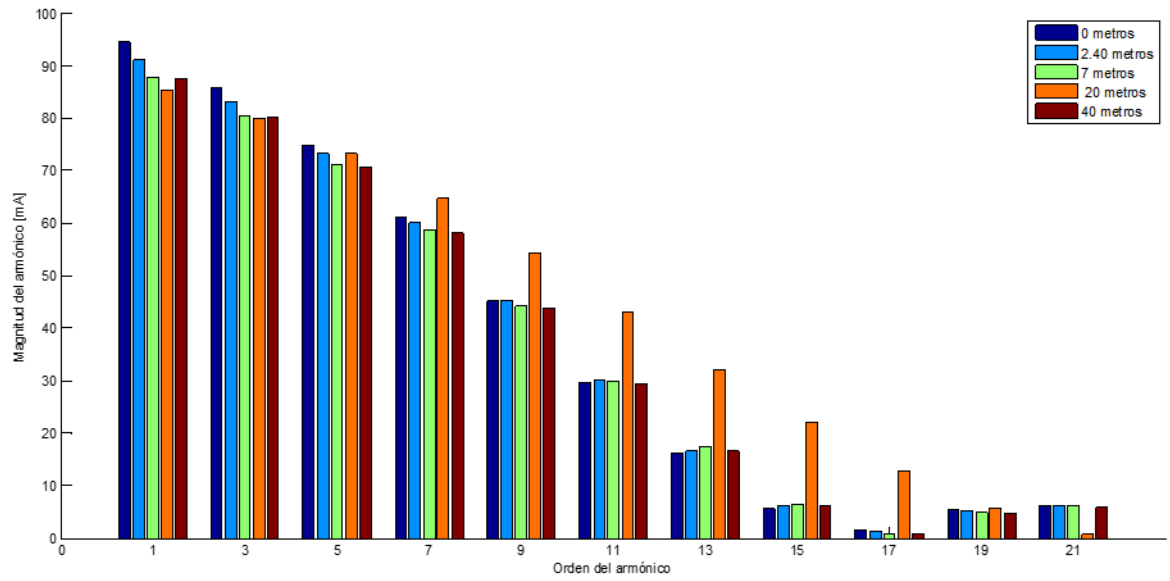
Este caso de estudio tiene como objetivo determinar el comportamiento que presenta el espectro armónico en magnitud y fase de cada electrodoméstico, variando la distancia del punto de acople común y manteniendo el porcentaje de regulación constante (0%), conjuntamente se varió la forma de onda.

Figura 47. Magnitud de los armónicos de corriente del electrodoméstico 1 (DVD) alimentado con la señal de tensión sinusoidal.



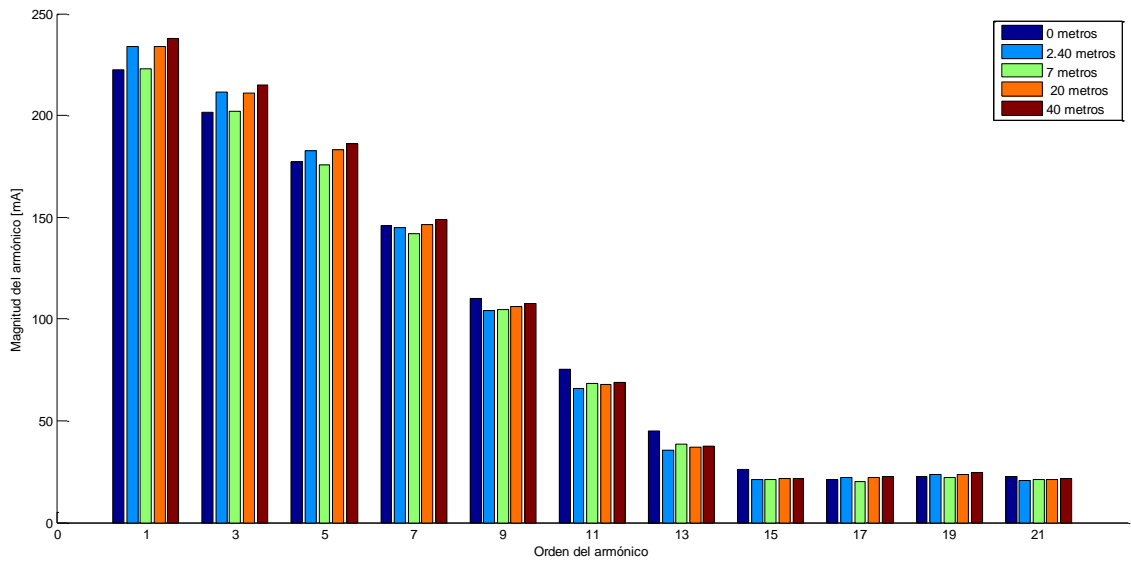
En la Figura 47, se ve un cambio decreciente en la magnitud de los armónicos a medida que se incrementa la distancia del circuito ramal, asimismo se ve que la magnitud para los diferentes armónicos disminuye a medida que el orden armónico aumenta.

Figura 48. Magnitud de los armónicos de corriente del electrodoméstico 4 (monitor flatron) alimentado con la señal de tensión sinusoidal



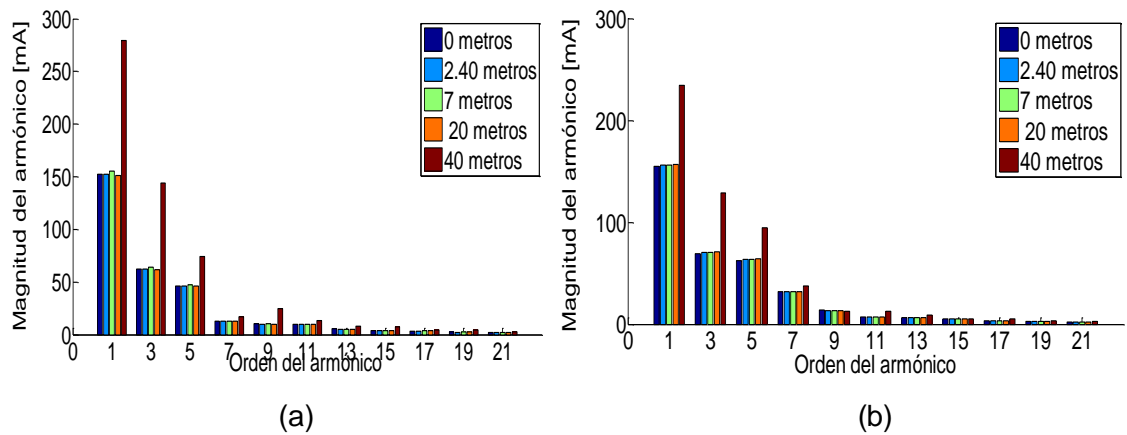
En la Figura 48, se observa un comportamiento decreciente en las magnitudes de los armónicos a medida que se aumenta la distancia del acople común, también se aprecia una tendencia al aumentar el orden armónico, la magnitud de los armónicos disminuye.

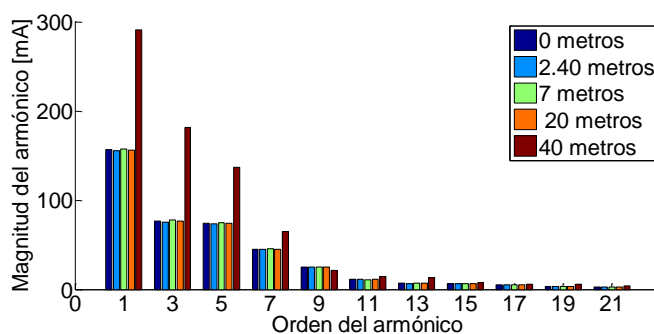
Figura 49. Magnitud de los armónicos de corriente del electrodoméstico 5 (monitor 24") alimentado con la señal de tensión sinusoidal



En la figura 45, se observa un comportamiento en el cual las magnitudes de los armónicos tienden a permanecer constantes a medida que la tensión disminuye, otro aspecto a resaltar es que la magnitud para los diferentes armónicos disminuye a medida que el orden armónico aumenta.

Figura 50. Magnitudes de los armónicos de las corrientes del electrodoméstico 02 alimentado con la señal sinusoidal(a) y las señales distorsionadas flat-top (b) y pointed-top(c).

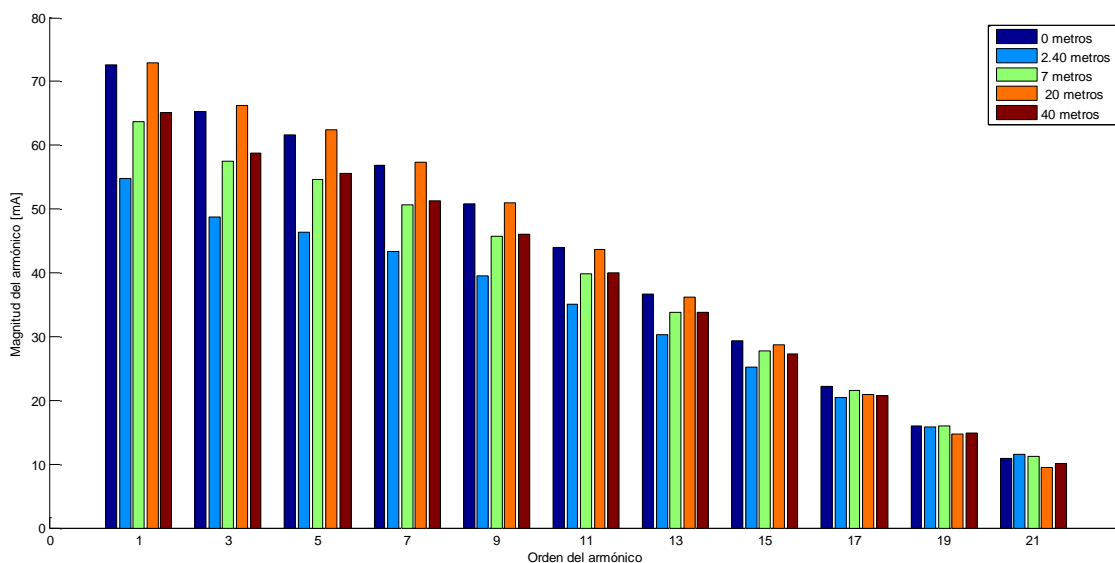




(c)

En la Figura 50, se observa el semejante comportamiento que presentan los armónicos, al variar las tres señales de alimentación y al aumentar la distancia del acople común. También se percibe que el cambio en magnitud de los armónicos en estas pruebas es mínimo.

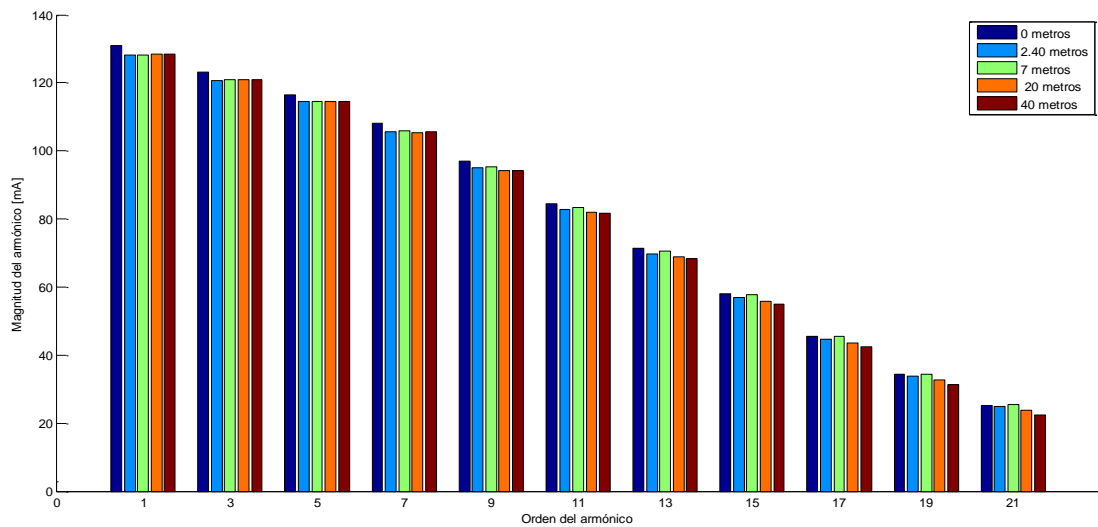
Figura 51. Magnitud de los armónicos de corriente del electrodoméstico 08 alimentado con la señal de tensión sinusoidal



En la

Figura 51, se observa un comportamiento en el cual las magnitudes de los armónicos tienden a permanecer estables a medida que la tensión disminuye, otro aspecto a resaltar es que la magnitud para los diferentes armónicos disminuye a medida que el orden armónico aumenta.

Figura 52. Magnitudes de los armónicos de las corrientes del electrodoméstico 3 (monitor 14”) alimentado con la señal sinusoidal y las señales distorsionadas flat-top y pointed-top.



En la Figura 52, se observa un comportamiento en el cual las magnitudes de los armónicos tienden a permanecer estables a medida que la tensión disminuye, otro aspecto a resaltar es que la magnitud para los diferentes armónicos disminuye a medida que el orden armónico aumenta.

6.8. CASO DE ESTUDIO 8

En este caso de estudio se determina el tipo de corrección del factor de potencia (PFC) que poseen los distintos electrodomésticos. Este estudio se elaboró para los casos de estudio 6 y 7, mencionados anteriormente.

Figura 53. Magnitud y fase de los armónicos de las corrientes del electrodoméstico 2 (equipo de sonido) alimentado con la señal sinusoidal(a) y pointed-top (b).

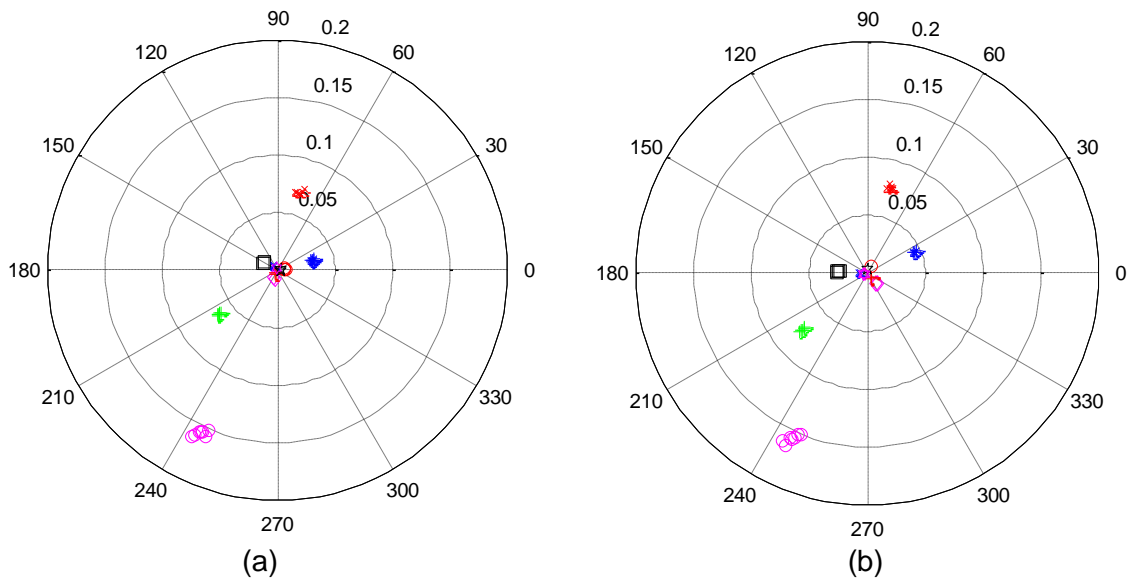
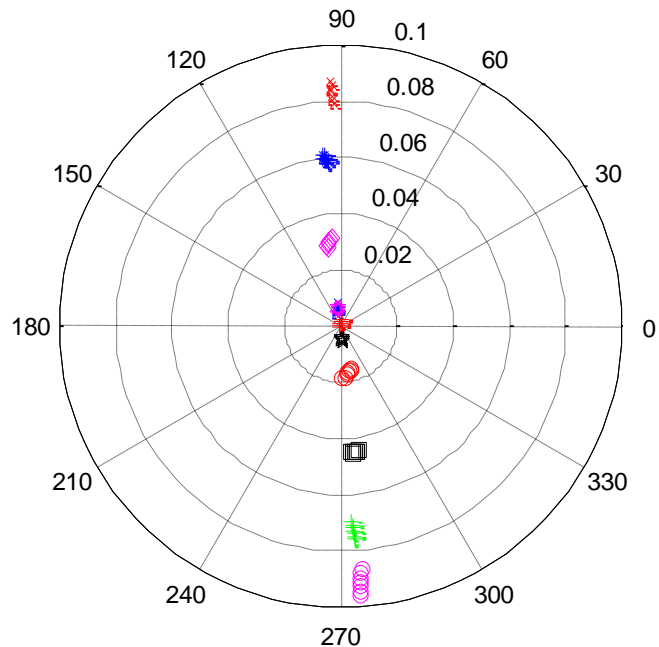
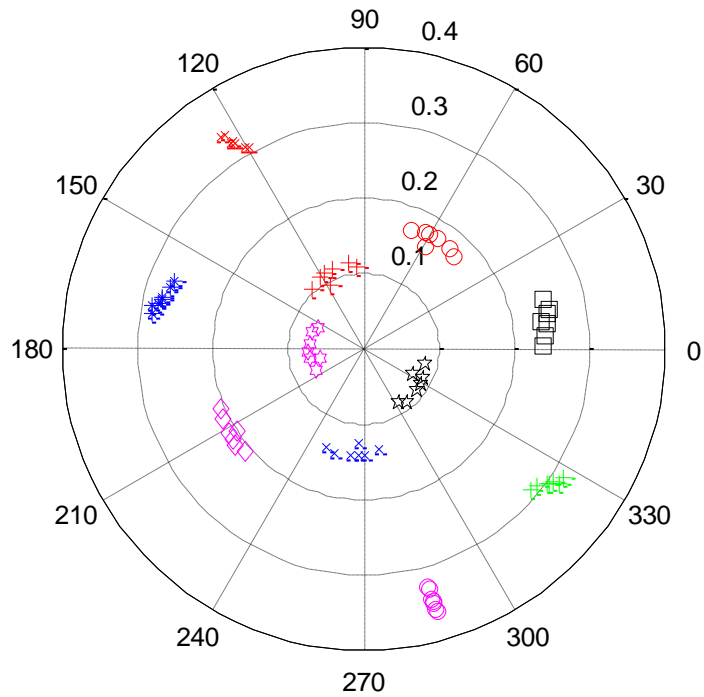


Figura 54. Magnitud y fase de los armónicos de las corrientes del electrodoméstico 01 alimentado con la señal sinusoidal.



En la Figura 54, se observa que los armónicos tienen un comportamiento lineal hacia el centro del eje polar, en el cual el cambio en magnitud y fase debido a la disminución de la tensión, este comportamiento es propio de cargas con PFC-activo.

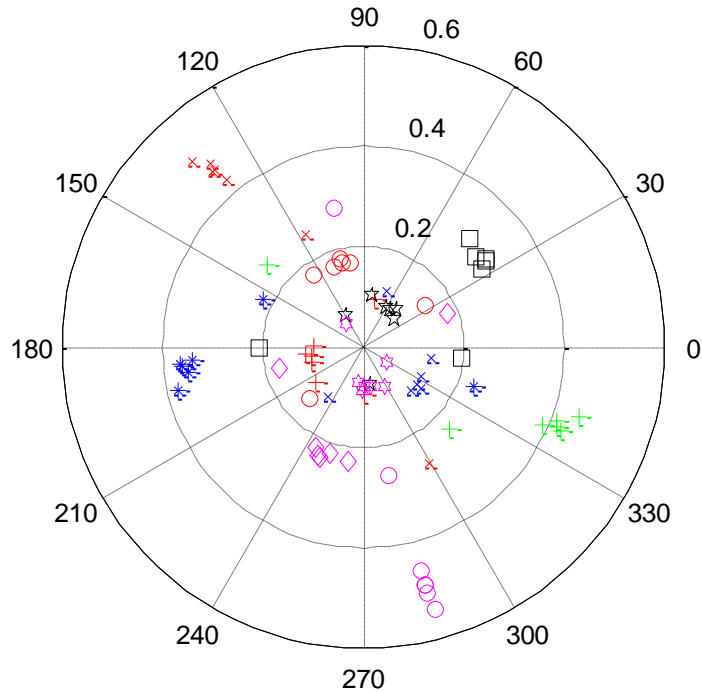
Figura 55. Magnitud y fase de los armónicos de las corrientes del electrodoméstico 13 (portátil) alimentado con la señal sinusoidal.



La a la disminución de la tensión, este comportamiento es propio de cargas con PFC-activo.

Figura 55, muestra un comportamiento de cargas con PFC-pasivo, donde se observa la poca variación que existe en magnitud y fase de los armónicos a medida que cambia la tensión.

Figura 56. Magnitud y fase de los armónicos de las corrientes del electrodoméstico 12 (portátil) alimentado con la señal sinusoidal.

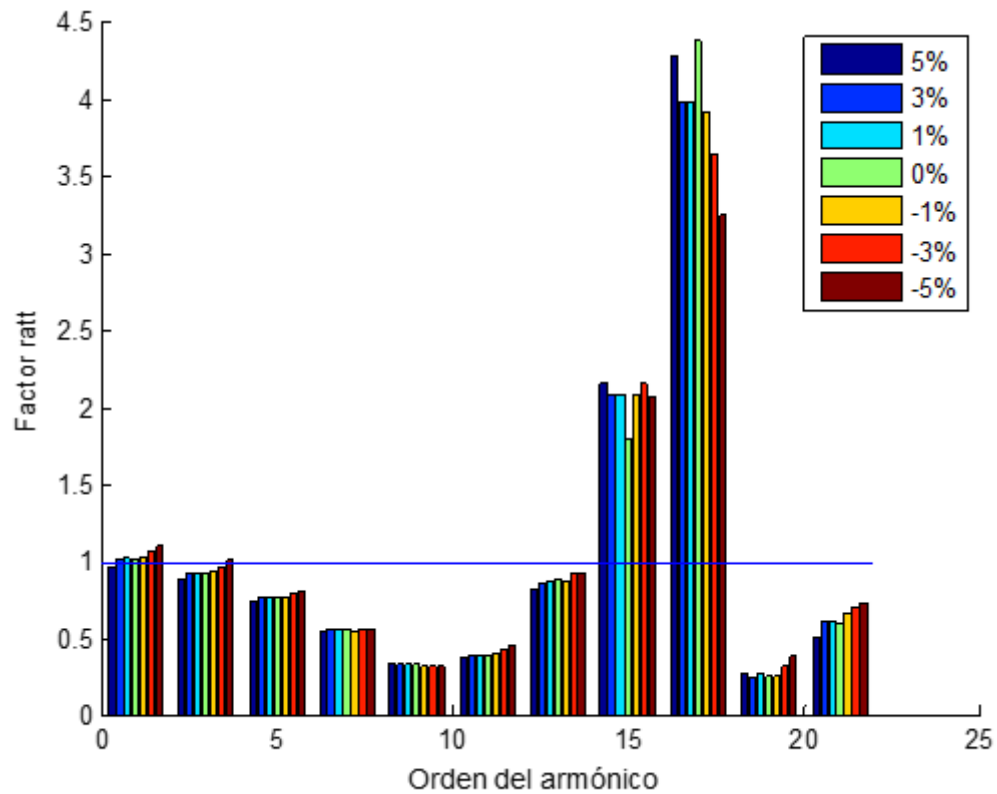


En la figura 42, se observa una tendencia presentada por los armónicos, de estar muy dispersos en cuanto a magnitud y fase, presentando un comportamiento típico de las cargas NO-PFC a medida que se reduce la tensión.

6.9. CASO DE ESTUDIO 9

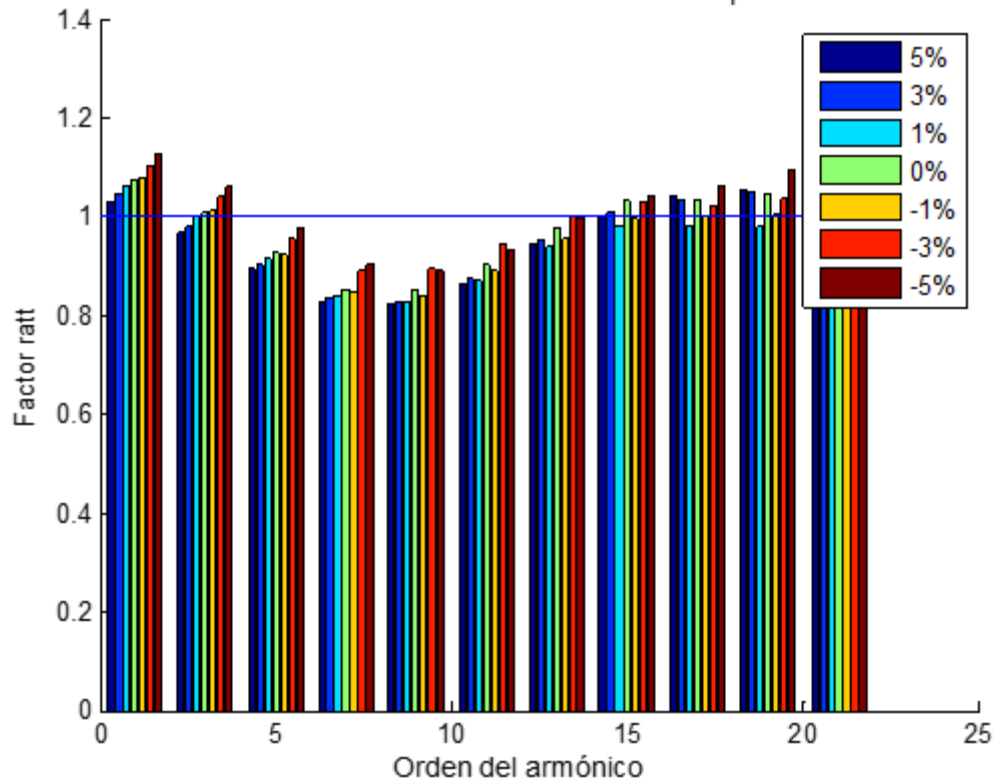
En este caso de estudio se cuantifica la magnitud del r_{att} , para cada orden armónico, donde se compara que pasa al alimentar con señal distorsionada flat-top y pointed-top respecto con la señal de referencia seno, si el factor es menor a uno nos indica que el armónico de corriente de la señal distorsionada es más pequeño, y si es mayor a 1 nos indica que el armónico es mayor para señal distorsionada todo esto comparado con la señal de alimentación seno.

Figura 57. Factor de atenuación del electrodoméstico 1 (DVD) alimentado con una señal de tensión flat-top



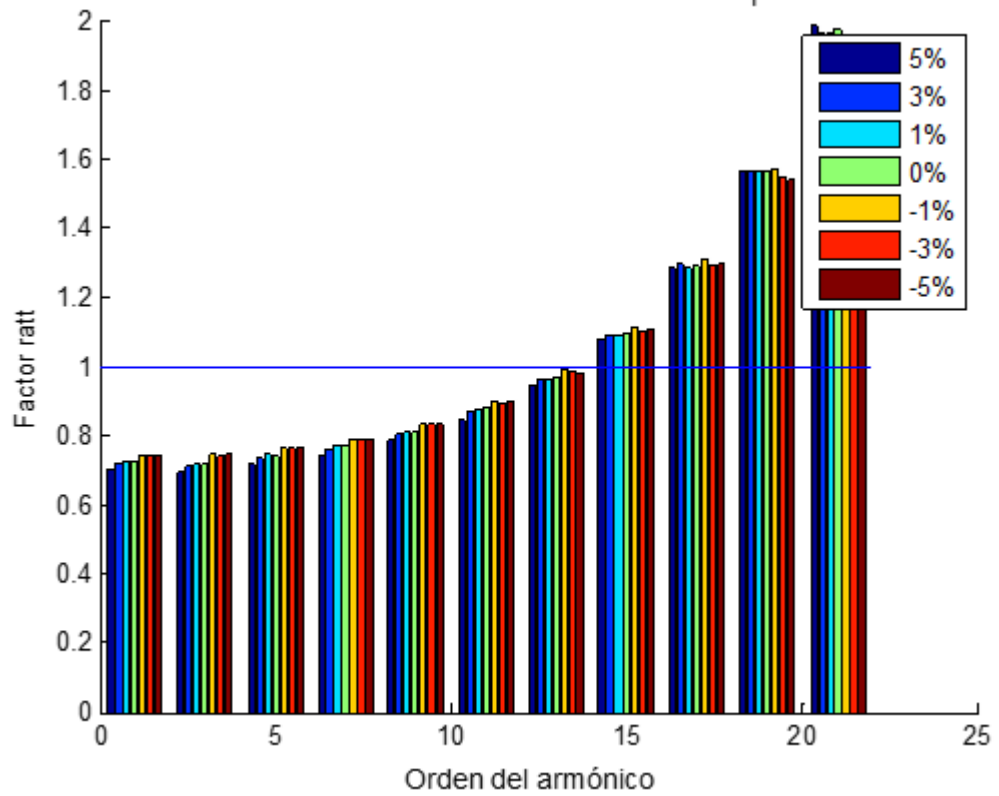
En la Figura 57, se observa un crecimiento en magnitud del armónico uno al once y en el armónico diecisiete al veintiuno a medida que aumenta la tensión, presentando un factor de atenuación menor que uno. Contrario sucede con los armónicos quince y diecisiete, que presentan un factor mayor que 1.

Figura 58. Factor de atenuación del electrodoméstico 3 (monitor 19”) alimentado con una señal de tensión flat-top



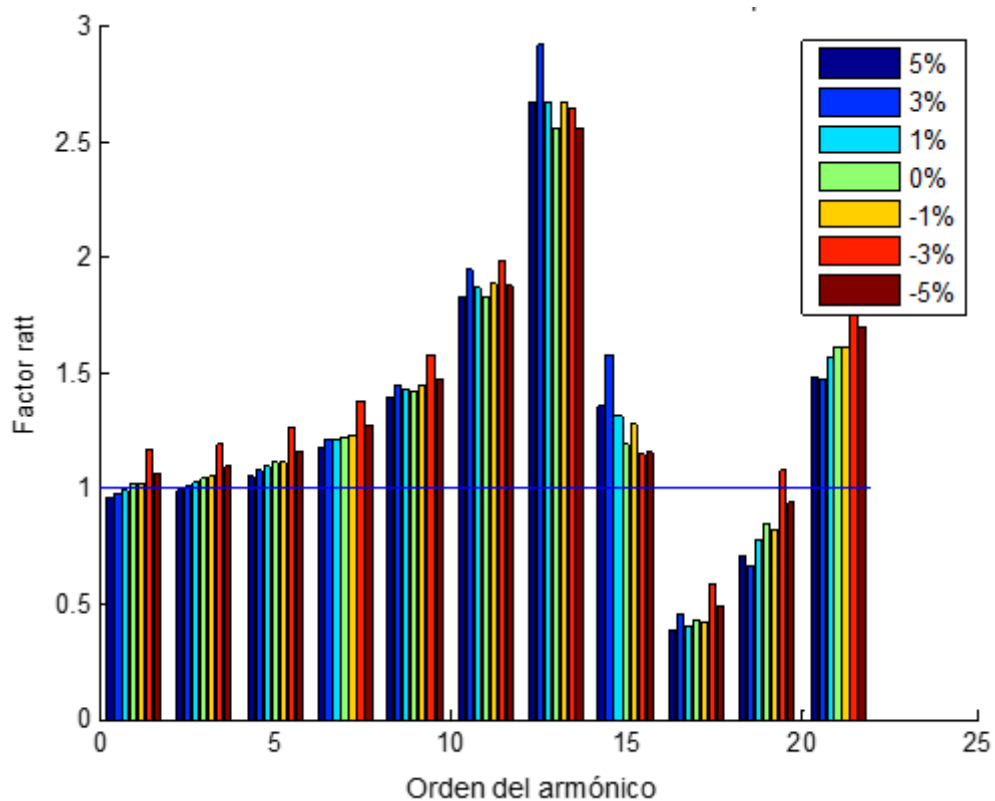
En la Figura 58, se observan que los armónicos tienden a tener un comportamiento creciente en magnitud a medida que disminuye la tensión, el factor de atenuación que se puede percibir es muy cercano al valor de uno para el orden de los armónicos analizados.

Figura 59. Factor de atenuación del electrodoméstico 8 (decodificador) señal de tensión pointed-top



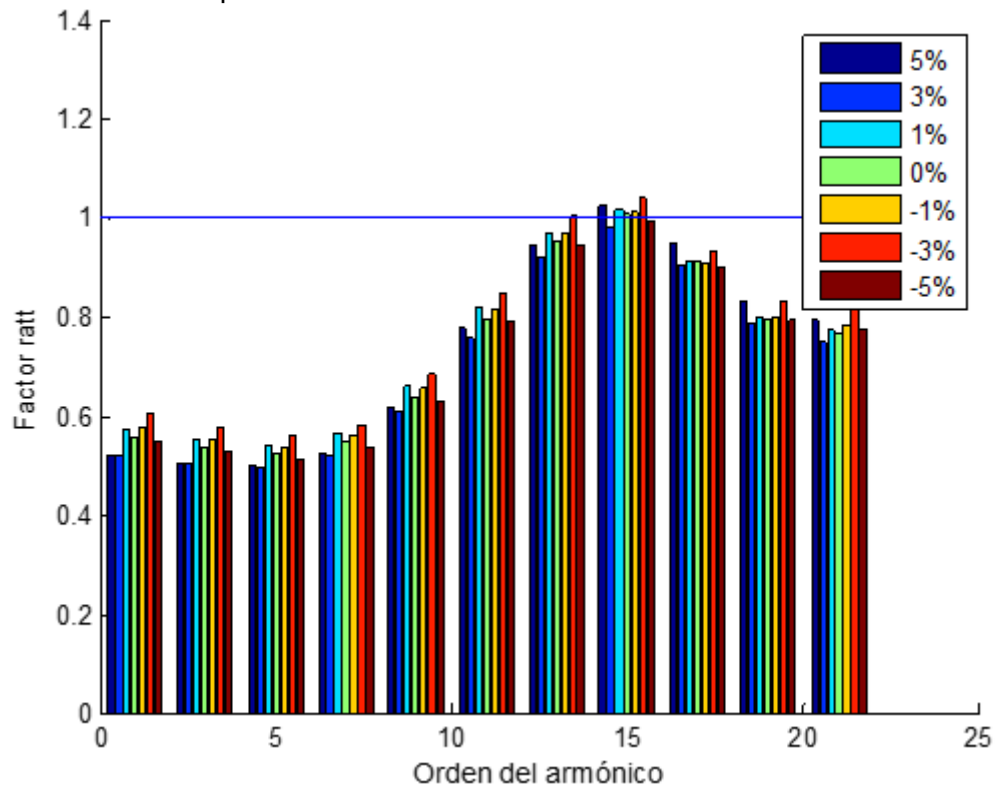
En la Figura 59, se observa un comportamiento estable de los armónicos a medida que se disminuye la tensión, como un comportamiento creciente en continuo de las magnitudes del orden armónico presentando factor de atenuación mayor que uno a partir del armónico

Figura 60. Factor de atenuación del electrodoméstico 4 (monitor flatron) alimentado con una de tensión pointed-top



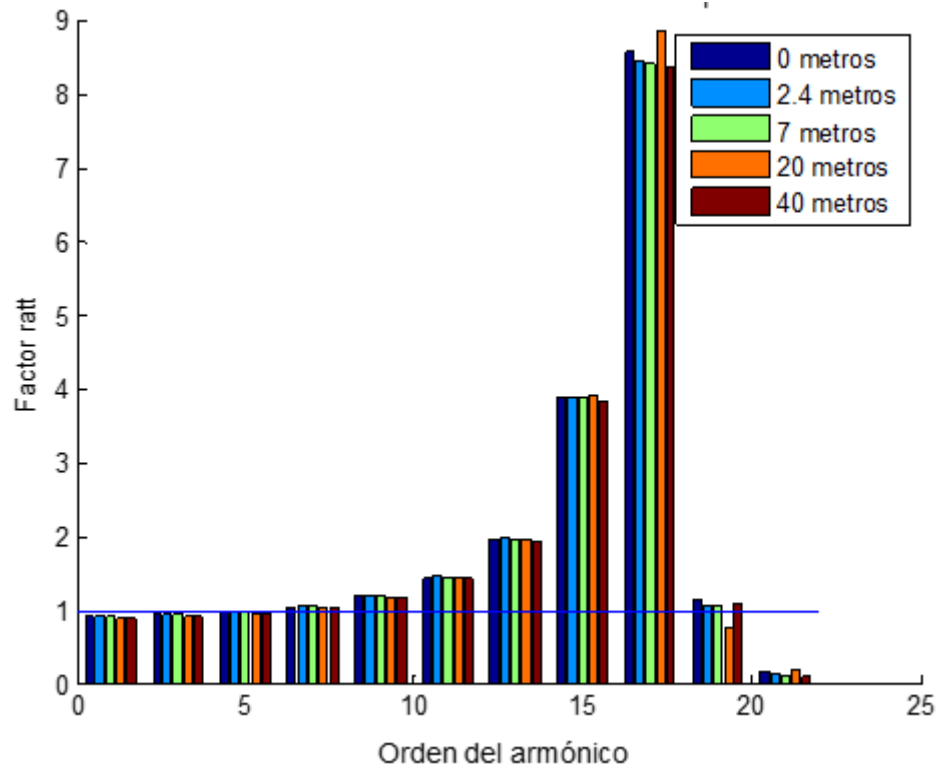
En la Figura 60, se observa un factor de atenuación mayor que uno presente en los armónicos exceptuando los armónicos diecisiete y diecinueve.

Figura 61. Factor de atenuación del electrodoméstico 12 (portátil) alimentado con una onda de tensión flat-top



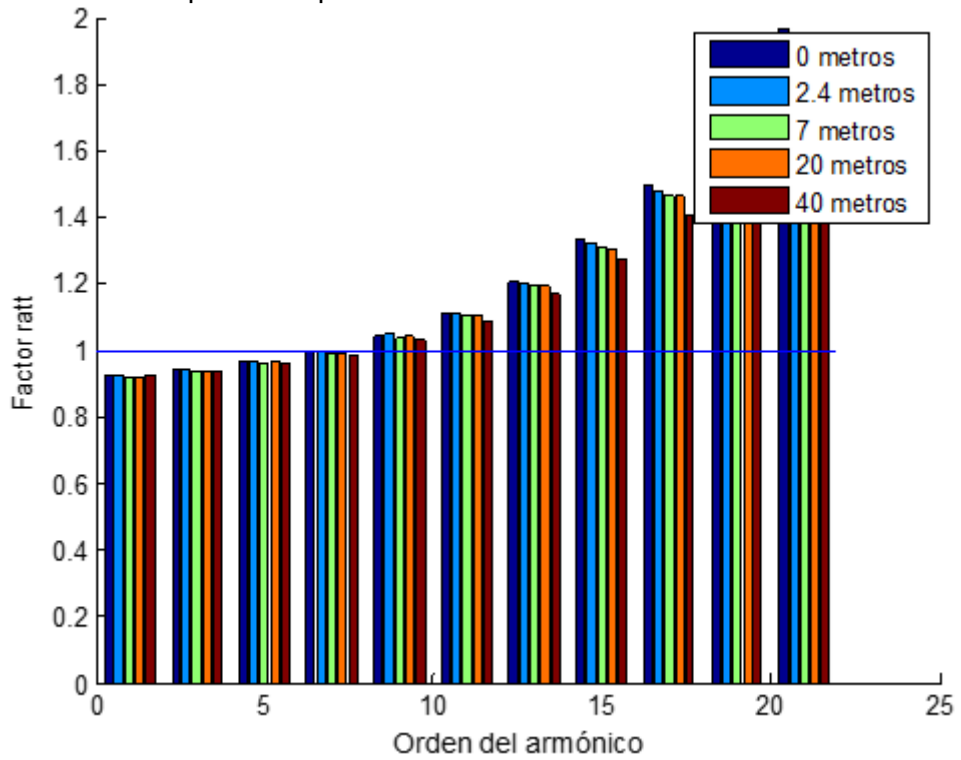
En la Figura 61, se observa el comportamiento que presenta el factor de atenuación menor a uno presente en los armónicos efectuando al armónico quince.

Figura 62. Factor de atenuación del electrodoméstico 11 (batidora) alimentado con una de tensión pointed-top



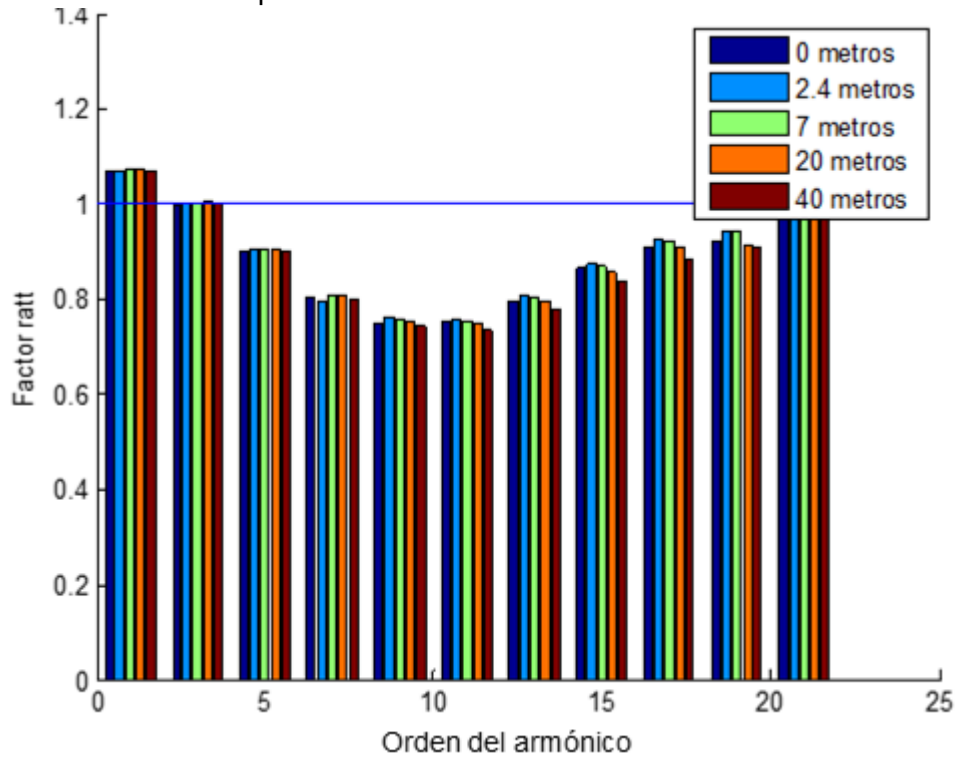
En la Figura 62, se observa un comportamiento estable de los armónicos a medida que aumenta la distancia, presentando un factor de atenuación mayor en los armónicos quince y diecisiete, siendo estos dos los más significativos.

Figura 63. Factor de atenuación del electrodoméstico 3 (monitor 19") alimentado con una onda de tensión pointed-top



En la Figura 63, se observa un comportamiento estable de los armónicos, tendiendo a crecer la magnitud del orden armónico de forma continua, siendo el factor de atenuación mayor que uno a partir del armónico nueve.

Figura 64. Factor de atenuación del electrodoméstico 3 (monitor 19") alimentado con una onda de tensión flat-top

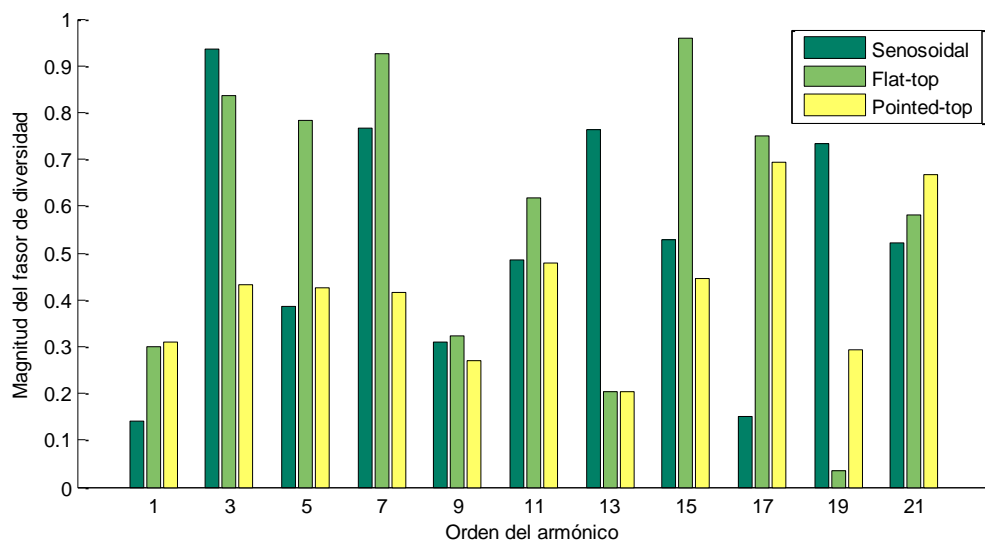


En la Figura 64, se observa una tendencia, el factor de atenuación es menor que uno exceptuando al armónico 1, siendo estos estables al variar la longitud del circuito ramal.

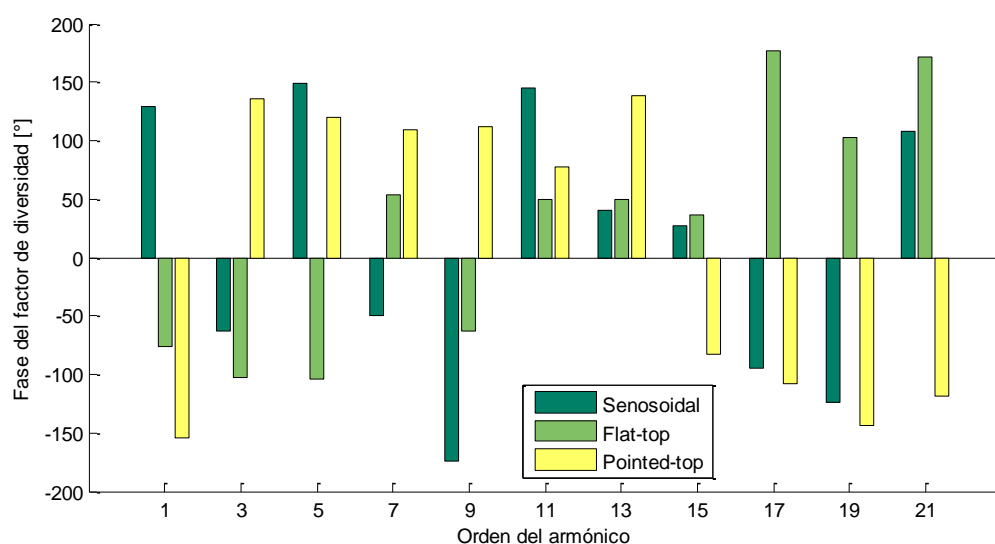
6.10. CASO DE ESTUDIO 10

En esta fase del estudio se hace un análisis del comportamiento que tienen las cargas al ser agrupadas, este comportamiento es medido mediante el factor de agregación (FAG). Este estudio se realizó para 5 grupos, de los cuales 3 son de electrodomésticos de la misma topología y 2 grupos son de electrodomésticos que comúnmente están conectados a un mismo circuito.

Figura 65. Factor de agregación, magnitud (a) y fase (b) para electrodomésticos 3, 4, 5 y 14, a distancia de 0 metros y regulación del 0%



(a)

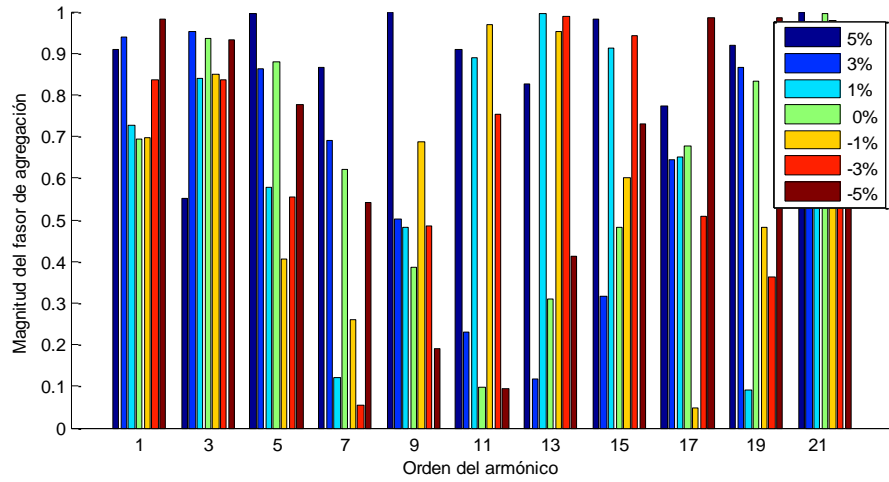


(b)

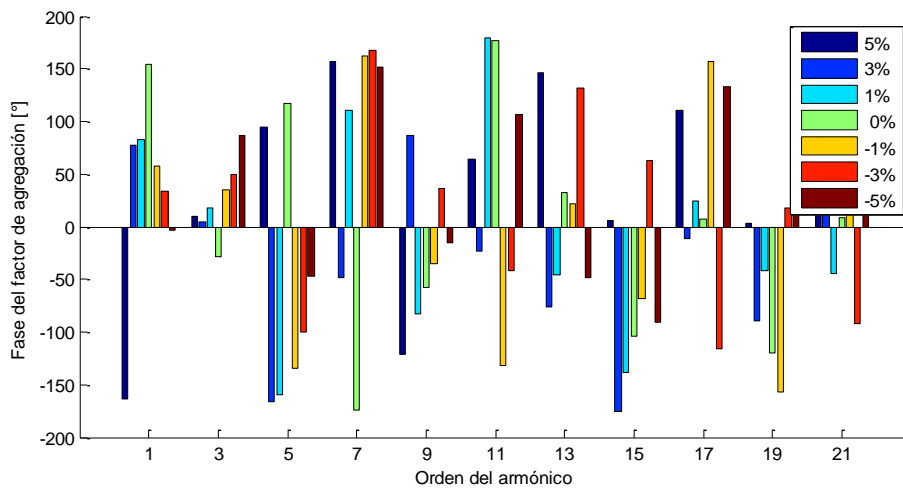
En la figura anterior se ilustra la magnitud y la fase del factor de agregación (FAG), de la Figura 65(a) se puede observar que la magnitud de FAG del primer armónico (fundamental) es baja para la alimentación sinusoidal, es decir, que los ángulos de fase de este armónico en las cargas agregadas cuando fueron alimentadas con una onda seno es muy disperso, caso contrario es la magnitud del tercer armónico, la cual es muy cercana a 1 para la alimentación seno, esto indica que las fases de este armónico en las cargas agregadas es casi el mismo.

En la Figura 65(b), se puede ver que la fase del primer armónico cuando se alimentó con Pointed-top es cercano a -150° , esto quiere decir que la mayoría ángulos para estas cargas agregadas se encuentran entre el II y III cuadrante.

Figura 66. Factor de agregación, magnitud (a) y fase (b) para electrodomésticos 8 y 9, a distancia de 7 metros y forma de onda pointed-top



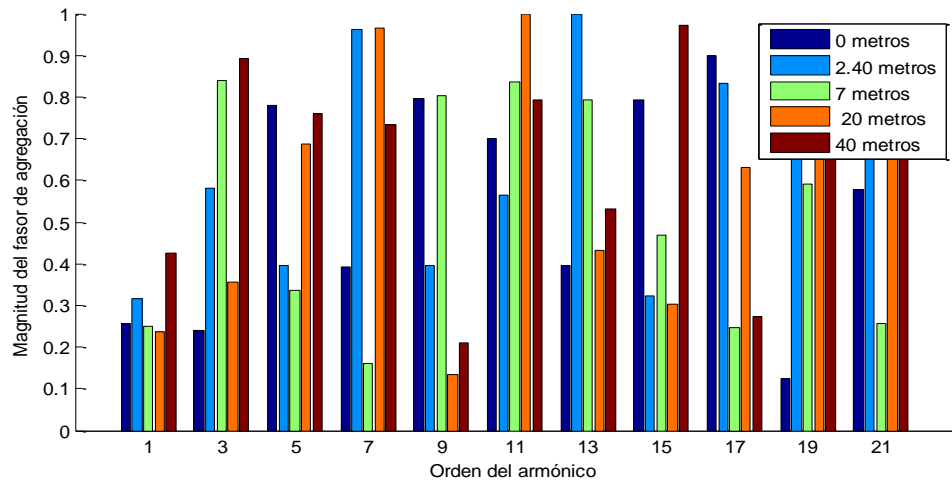
(a)



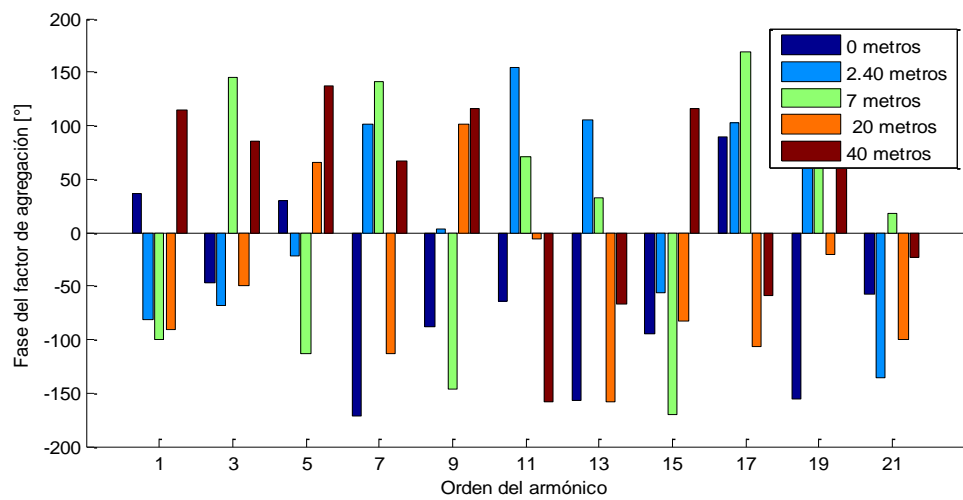
(b)

En la figura anterior se puede observar como varía el FAG para distintas tensiones, la figura deja ver que tanto la magnitud (a) como la fase (b) del factor, sufren grandes cambios cuando se varía la tensión, es decir, la magnitud de la tensión con que se alimentan los grupos de cargas es un factor clave que puede llegar a causar gran influencia en factores como el factor de diversidad, se deja abierto el tema para que futuras investigaciones cuantifiquen que tanto se afecta ve afectado el factor de diversidad y la cancelación de armónicos.

Figura 67. Factor de agregación, magnitud (a) y fase (b) para electrodomésticos 6, 12 y 13, a regulación de 5% metros y forma de onda flat-top



(a)



(b)

En la figura anterior se puede observar como varía el FAG para distintas distancias del punto de acople común, es decir a la distancia a la que se hace la agregación.

7. CONCLUSIONES

En este trabajo de grado se estudia la sensibilidad que presenta la distorsión armónica de cargas no lineales, en este caso electrodomésticos (Tabla 2), a través de múltiples mediciones donde se varió la amplitud y la distorsión de la tensión de la fuente de alimentación, de igual forma se varió la longitud del circuito ramal para estas condiciones de tensión.

Además, se analizaron los efectos que tiene la distorsión de tensión y la variación de la distancia del circuito ramal, en los armónicos de corriente generados por los artefactos analizados, a través de simulaciones e índices que permitieron una evaluación cuantitativa y cualitativa. Las principales conclusiones acerca del estudio y la manera como se realizó son expuestas a continuación:

Los electrodomésticos seleccionados para realizar el análisis representan la mayoría de la población de electrodomésticos que se encuentran en los hogares. Aunque inicialmente se habían elegido 30 electrodomésticos, solo fue posible realizar el análisis a 15 de ellos, debido a que el tiempo que emplea realizar la medición y analizar un experimento es de aproximadamente 15 minutos, y si se considera que son 3150 experimentos el tiempo de duración del proyecto excede el límite establecido (4 meses).

El procedimiento realizado para la toma de medidas y procesamiento de datos de los experimentos, garantiza la repetitividad y la reproducibilidad de los mismos, lo anterior debido a que se elaboró una guía paso a paso de la configuración y manejo de los instrumentos, de la adecuación para el experimento y del procesamiento de las muestras.

El índice de distorsión armónica THDi presenta los mayores valores de porcentajes de distorsión de corriente cuando se alimenta con la forma de onda de tensión pointed-top, seguido por la señal sinusoidal y luego la flat-top. Esto se da para el 93,3% de la muestra de electrodomésticos seleccionada.

Asimismo, se concluye que la forma de onda de tensión flat-top refleja los menores índices de distorsión armónica de corriente, siendo esta una señal de tensión distorsionada, ocasionando un resultado no esperado, ya que se preveía una menor distorsión alimentando las cargas con la señal sinusoidal.

El THDi presenta valores de porcentajes de distorsión de la corriente mayores al 100% en el 73,3% de la muestra. Esto se debe a la relevancia que representan los armónicos con respecto al fundamental; no cumpliéndose para los electrodomésticos con motores como son la batidora y la licuadora, ya que presentan índices de distorsión bajos.

Los armónicos de corriente de los electrodomésticos de la misma clasificación [27] no tienden a presentar comportamientos iguales, como se esperase que fueran. De esta manera, se concluye que para futuras investigaciones se debe realizar un estudio basado en los detalles de las topologías internas de los electrodomésticos para hacer con mayor exactitud una clasificación de estos mismos.

CITAS

- [1] «Un estudio sobre los electrodomesticos en Colombia,» *PROPAIS*, pp. 1-19, 2014.
- [2] M. A. Mora Barajas y P. Bañuelos Sánchez, «Contaminación armónica producida por cargas no lineales de baja potencia: modelo matemático y casos prácticos,» *Ingeniería Investigación y Tecnología*, vol. XI, nº 2, pp. 1-10, 2010.
- [3] A. Tejada y A. Llamas, «Efectos de los Armonicos en los Sistemas Electricos,» *ITESM Campus Monterrey*, pp. 1-8.
- [4] J. Arrillaga, D. A. Bradley y P. S. Bodger, «Power System Harmonics,» *Wiley, New York*, vol. 1st ed, 1985.
- [5] M. Waller, «Harmonics,» *Indianapolis: PROMPT Publications, Inc*, 1994.
- [6] G. T. Heydt, «Electric Power Quality,» *West LaFayette: Stars in a Circle Publications*, 1991.
- [7] G. Malagon Carvajal, J. Bello Peña, G. Ordoñez y C. Duarte, «Analytical and Experimental Discussion of a Circuit-based Model for Compact Fluorescent Lamps in a 60 Hz Power Grid,» pp. 1-7, 2015.
- [8] IEEE std. 519-1992, «IEEE recommended practices and requeriments for harmonic con-trol of electrical power systems, IEEE,» *New York*, 1993.
- [9] IEC 61000-3-2, «Limits – Limits for harmonic current emissions (equipment input current ≤ 16 A per phase),» vol. 3.2, 2009.
- [10] E. El-Saadany y M. Salama, «Reduction of the net harmonic current produced by single-phase non-linear loads due to attenuation and diversity effects,» *Electrical Power & Energy Systems*, vol. 20, nº 4, pp. 259-268, 1998.
- [11] S. Elphick, P. Ciufu y S. Perera, «Laboratory Investigation of the Input Current Characteristics of Modern Domestic Appliances for Varying Supply Voltage Conditions,» *IEEE*, pp. 1-7, 2010.
- [12] Mok Yan Kit, C. Tse y W. Lau, «A Study on the Efects of Voltage Distortion on Current Harmonics Generated by Modern SMPS Driven Home Appliances in Smart Grid Network,» *City University of Hong Kong*, pp. 1-6, 2012.
- [13] A. M. Blanco Castañeda, «Efecto sobre los circuitos de distribucion secundarios debido al uso intensivo de bombillas fluorescentes compactas y leds,» p. 138, 2010.
- [14] W. Carvajal Carreño, G. Ordoñez Plata, C. A. Duarte Gualdron y A. L. Moreno Wandurraga, «Simulación de Sistemas Eléctricos con Cargas No Lineales y Variantes en el Tiempo,» *Revista Chilena de Ingeiería*, vol. 19, nº 1, pp. 76-92, 2011.

- [15] A. M. Salinas Cala y O. J. Corredor Montero, «Diseño del Prototipo del Modulo para la Monitorizacion de las Perturbaciones de Tension para una unidad Constructiva en el Analisis de los Parametros de Calidad de Potencia Electrica con Base en el Estandar IEC 61000-4-30,» *Proyecto de Grado UIS*, pp. 29-34, 2009.
- [16] S. Elphick, P. Ciufu y S. Perera, «Supply Current Characteristics of Modern Domestic Loads,» *IEEE*, pp. 1-6, 2009.
- [17] J. Niitsoo, I. Palu, J. Kilter, P. Taklaja y T. Vaimann, «Residential Load Harmonics in Distribution Grid,» *IEEE*, pp. 1-6, 2013.
- [18] S. Rönnerberg, M. Bollen y M. Wahlberg, «Harmonic Emission Before and After Changing toLED and CFL - Part I: Laboratory Measurements for a Domestic Customer,» *IEEE*, pp. 1-7, 2010.
- [19] A. Gil-de-Castro, S. K. Rönnerberg, M. H. Bollen y A. Moreno-Muñoz, «Study on harmonic emission of domestic equipment combined with different types of lighting,» *Electrical Power and Energy Systems*, nº 55, pp. 116-127, 2014.
- [20] E. E. Ahmed, Wilsun Xu y Guibin Zhang, «Analyzing Systems With Distributed Harmonic Sources Including the Attenuation and Diversity Effects,» *IEEE*, vol. 20, nº 4, pp. 1-11, 2005.
- [21] A. B. Nassif y J. Acharya, «An Investigation on the Harmonic Attenuation Effect of Modern Compact Fluorescent Lamps,» *IEEE*, pp. 1-6, 2008.
- [22] P. C. Acuña Roncancio, «Impacto del Alumbrado Público con LEDs en la Red de Distribución,» *Universidad Nacional de Colombia*, pp. 33-58, 2011.
- [23] Chroma, «Programmable AC Source 61511/61512 User's Manual,» vol. 1.1, 2009.
- [24] MINISTERIO DE LA PROTECCIÓN SOCIAL MINISTERIO DE COMERCIO, INDUSTRIA Y TURISMO, «Norma Técnica Colombiana NTC: Seguridad de Artefactos Electrodomésticos y Artefactos Eléctricos Similares,» 2005.
- [25] A. d. r. Gil, «Estudio y caracterizacion de la calidad de suministro electrico en los sistemas de alumbrado,» *Memoria de tesis doctoral*, 2012.
- [26] DANE, «Encuesta nacional de calidad de vida,» *Dirección Nacional de Estadística*, 2013.
- [27] R. M.F, M. J, M. S. y G. L.E, «Characterization of non-linear household loads,» *Ingeniería e investigación vol. 35 sup n.º1 siceI*, pp. 65-72, 2015.
- [28] A. J.L, C. A.J, H. B.P y D. S.Z, «Component-based Aggregate Load Models for Combined Power Flow and Harmonic Analysis,» *7th Mediterranean Conference and Exhibition on Power Generation, Transmission, Distribution and Energy Conversion*, p. 10, 2010.
- [29] E. c. (EMC), «Limits for harmonic current emissions (equipment input current :s 16 A per phase),» 2007.

- [30] A. M. Blanco, S. Yanchenko, J. Meyer y P. Schegner, «The impact of supply voltage distortion on the harmonic current emission of non-linear loads,» p. 10, 2014.
- [31] IEC 61000-4-30, «Testing and measurement techniques – Power quality measurement,» vol. 2, pp. 14-18, 2008.
- [32] G. M. Carvajal, «Evaluación y predicción del impacto de armónicos en sistemas de distribución de baja tensión mediante métodos estocásticos,» *Ensayo de candidatura*, 2014.

BIBLIOGRAFIA

AHMED, E.E.; XU, W.; GUIBIN ZHANG. *et al* *Analyzing systems with distributed harmonic sources including the attenuation and diversity effects*. IEEE Transactions on Power Delivery [online] Oct. 2005. Vol 20 Sup N° 4 [cited: 5 Ene 2016] Disponible en : <http://ezproxy.uis.edu.co:2237/xpls/icp.jsp?arnumber=1514509>.

CARVAJAL CARREÑO, W. *et al* *Simulación de Sistemas Eléctricos con Cargas No Lineales y Variantes en el Tiempo*. *Revista Chilena de Ingeniería [online]* 2011 vol. 19, n 1 [cited: 8 Ene 2016] Disponible en : <http://ezproxy.uis.edu.co:2091/eds/pdfviewer/pdfviewer?sid=8718e263-161c-4d66-a114-631b1d297eb9%40sessionmgr114&vid=3&hid=122> .

MALAGON CARVAJAL, G. *et al* *Analytical and Experimental Discussion of a Circuit-based Model for Compact Fluorescent Lamps in a 60 Hz Power Grid*. Ingeniería e Investigación [online] November, 2015. Vol 35 Sup N° 1 [cited: 3 Ene 2016] Disponible en : <file:///C:/Users/BiblioUis/Downloads/53618-266809-3-PB.pdf>.

NIITSOO, J. *et al* *Residential load harmonics in distribution grid*. IEEE Country of Publication [online] 2013. Vol 12 Sup N° 1 [cited: 8 Ene 2016] Disponible en : <http://ezproxy.uis.edu.co:2082/eds/detail/detail?vid=1&sid=7b2cd79b-971b-4017-928e-39d17d69389e%40sessionmgr4005&hid=4108&bdata=Jmxbmc9ZXMmc2l0ZT1lZHMt bGI2ZQ%3d%3d#AN=14042082&db=inh> .

ROMERO, M... *et al* *Characterization of non-linear household loads for frequency domain modeling*. Ingeniería e Investigación [online] November, 2015. Vol 35 Sup N° 1 [cited: 9 Ene 2016] Disponible en : <http://ezproxy.uis.edu.co:2091/eds/pdfviewer/pdfviewer?sid=2b160d4a-2d2f-4f76-b012-e9902ef149cb%40sessionmgr110&vid=4&hid=122> .

RYLANDER, M.; GRADY, W.M.; NARENDORF, M. *et al* *Experimental apparatus, testing results, and interpretation of the impact of voltage distortion on the current distortion of typical single-phase loads*. IEEE Transactions on Power Delivery [online] April, 2009. Vol 24 Sup N° 2 [cited: 5 Ene 2016] Disponible en : <http://ezproxy.uis.edu.co:2237/xpls/icp.jsp?arnumber=4801548> .

S. RÖNNBERG, M. BOLLEN Y M. WAHLBERG, *et al* *Harmonic Emission Before and After Changing toLED and CFL - Part I: Laboratory Measurements for a Domestic Customer*. IEEE Transactions on Power Delivery [online] 2010 [cited: 5 Ene 2016] Disponible en: <http://ezproxy.uis.edu.co:2237/xpls/icp.jsp?arnumber=5625411> .

ANEXOS

ANEXO A. Manipulación de la fuente programable Chroma

Consideraciones importantes para manipulación de la fuente programable Chroma.

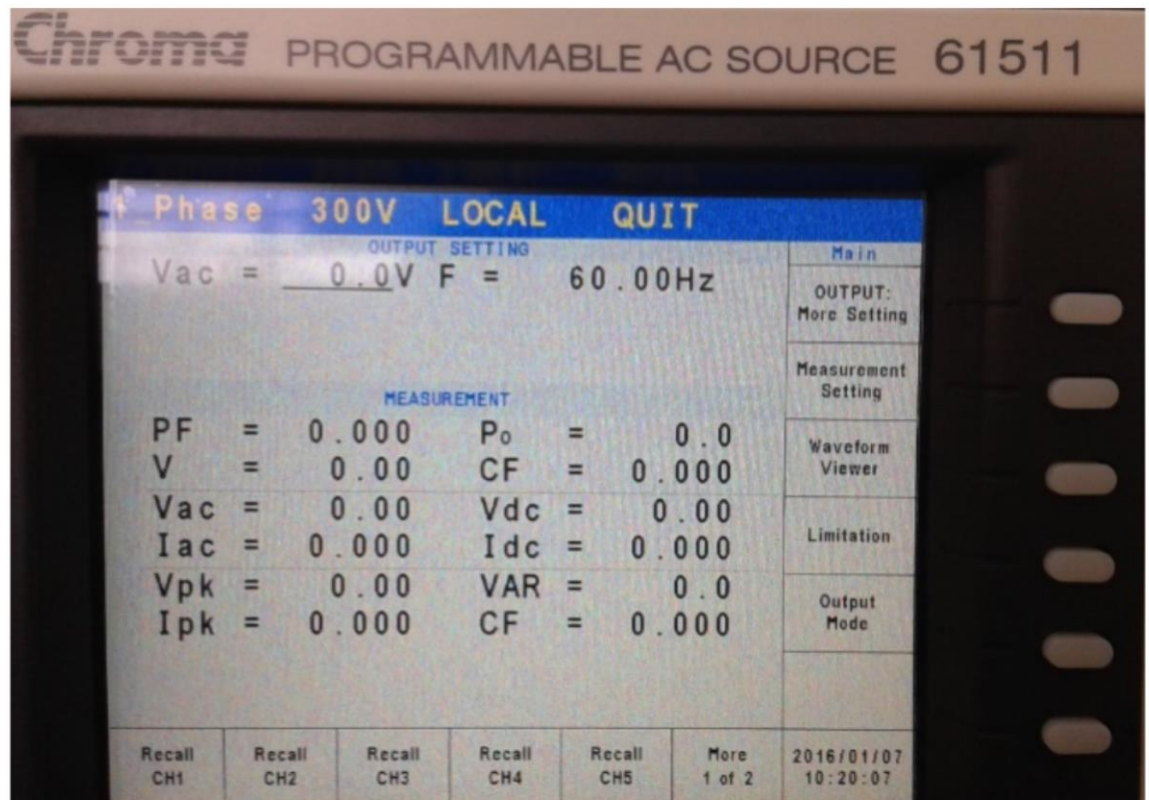
- Frecuencia mínima 15 Hz y máxima de 1500 Hz.
 - La fuente programable Chroma tiene un rango de tensión de 150 [v] a 300 [v] en AC, DC y AC-DC.
- Configuración señal de alimentación seno 120[v] – 60 [Hz]

Figura 68. Panel frontal



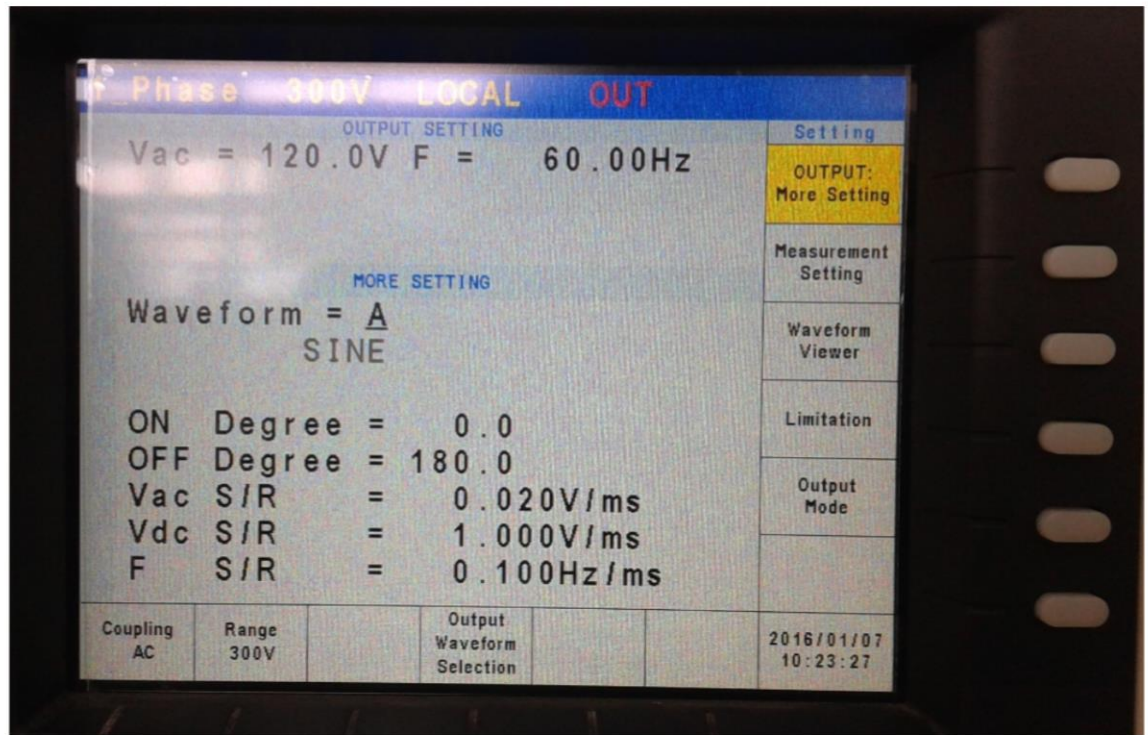
En la Figura 68, se presenta el panel frontal de la fuente programable Chroma, en él se observa: Display, RPG Rotary, cursores de movimiento, y teclado de mando.

Figura 69. Display de inicio



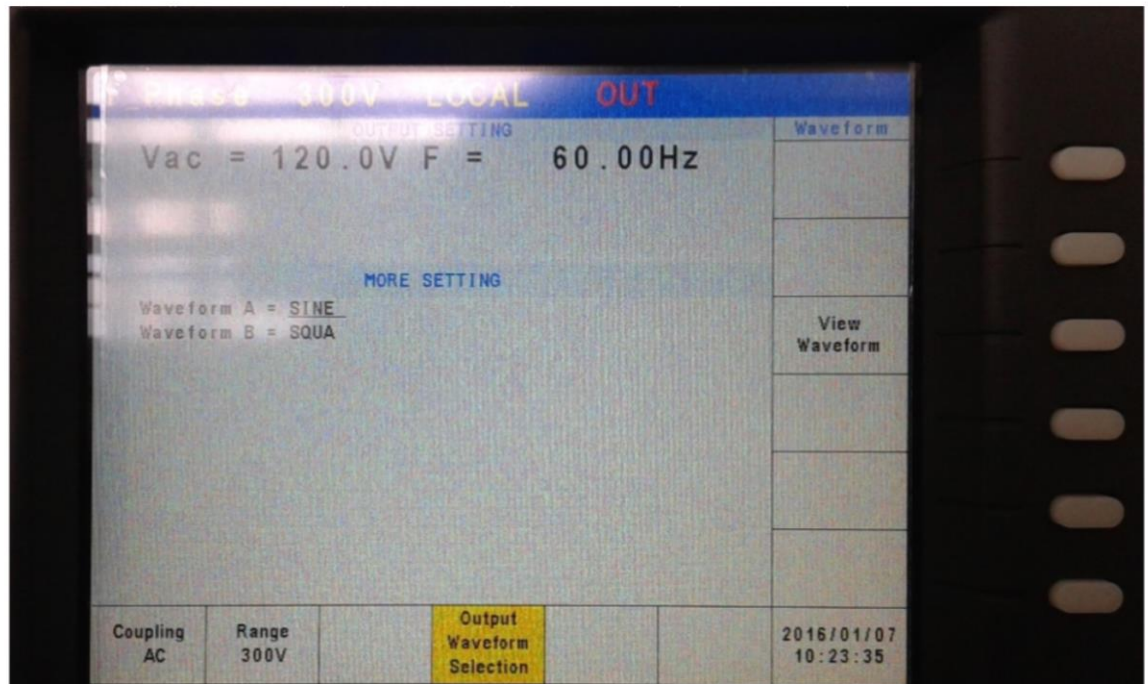
En la Figura 69, se observa en el display de inicio que se presenta al momento de encender el equipo, una columna en la parte derecha de la pantalla, en ella se presenta el menú principal para la configuración de la fuente, (OUTPUT, Measurement, Waveform, Limitation, Output Mode), También en la parte inferior se observa los diferentes canales en los cuales podemos guardar información (CH1, CH3,..., CH10).

Figura 70. Output more settieng



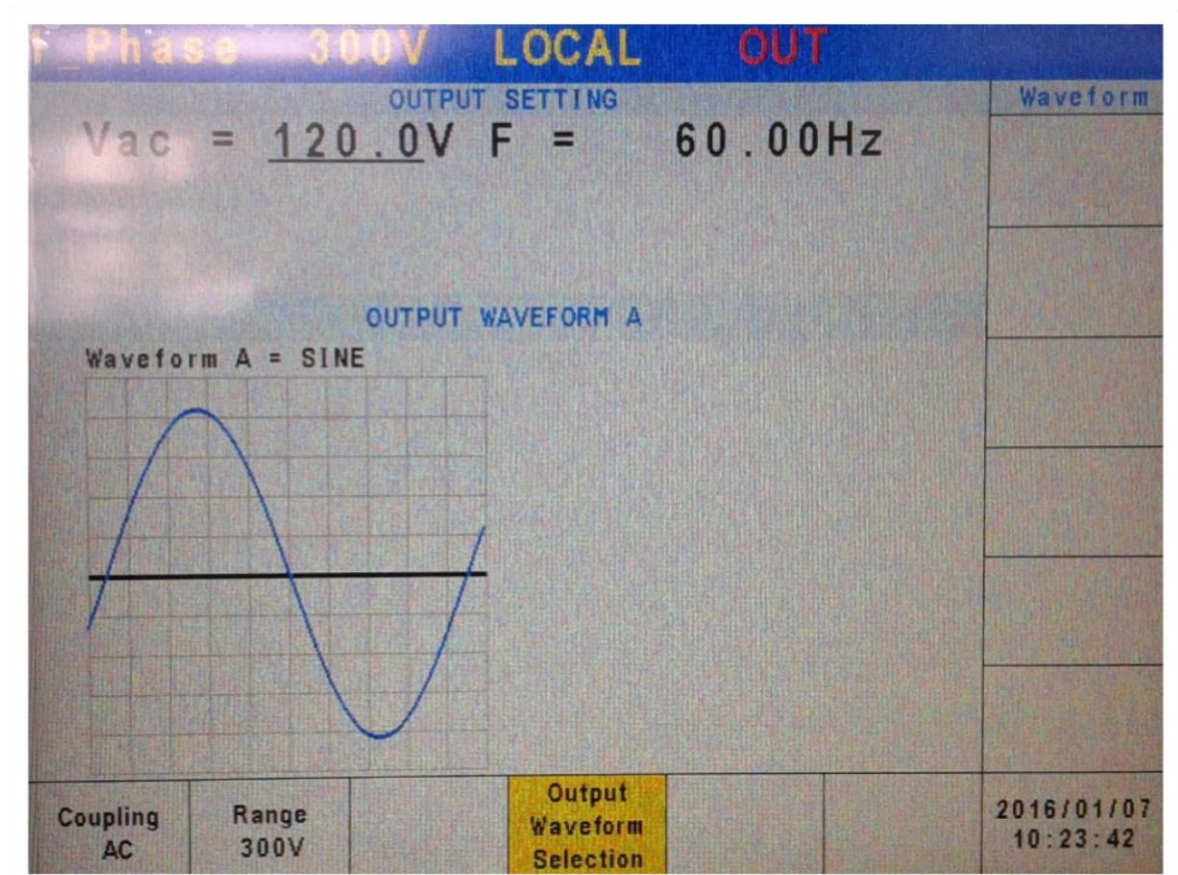
En la Figura 70, se presenta el menú que se despliega al seleccionar la opción OUTPUT More Setteng, en esta parte se puede seleccionar el tipo de señal de alimentación que esta guardada en el canal A o B en Waveform.

Figura 71. Output waveform selection



En la Figura 71, se observa el menú que se despliega al seleccionar la opción Output Waveform Selection, en esta parte se puede seleccionar las distintas señales predeterminadas que trae la fuente y se almacenan en el canal A o B.

Figura 72. View waveform



En la Figura 72, se observa el menú que se despliega al seleccionar la opción View Waveform, donde se detecta de manera gráfica la forma de onda de alimentación seleccionada (En la figura mostrada se observa la señal seno).

- Configuración señal de alimentación flat top 120[v] – 60 [Hz]

Figura 73. Output mode

Phase 300V LOCAL QUIT						
OUTPUT SETTING						Setting
Vac = 120.0V F = 60.00Hz						OUTPUT: More Setting
MEASUREMENT						Measurement Setting
PF = 0.000	Po = 0.0					Waveform Viewer
V = 0.00	CF = 0.000					Limitation
Vac = 0.00	Vdc = 0.00					
Iac = 0.000	Idc = 0.000					Output Mode
Vpk = 0.00	VAR = 0.0					
Ipk = 0.000	CF = 0.000					
List Mode	Pulse Mode	Step Mode	Synthesis	Inter- harmonics	Harmonic Meas.	2016/01/07 10:24:36

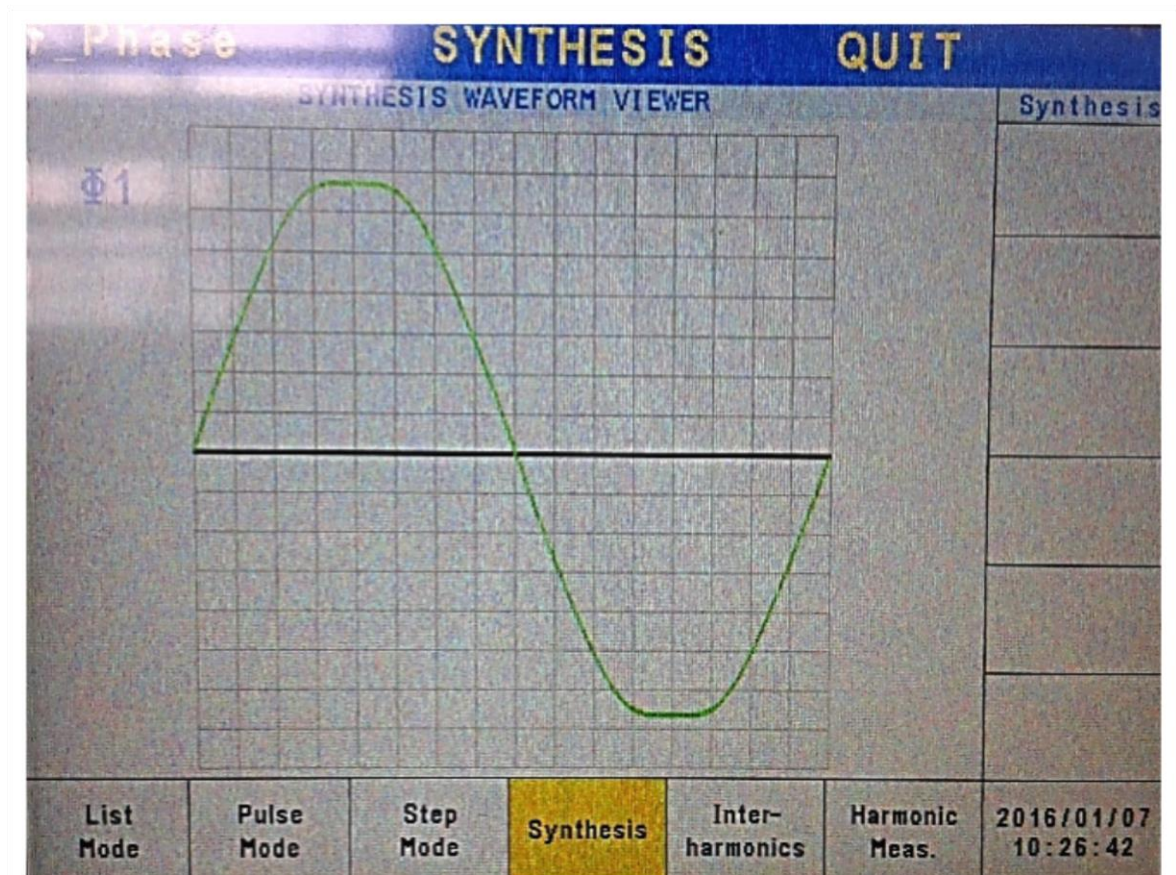
En la Figura 73, se observa el menú que se despliega al seleccionar la opción Output Mode, esta opción expande en la parte inferior más ajustes que se puede emplear para realizar la configuración de la señal Flat top establecida.

Figura 74. Synthesis Flat-Top

SYNTHESIS WAVEFORM FUNDAMENTAL SETTING									Synthesis
Vac fundamental = 116.6V			Vdc = 0.0V						Compose Value-1
F fundamental = 60Hz			Degree = 0.0°						
N	V	θ	N	V	θ	N	V	θ	
2	0.00	0.0	15	0.00	0.0	28	0.00	0.0	
3	2.77	0.0	16	0.00	0.0	29	0.00	0.0	
4	0.00	0.0	17	0.00	0.0	30	0.00	0.0	
5	1.93	180.0	18	0.00	0.0	31	0.00	0.0	
6	0.00	0.0	19	0.00	0.0	32	0.00	0.0	
7	1.04	0.0	20	0.00	0.0	33	0.00	0.0	
8	0.00	0.0	21	0.00	0.0	34	0.00	0.0	View Waveform
9	0.00	0.0	22	0.00	0.0	35	0.00	0.0	
10	0.00	0.0	23	0.00	0.0	36	0.00	0.0	
11	0.00	0.0	24	0.00	0.0	37	0.00	0.0	
12	0.00	0.0	25	0.00	0.0	38	0.00	0.0	
13	0.00	0.0	26	0.00	0.0	39	0.00	0.0	
14	0.00	0.0	27	0.00	0.0	40	0.00	0.0	Execution Page
List Mode	Pulse Mode	Step Mode	Synthesis			Inter-harmonics	Harmonic Meas.	2016/01/07 10:26:30	

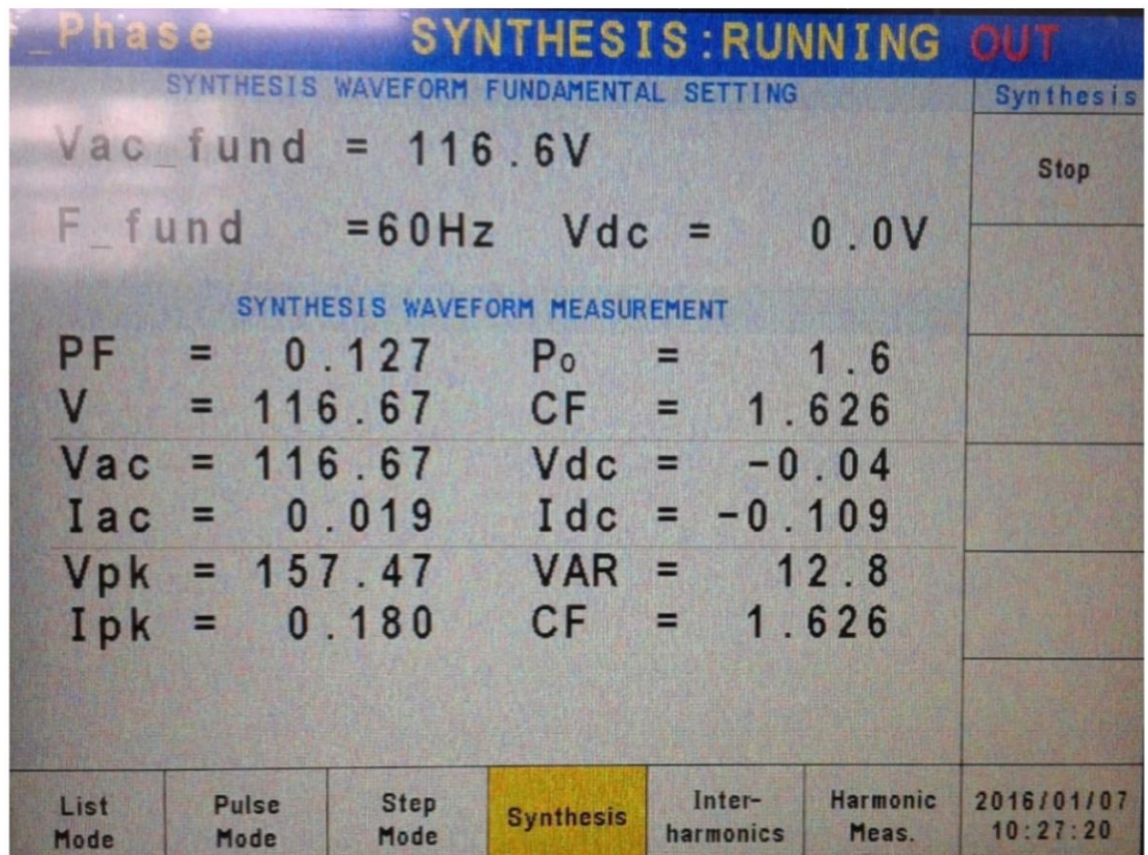
En la Figura 74, se observa el menú que se despliega al seleccionar la opción Syntesis, donde se configura el valor del voltaje, frecuencia, magnitud y ángulo de los armónicos establecidos para la señal de alimentación, además en ella se muestran los valores establecidos para la configuración de la señal Flat Top.

Figura 75. Synthesis waveform viewer (Flat-Top)



En la Figura 75, se observa el menú que se despliega al seleccionar la opción View Waveform en la ventana Syntesis, donde se percibe la gráfica de la forma de onda predeterminada (En la figura mostrada se ve la gráfica de la señal Flat Top).

Figura 76. Synthesis running (Flat-Top)



En la figura anterior se observa el menú que se despliega al seleccionar la opción Run en la ventana Synthesis. Al oprimir Run la fuente envía la señal de alimentación configurada al circuito que se va a alimentar, en el display se puede monitorear los valores establecidos como también otras variables medidas por la fuente.

- Configuración señal de alimentación Pointed-Top 120[v] – 60 [Hz]

Para realizar la configuración Pointed Top se realiza el mismo procedimiento utilizado para la señal Flat Top. Se diferencia en los valores establecidos para la señal.

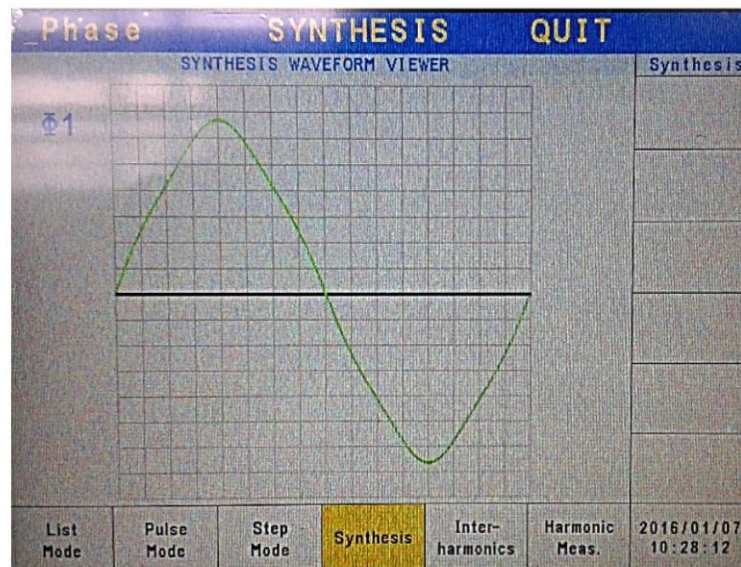
Figura 77. Synthesis pointed top

SYNTHESIS WAVEFORM FUNDAMENTAL SETTING									Synthesis
Vac fundamental = 120.0V			Vdc = 0.0V						Compose Value-1
F fundamental = 60Hz			Degree = 0.0°						
N	V	θ	N	V	θ	N	V	θ	
2	0.00	0.0	15	0.00	0.0	28	0.00	0.0	
3	3.65	180.0	16	0.00	0.0	29	0.00	0.0	
4	0.00	0.0	17	0.00	0.0	30	0.00	0.0	
5	3.65	0.0	18	0.00	0.0	31	0.00	0.0	
6	0.00	0.0	19	0.00	0.0	32	0.00	0.0	
7	0.06	0.0	20	0.00	0.0	33	0.00	0.0	
8	0.00	0.0	21	0.00	0.0	34	0.00	0.0	View Waveform
9	0.00	0.0	22	0.00	0.0	35	0.00	0.0	
10	0.00	0.0	23	0.00	0.0	36	0.00	0.0	
11	0.00	0.0	24	0.00	0.0	37	0.00	0.0	
12	0.00	0.0	25	0.00	0.0	38	0.00	0.0	
13	0.00	0.0	26	0.00	0.0	39	0.00	0.0	Execution Page
14	0.00	0.0	27	0.00	0.0	40	0.00	0.0	

List Mode	Pulse Mode	Step Mode	Synthesis	Inter-harmonics	Harmonic Meas.	2016/01/07 10:28:03
-----------	------------	-----------	-----------	-----------------	----------------	------------------------

En la Figura 77, se observa el menú que se despliega al seleccionar la opción Syntesis, donde se configura el valor del voltaje, frecuencia, magnitud y ángulo de los armónicos establecidos para la señal de alimentación, además en ella se muestran los valores establecidos para la configuración de la señal Pointed Top.

Figura 78. Synthesis waveform viewer (Pointed-Top)



En la Figura 78, se observa el menú que se despliega al seleccionar la opción View Waveform en la ventana Syntesis, donde se percibe la gráfica de la forma de onda predeterminada (En la figura se muestra la gráfica de la señal Pointed Top).

Figura 79. Synthesis running (Pointed-Top)

Phase SYNTHESIS: RUNNING OUT					
SYNTHESIS WAVEFORM FUNDAMENTAL SETTING					Synthesis
Vac_fund = 120.0V					Stop
F_fund = 60Hz Vdc = 0.0V					
SYNTHESIS WAVEFORM MEASUREMENT					
PF = 0.128	Po = 1.8				
V = 120.13	CF = 1.631				
Vac = 120.13	Vdc = -0.03				
Iac = 0.020	Idc = -0.113				
Vpk = 180.51	VAR = 13.7				
Ipk = 0.187	CF = 1.631				
List	Pulse	Step	Synthesis	Inter-	Harmonic
					2016/01/07

En la Figura 79, se observa el menú que se despliega al seleccionar la opción Run en la ventana Synthesis. Al oprimir Run la fuente envía la señal de alimentación configurada al circuito que se va a alimentar, en el display podemos monitorear los valores establecidos de la señal pointed top.

ANEXO B. Manipulación del Dranetz PowerVisa

Se presentara la forma correcta como se debe configurar el medidor de calidad de la energía Dranetz PowerVisa utilizado para realizar las mediciones.

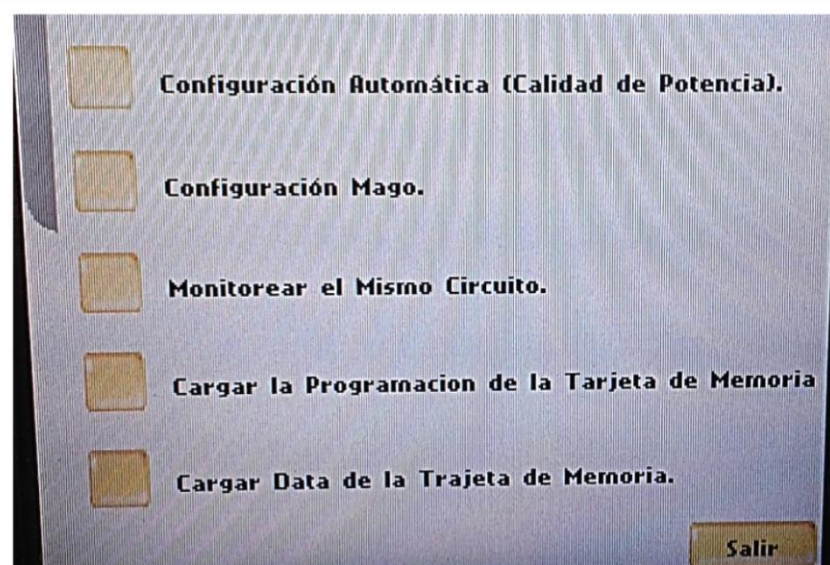
Figura 80. Menú principal



En la figura anterior se detalla el menú principal que se despliega después de energizar el equipo, en él se observan las herramientas de las que dispone el quipo, como el modo medidor, medidor de armónicos, fasor, osciloscopio, historial de las medidas, eventos especiales que el equipo captura, un reporte de las medias y modo preferencias donde se puede hacer algunas configuraciones básicas del el quipo como la fecha y la hora, entre otros.

La configuración general está en la barra que aparece en la parte inferior de la pantalla INICIAR/config. El modo de configurar es táctil de manera que se selecciona la función que se quiera utilizar del menú principal.

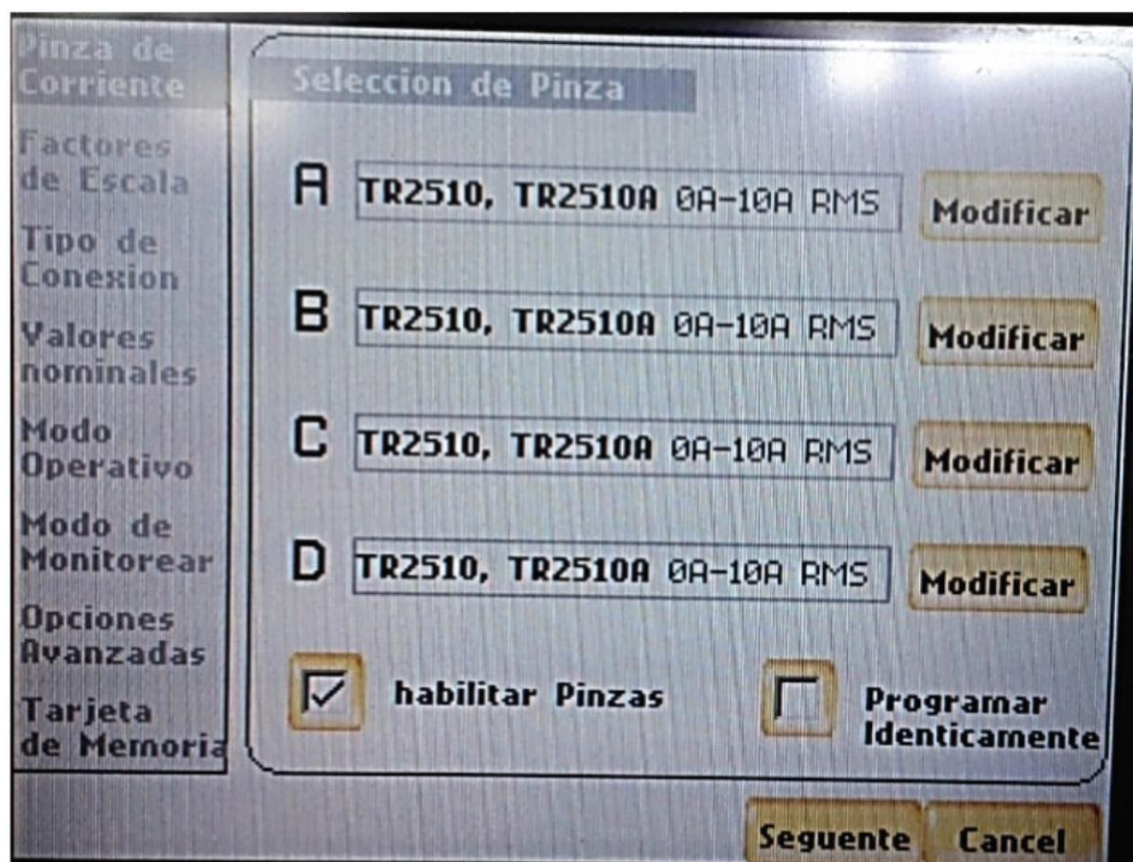
Figura 81. Índices de la opción INICIAR/config.



En la Figura 81, expone el menú que se despliega después de seleccionar en la pantalla la barra INICIAR/config, ofrece diferentes índices como configuración mago o automática que es donde se selecciona la configuración interna del equipo, cargar data de la tarjeta de memoria; esto cuando se tiene alguna configuración establecida guardada en la tarjeta de memoria extraíble del equipo.

Al oprimir la opción configuración mago se tiene:

Figura 82. Selección de las pinzas de corriente



En esta parte se escogen las pinzas de corriente que se desean utilizar, en este caso es la TR2500 de 10[A], ver Figura 82. Después de haber seleccionado correctamente las pinzas se oprime siguiente, ver Figura 83, aquí se programan factores de escala en casos de utilizar PT o CT, en este caso no es necesario cambiar la configuración actual.

Figura 83. Factores de escala

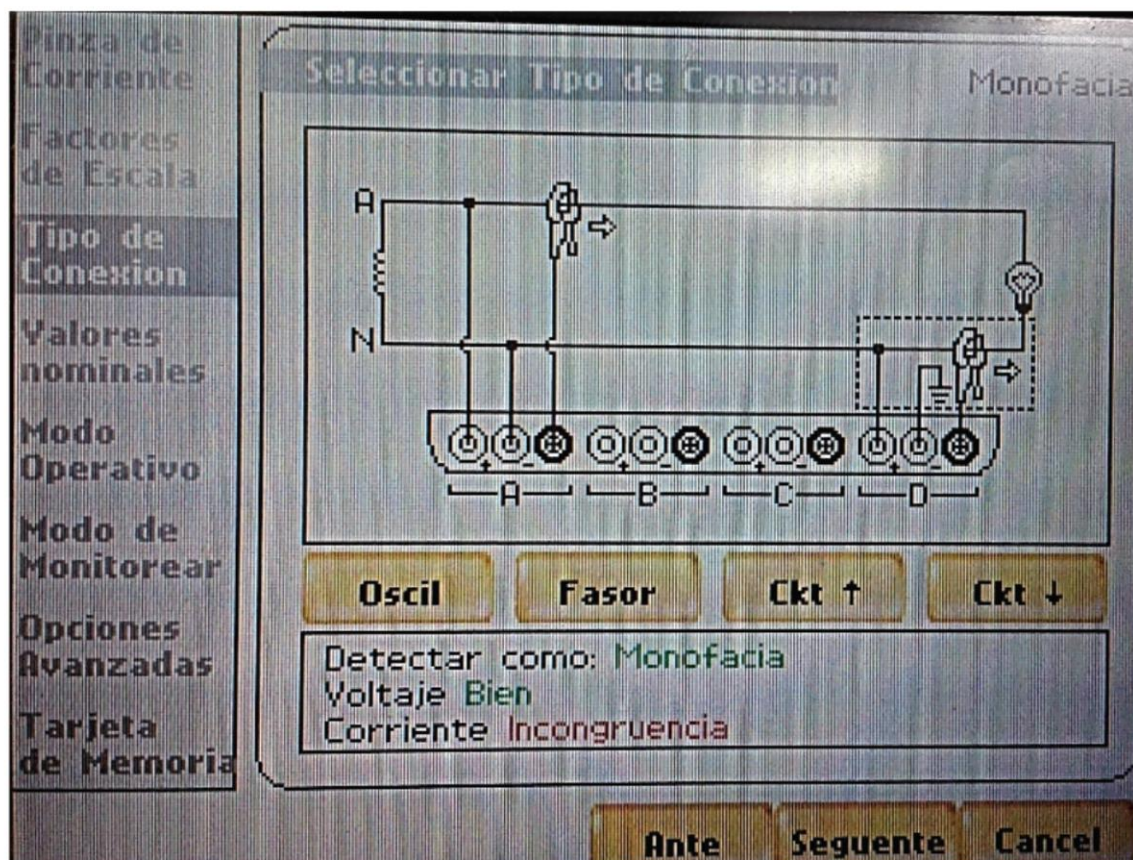
	Voltios	Amperios
A	1.000	1.000
B	1.000	1.000
C	1.000	1.000
D	1.000	1.000

Pinza de Corriente
Factores de Escala
Tipo de Conexion
Valores nominales
Modo Operativo
Modo de Monitorear
Opciones Avanzadas
Tarjeta de Memoria

Ante Seguente Cancel

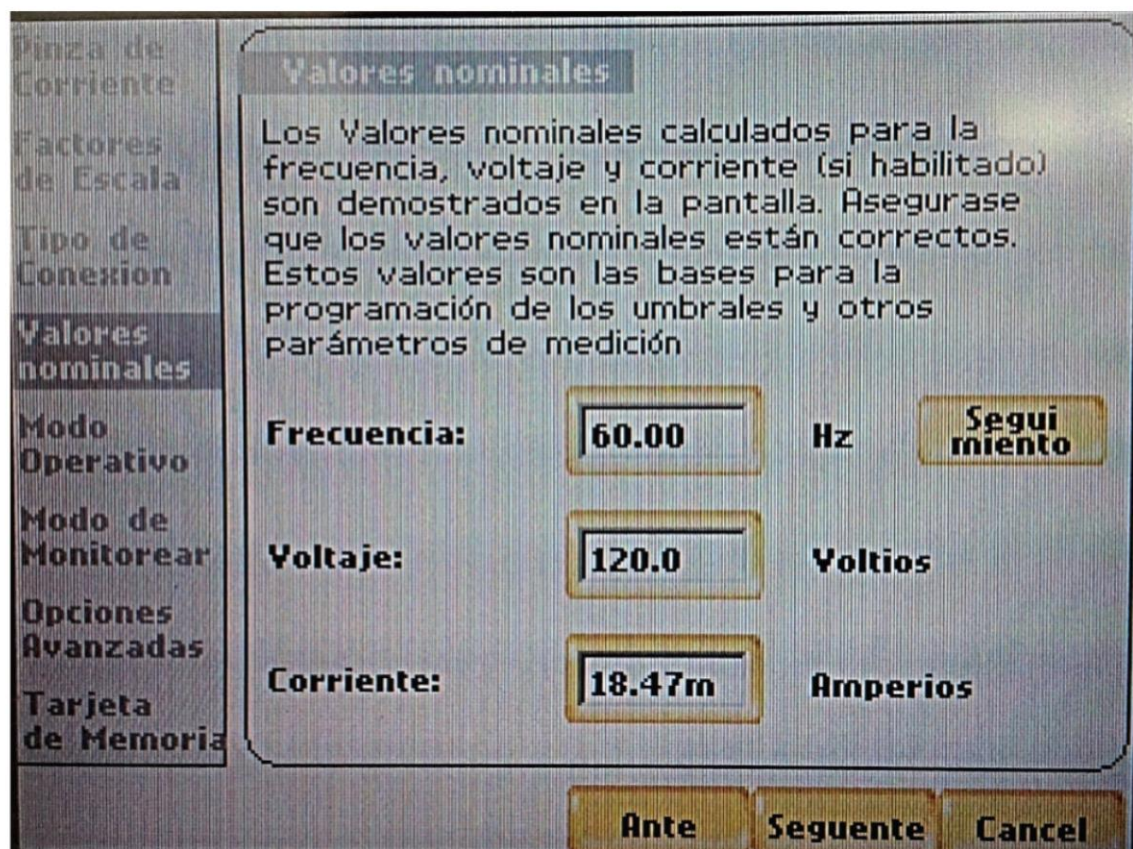
Después de haber seleccionado los factores escala se debe escoger el tipo de conexión al cual se va a conectar el medidor, es muy importante escoger la configuración correcta ya que puede generar daños irreversibles al equipo, ver Figura 83.

Figura 84. Tipo de conexión



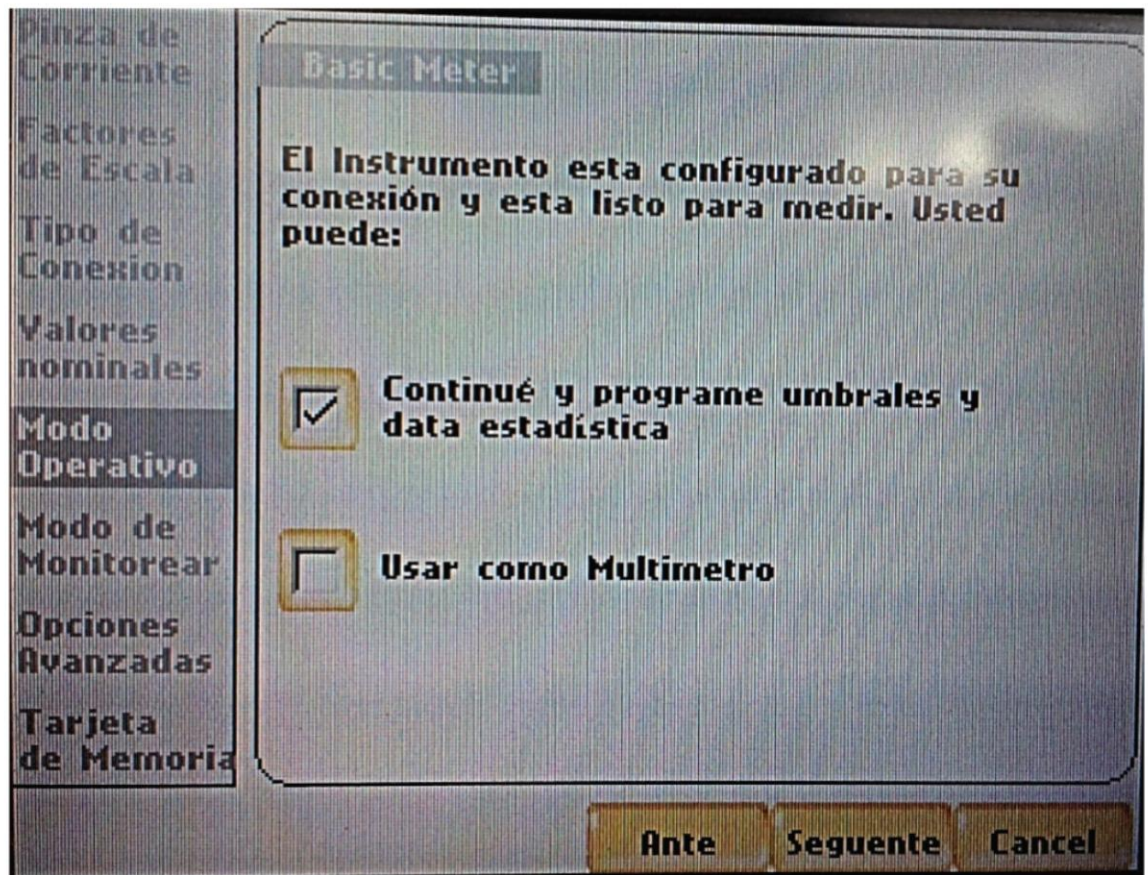
Para cambiar el tipo de circuito, se oprime la función Ckt, después de escoger el tipo de configuración ya sea monofásico, trifásico, etc, se oprime siguiente.

Figura 85. Valores nominales



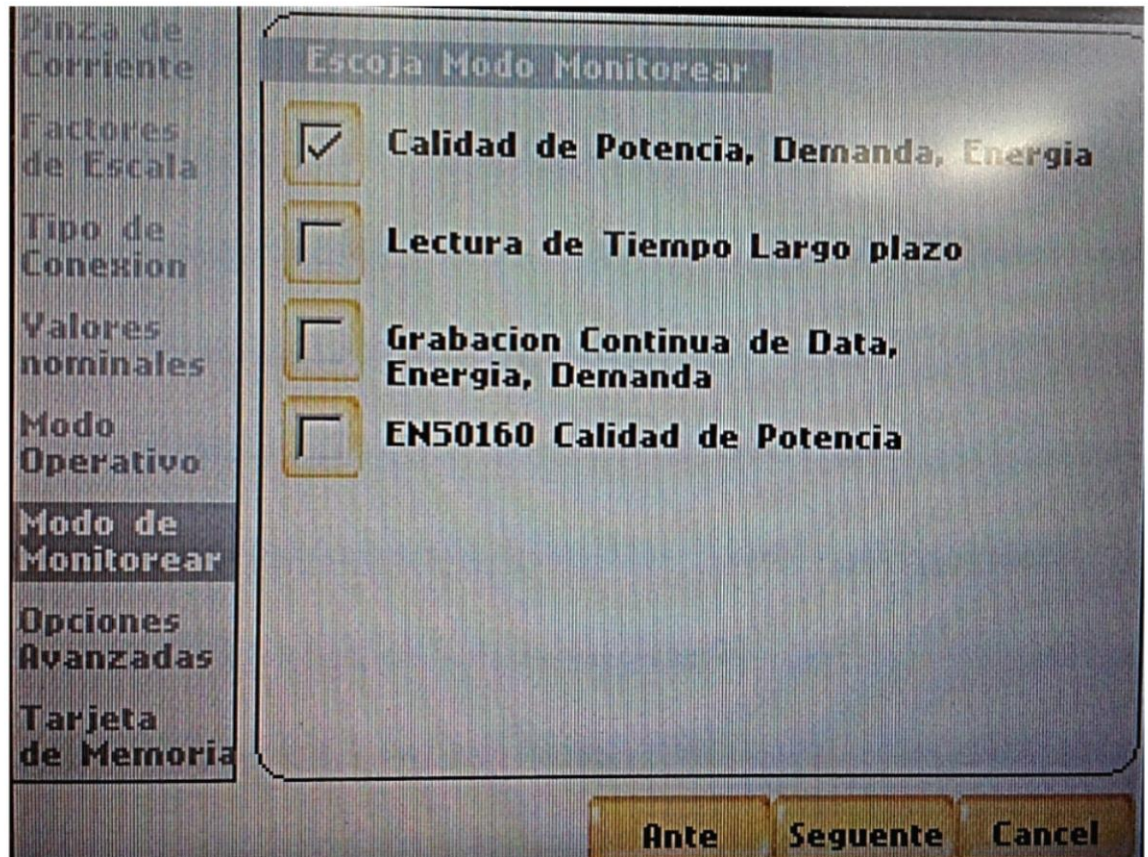
En esta función se establecen los valores nominales de frecuencia, voltaje y corriente, ver Figura 85, es importante tener claro la frecuencia nominal para que la medición sea correcta, la tensión y la corriente son configuradas automáticamente por el equipo al momento de realizar la prueba.

Figura 86. Modo operativo



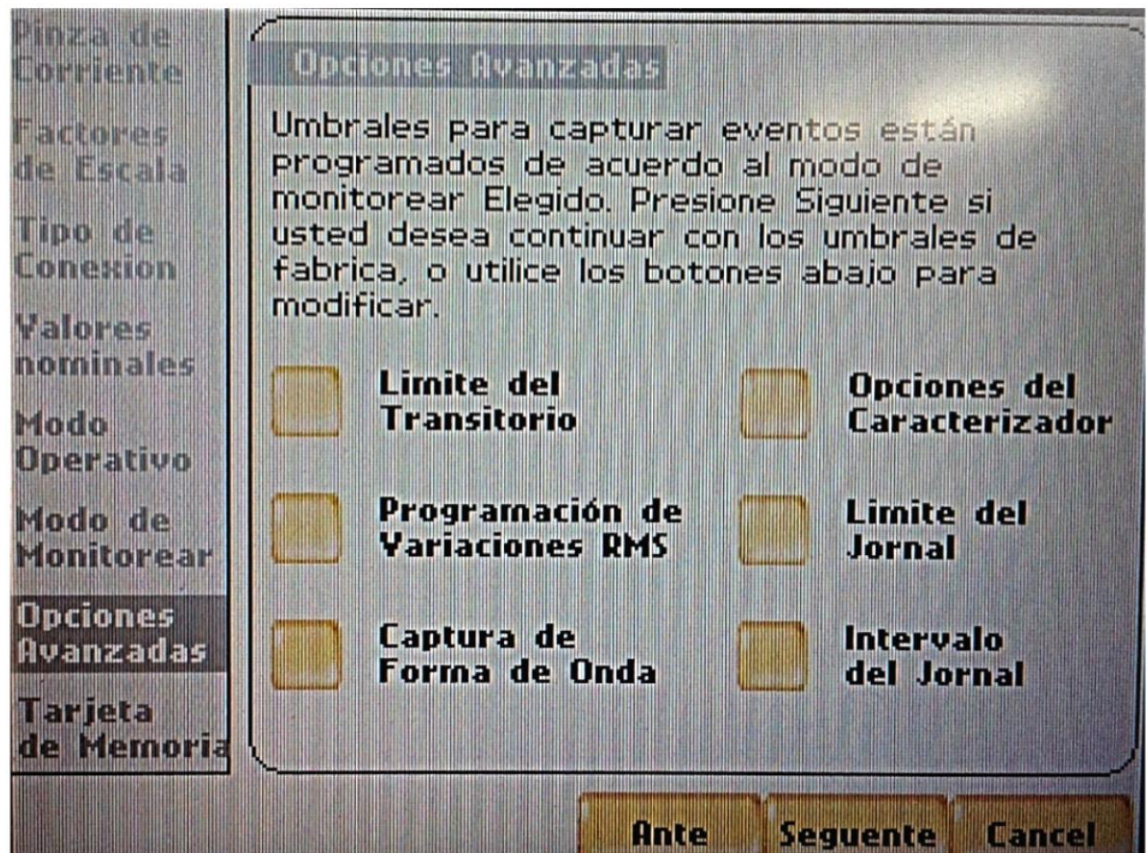
En la figura anterior se observa el modo operativo, donde se puede seleccionar el uso del multímetro o seguir con la configuración avanzada.

Figura 87. Modo monitorear



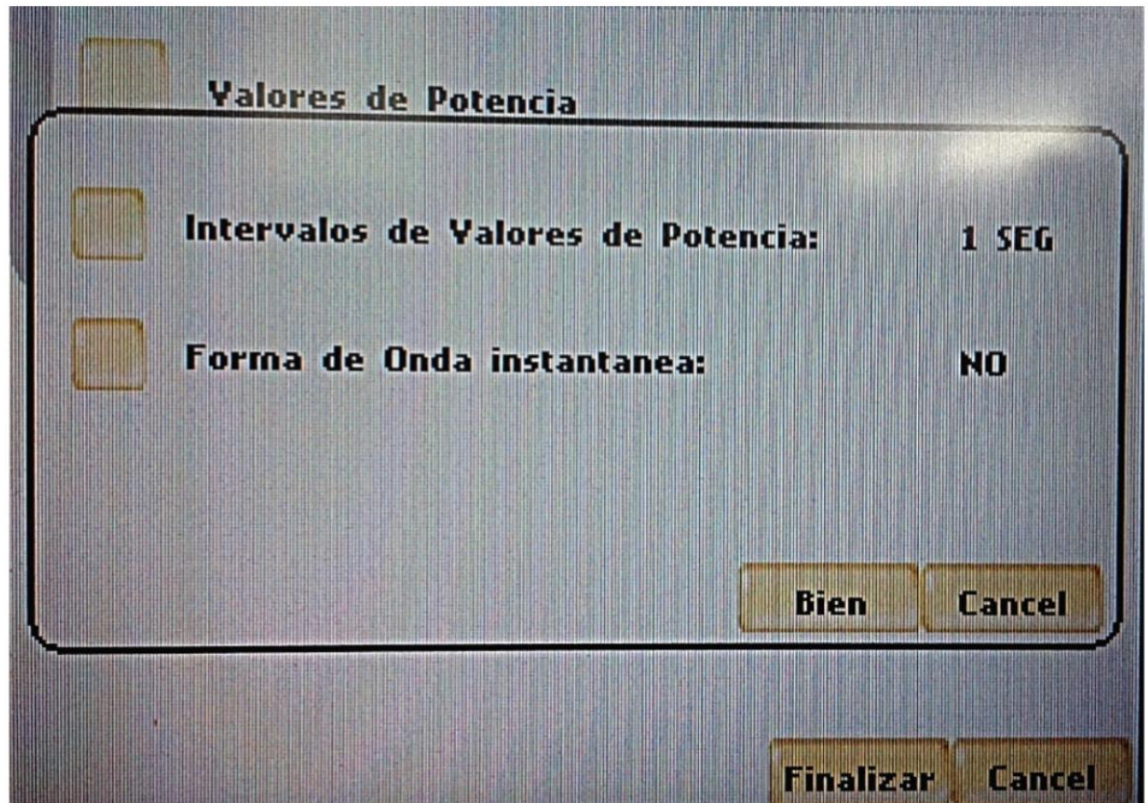
En el modo monitorear se puede seleccionar cualquier ítem, esto depende de los tipos de datos que se quieran medir. En calidad de potencia, demanda y energía es donde se puede almacenar continuamente la forma de onda, en este caso se utilizó esta opción.

Figura 88. Opciones avanzadas



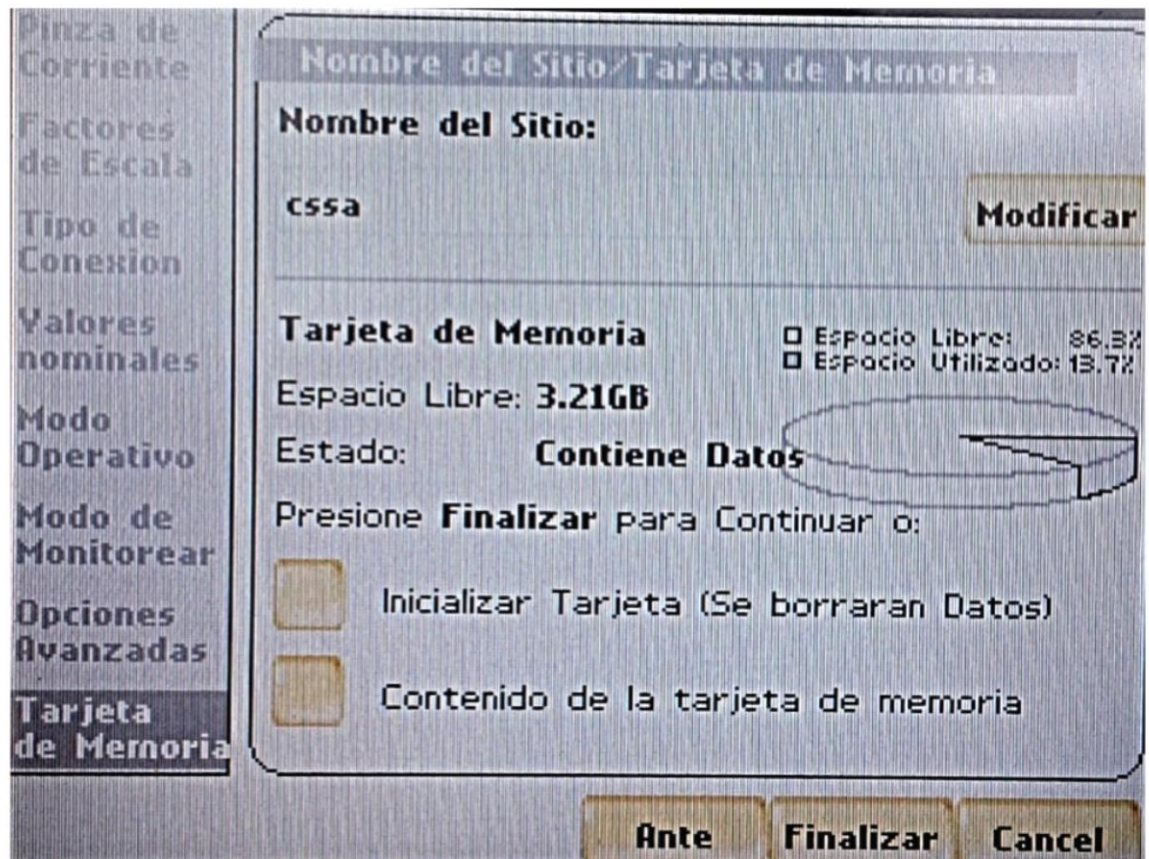
En la Figura 88, se observa el menú de opciones avanzadas en el que se puede establecer el límite de transitorios, variaciones de la señal, captura de forma de onda. Al seleccionar intervalo del jornal o trabajo se despliega:

Figura 89. Intervalo del jornal.



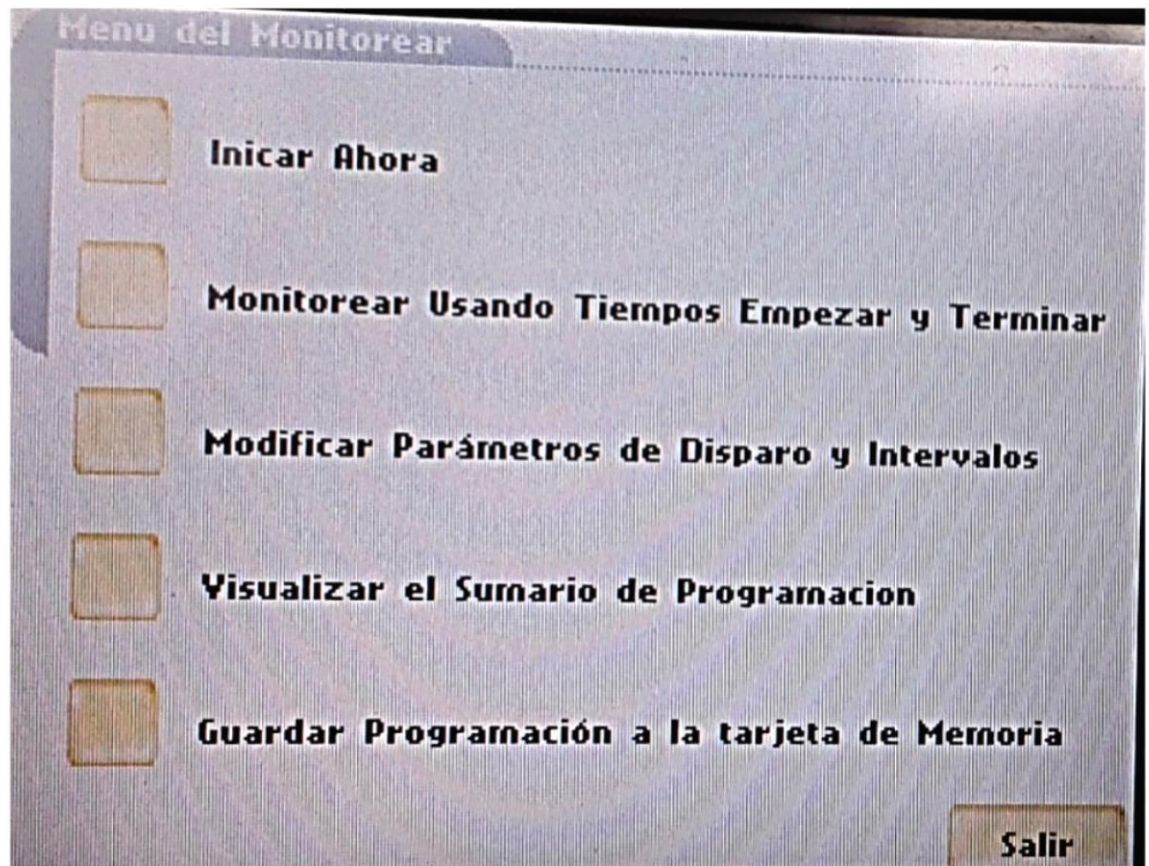
En la Figura 89, se tienen valores de potencia, en esta opción el tiempo de censado debe ser de 1 segundo para tener un control más preciso de la onda.

Figura 90. Tarjeta de memoria



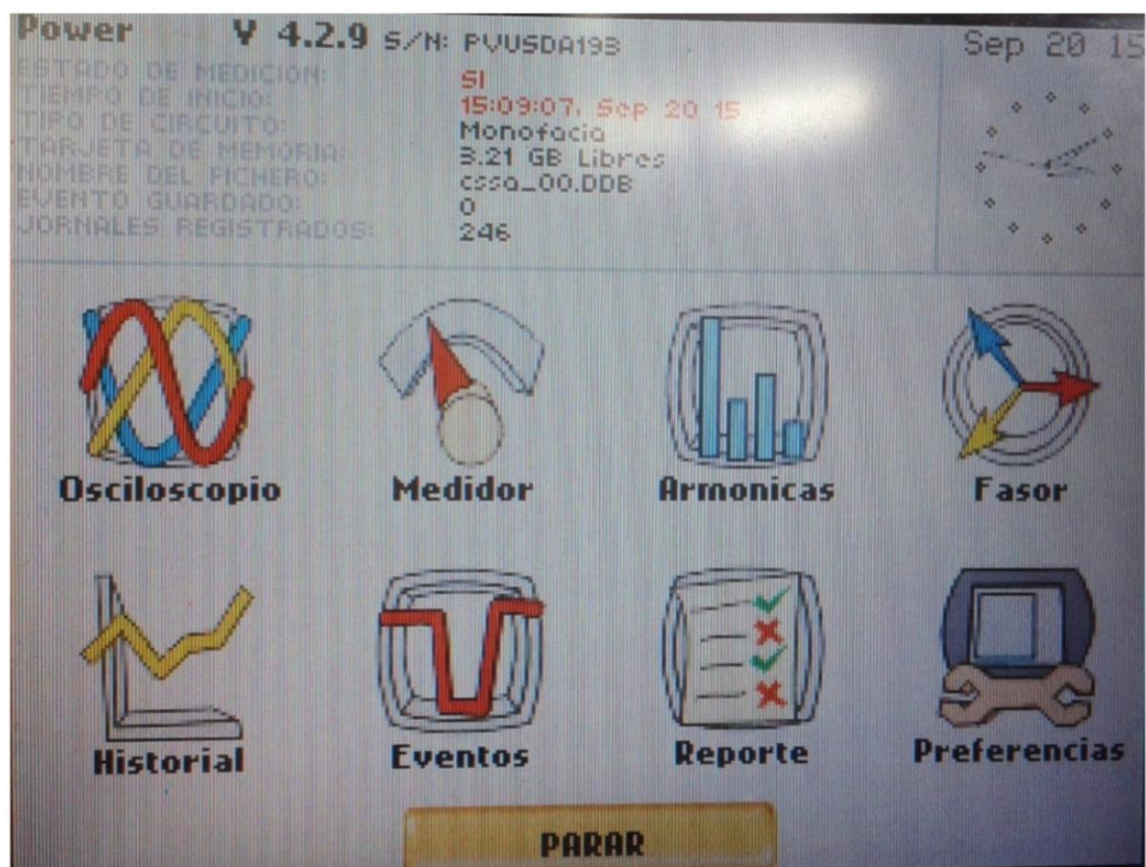
En la Figura 90, se ve el menú de la tarjeta de memoria, es donde se puede modificar el nombre que se desea asignar a los datos que se van a analizar. La opción inicializar tarjeta permite formatear la memoria, es decir borra los datos que tenga almacenado, se oprime finalizar y con esto se termina la configuración del equipo.

Figura 91. Monitorear el mismo circuito



En la Figura 91, se observa el menú que se despliega después de seleccionar la opción finalizar, esto permite empezar a almacenar datos de la prueba al seleccionar la opción **Iniciar Ahora**.

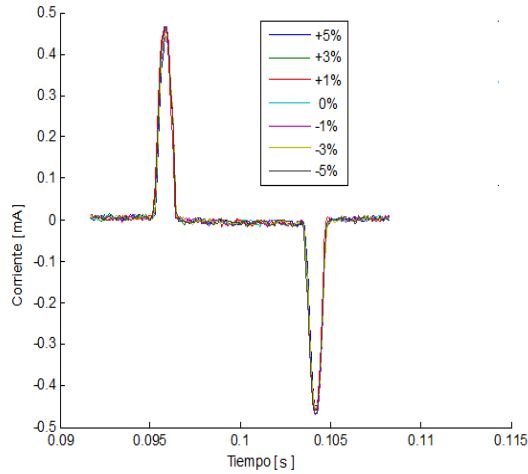
Figura 92. Toma de datos en curso



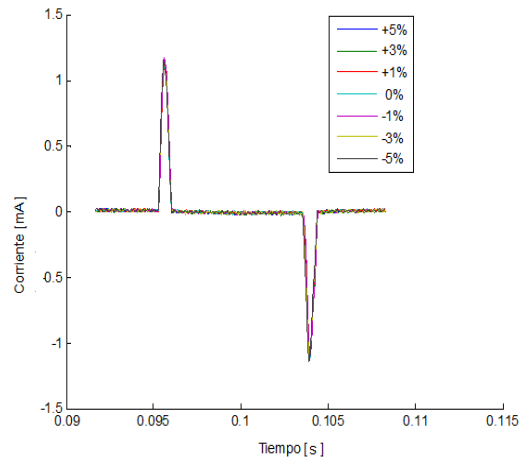
Después de iniciar el almacenamiento de datos se despliega la Figura 92, que indica que el equipo está midiendo. Para detener la prueba se selecciona la opción parar.

ANEXO C. Corrientes de los electrodomésticos analizados.

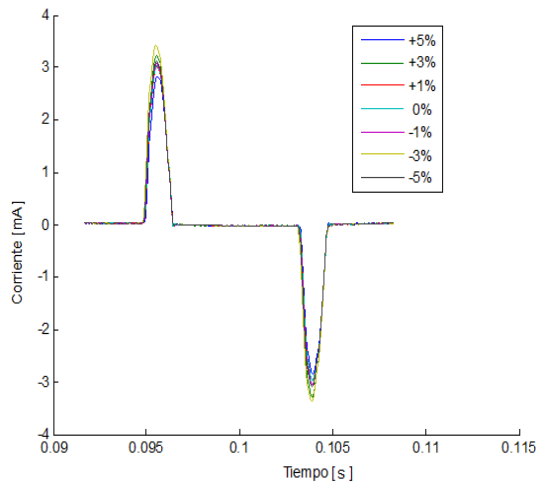
Figura 93. Corrientes de los electrodomésticos analizados en este trabajo, alimentados con una señal seno a 0 metros del punto de acople común y en barrido de tensión



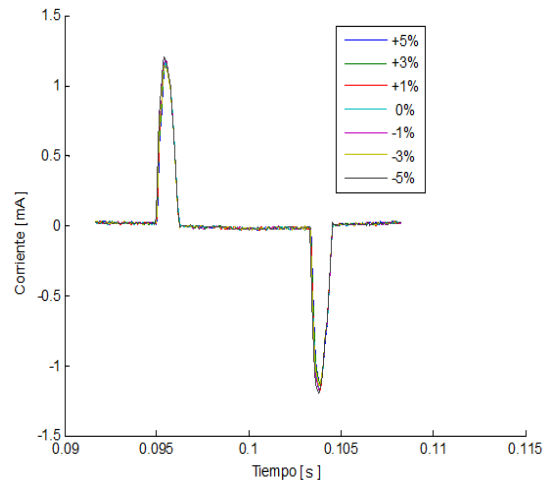
(a) DVD



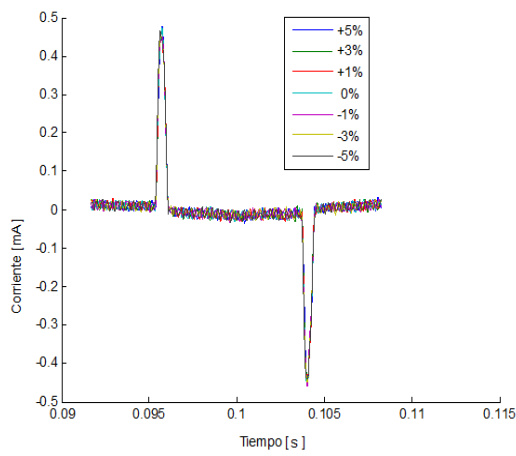
(b) Monitor de 19''



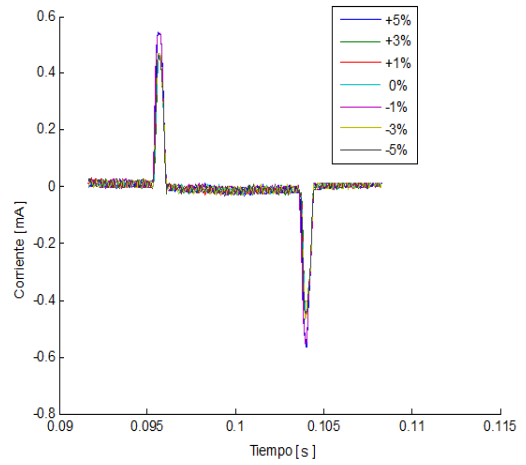
(c) Monitor Flatron



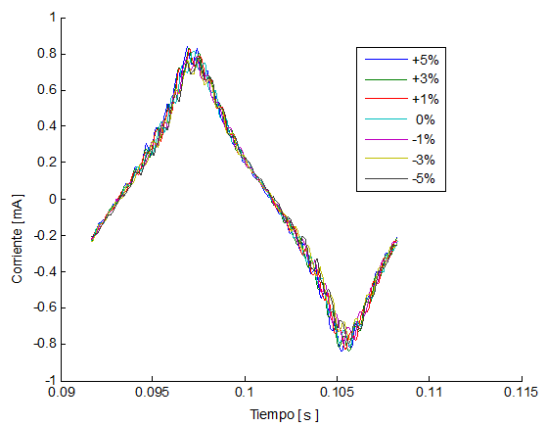
(d) Monitor de 24''



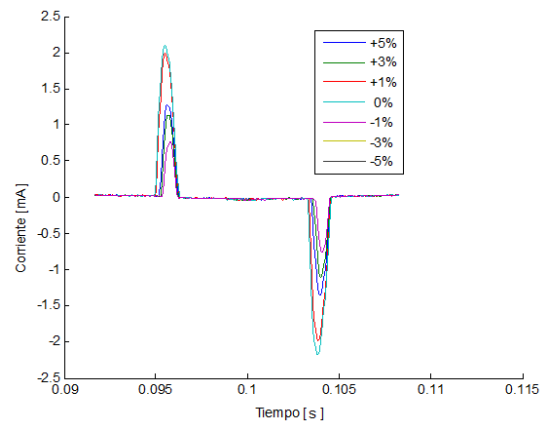
(e) Decodificador 1



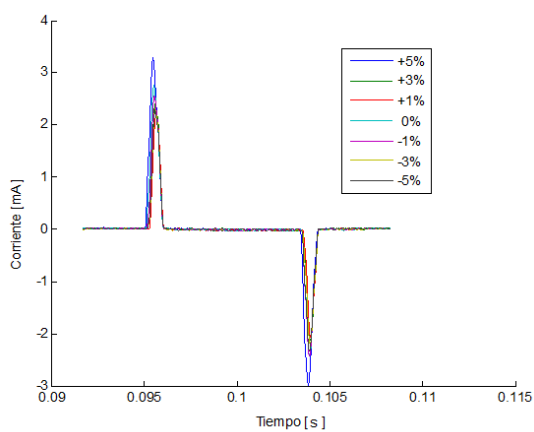
(f) Decodificador 2



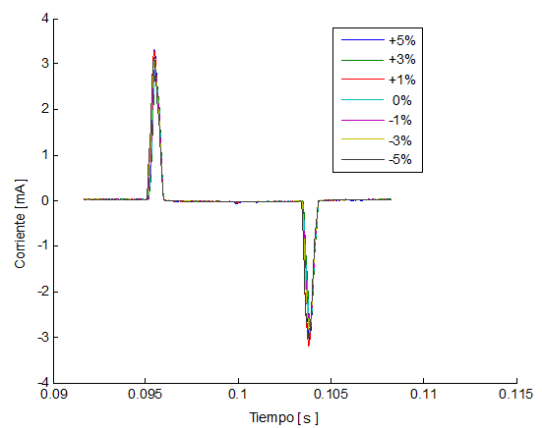
(g) Batidora



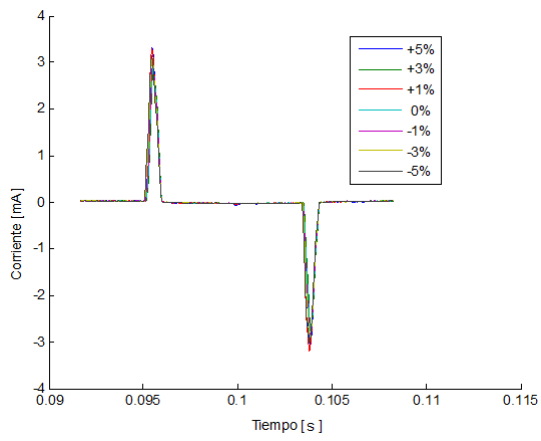
(h) Impresora



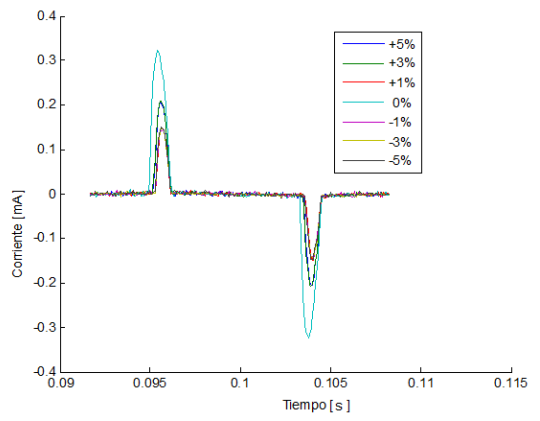
(i) PC portátil 1



(j) PC portátil 2



(k) TV 21''



(l) Tablet Galaxy Note

ANEXO D. Tablas de sensibilidad

Tabla 13. Sensibilidad del electrodoméstico 1 a variaciones de longitud del circuito ramal, cuando es alimentado a regulación del 0% y con forma de onda sinusoidal

Orden Armo. [mA]	Variación de longitud del circuito ramal					
	2,4 metros		7 metros		20 metros	
	Sensibilidad	Desviación	Sensibilidad	Desviación	Sensibilidad	Desviación
1	83,3745	-	102,1592	-	54,8584	66,8963
3	80,7347	-	99,9176	-	53,4069	65,2731
5	71,3008	-	91,0365	-	48,4792	58,3944
7	58,4110	-	78,1644	-	41,1301	49,1426
9	44,1561	-	63,2083	-	33,2743	38,1180
11	29,7202	-	47,3015	-	24,5933	26,9568
13	15,9602	-	30,7884	-	15,9579	15,5728
15	5,0787	-	16,6120	-	8,5737	5,9944
17	2,0835	-	5,3975	-	3,0844	0,7599
19	8,5370	-	3,5048	-	4,6289	2,2225
21	10,7172	-	5,1577	-	4,3422	4,6903
Irms [mA]	240,0583	-	196,0436	-	113,0553	84,2143
Energía [A²]	0,0432	-	0,0494	-	0,0286	0,0311

Tabla 14. Sensibilidad del electrodoméstico 5 a variaciones de longitud del circuito ramal, cuando es alimentado a regulación del 0% y con forma de onda sinusoidal

Orden Armo. [mA]	Variación de longitud del circuito ramal					
	2,4 metros		7 metros		20 metros	
	Sensibilidad	Desviación	Sensibilidad	Desviación	Sensibilidad	Desviación
1	11,7507	-	0,4412	-	7,6722	5,6427
3	9,6219	-	0,1590	-	6,5746	4,2125
5	5,1952	-	1,4545	-	4,3145	2,0472
7	0,8765	-	3,8213	-	1,4258	1,6116
9	6,0535	-	5,7041	-	2,9008	1,9393
11	9,5014	-	6,8924	-	4,1246	4,7427
13	9,7440	-	6,6385	-	4,2514	5,4421
15	4,8590	-	4,8657	-	2,3012	2,8840
17	1,0458	-	1,0966	-	0,8677	0,3830
19	0,9940	-	0,4360	-	0,8599	0,3093
21	1,5949	-	1,3703	-	0,9281	0,6510
Irms [mA]	6,2516	-	4,0149	-	5,9377	1,9879
Energía [A²]	0,0035	-	2,3340	-	3,4968	0,9786

Tabla 15. Sensibilidad del electrodoméstico 7 a variaciones de longitud del circuito ramal, cuando es alimentado a regulación del 0% y con forma de onda flat-top

Orden Armo. [mA]	Variación de longitud del circuito ramal					
	2,4 metros		7 metros		20 metros	
	Sensibilidad	Desviación	Sensibilidad	Desviación	Sensibilidad	Desviación
1	19,8561	-	47,7336	-	29,4230	7,7472
3	10,7149	-	16,7589	-	12,8988	4,9748
5	0,7339	-	0,0674	-	3,3771	1,4502
7	2,2324	-	0,0730	-	0,1178	0,0714
9	1,3291	-	1,3532	-	0,2432	0,3243
11	0,9448	-	2,2492	-	1,7059	0,5518
13	1,2722	-	2,5849	-	2,3156	1,0810
15	1,0899	-	0,2597	-	2,5723	0,9111
17	1,8132	-	0,7528	-	1,7407	0,7645
19	2,7903	-	2,4115	-	0,9879	1,0435
21	1,0022	-	1,9484	-	1,9330	0,4569
Irms [mA]	15,7841	-	39,4704	-	24,8755	3,4571
Energía [A^2]	0,0527	-	115,9795	-	74,0470	10,6648

Tabla 16. Sensibilidad del electrodoméstico 9 a variaciones de longitud del circuito ramal, cuando es alimentado a regulación del 0% y con forma de onda pointed-top

Orden Armo. [mA]	Variación de longitud del circuito ramal					
	2,4 metros		7 metros		20 metros	
	Sensibilidad	Desviación	Sensibilidad	Desviación	Sensibilidad	Desviación
1	18,7507	-	18,6225	-	8,4238	0,1056
3	17,5819	-	17,4918	-	7,8704	0,2850
5	15,7922	-	15,8293	-	7,0604	0,3727
7	13,8060	-	13,9016	-	6,0192	0,0381
9	11,3426	-	11,4333	-	4,7593	0,2146
11	8,8891	-	8,6386	-	3,4372	0,2866
13	6,1858	-	6,1947	-	2,4253	0,6968
15	3,5283	-	3,5435	-	0,6974	0,7877
17	1,0471	-	1,1257	-	0,4849	0,5591
19	0,3177	-	0,0226	-	0,6083	0,3829
21	1,1731	-	0,8880	-	0,5957	0,4956
Irms [mA]	19,3557	-	22,4366	-	7,6779	6,1535
Energía [A^2]	0,0050	-	5,0807	-	2,3789	0,1094

Tabla 17. Sensibilidad del electrodoméstico 3 a variaciones de tensión, cuando es alimentado a regulación del 0% y con forma de onda sinusoidal

Orden Armo. [mA]	Variación de tensión de alimentación							
	0,01		0,02		0,04		0,05	
	Sensibilidad	Desviación	Sensibilidad	Desviación	Sensibilidad	Desviación	Sensibilidad	Desviación
1	6,6532	0,5346	2,5048	0,5282	5,3038	0,9240	1,2524	0,9098
3	6,3835	0,3279	2,6052	0,4394	4,9901	0,7185	1,3026	0,8167
5	5,6083	0,3953	2,0659	0,4920	4,0636	0,6785	0,9345	0,5220
7	4,6883	0,1913	1,4211	0,7335	3,2782	0,7341	0,7104	0,1811
9	3,5404	0,2248	0,9101	1,0087	2,3448	1,0520	0,3593	0,3947
11	2,3216	0,2253	0,4571	1,0621	1,2342	1,2083	0,4948	0,0355
13	1,1551	0,5155	1,2474	0,8924	1,2491	0,5557	0,8882	0,2919
15	0,3926	0,2064	1,8061	0,6537	1,7589	1,2629	1,2800	0,9039
17	0,4937	0,5195	1,9701	0,7688	2,0589	1,6119	1,6353	1,3195
19	0,7558	0,8698	1,8616	0,7973	1,8266	1,6688	1,7756	1,3164
21	0,9166	0,3783	1,6672	0,6563	1,5398	1,4762	1,5704	0,9987
Irms [mA]	7,2591	0,0139	3,1932	0,7070	5,4661	1,0304	0,8875	0,5624
Energía [A^2]	0,0035	0,0006	0,0009	0,0008	0,0023	0,0008	0,0004	0,0003

Tabla 18. Sensibilidad del electrodoméstico 8 a variaciones de tensión, cuando es alimentado a regulación del 0% y con forma de onda sinusoidal

Orden Armo. [mA]	Variación tensión de alimentación							
	1%		2%		4%		5%	
	Sensibilidad	Desviación	Sensibilidad	Desviación	Sensibilidad	Desviación	Sensibilidad	Desviación
1	16,7401	2,8073	1,3002	0,4098	2,1533	1,1206	17,4830	0,9194
3	16,0586	3,3903	1,3800	0,4896	2,2522	1,0101	16,6034	1,0919
5	14,8558	2,7324	1,1665	0,4221	1,9659	0,9966	15,3874	0,8911
7	13,0326	2,3274	1,0679	0,4061	1,6498	0,9747	13,4576	0,9017
9	10,9469	1,7239	0,8976	0,3820	1,2225	0,7861	11,2505	0,6347
11	8,4304	1,1872	0,7530	0,2979	0,9523	0,6987	8,7929	0,5325
13	6,0383	0,4754	0,5022	0,4166	0,2332	0,6010	6,0326	0,1456
15	3,6371	0,0702	0,3600	0,2326	0,2667	0,3263	3,8400	0,2545
17	1,4554	0,7151	0,3889	0,3583	0,5297	0,0809	1,4032	0,0341
19	0,8552	0,1420	0,1716	0,3165	0,6358	0,2834	0,0753	0,0471
21	0,8896	1,2026	0,3977	0,3758	0,8812	0,2807	0,9222	0,0437
Irms [mA]	19,4052	9,1293	4,8134	3,2332	5,7003	5,0327	15,4027	6,3256
Energía [A^2]	0,0046	0,0006	0,0003	0,0001	0,0005	0,0003	0,0048	0,0002

Tabla 19. Sensibilidad del electrodoméstico 9 a variaciones de tensión, cuando es alimentado a regulación del 0% y con forma de onda sinusoidal

Orden Armo. [mA]	Variacion tensión de alimentación							
	1%		2%		4%		5%	
	Sensibilidad	Desviación	Sensibilidad	Desviación	Sensibilidad	Desviación	Sensibilidad	Desviación
1	2,6200	0,2040	1,5453	9,8241	2,5371	9,6672	0,7727	0,5659
3	2,7559	0,1941	1,6100	9,4299	2,5847	9,3470	0,8050	0,4619
5	2,3289	0,1390	1,5902	8,7689	2,1561	8,7651	0,7951	0,4176
7	1,7889	0,0324	0,9506	7,8320	1,5487	7,6016	0,4753	0,2003
9	1,1279	0,0360	0,8486	6,6365	0,8801	6,5065	0,4243	0,1452
11	0,4153	0,0906	0,3623	5,2848	0,4552	4,9897	0,1812	0,1473
13	0,1581	0,2108	0,1594	3,7941	0,2038	3,4371	0,1727	0,0775
15	0,6417	0,0196	0,7134	2,2927	0,7540	1,6434	0,3567	0,2007
17	1,0183	0,2516	0,7976	0,9037	0,8779	0,3647	0,3988	0,4096
19	1,2487	0,0382	0,6145	0,3586	0,9357	0,4163	0,4885	0,1925
21	1,0044	0,0835	0,6353	0,3422	0,9354	0,6169	0,3730	0,2030
Irms [mA]	6,1524	4,3622	5,3272	3,9485	7,2294	2,9522	4,1848	3,7669
Energía [A^2]	0,0006	0,0001	0,0004	0,0027	0,0006	0,0027	0,0002	0,0001

Tabla 20. Sensibilidad del electrodoméstico 14 a variaciones de tensión, cuando es alimentado a regulación del 0% y con forma de onda sinusoidal

Orden Armo. [mA]	Variacion tensión de alimentación							
	1%		2%		4%		5%	
	Sensibilidad	Desviación	Sensibilidad	Desviación	Sensibilidad	Desviación	Sensibilidad	Desviación
1	35,4956	0,3058	15,0669	2,3926	27,7819	2,7947	6,0953	4,1954
3	30,5966	2,3855	13,2578	2,0695	23,8757	2,2486	4,6510	4,9166
5	21,7164	5,8199	10,0212	3,2163	17,3566	3,0235	3,4884	2,5915
7	10,4294	10,0355	6,7873	3,5429	6,7902	5,2346	3,6548	2,1783
9	9,9237	1,2836	6,6153	2,7509	6,2761	3,4414	4,9941	5,5786
11	11,7406	15,3046	5,7005	6,3126	12,1630	5,2247	7,6360	5,9284
13	17,3038	16,6366	4,3258	7,7414	17,9536	9,9214	9,2355	4,8406
15	18,4234	12,4235	5,3221	7,4082	17,8848	9,0389	9,0535	2,9739
17	5,1322	3,2521	2,1147	3,8001	6,1896	5,9681	5,0514	0,4692
19	12,0970	5,8583	3,7057	3,1505	11,0458	3,1341	3,9466	1,3999
21	7,6115	0,5386	3,6494	1,6803	6,2354	1,7217	2,4743	0,3419
Irms [mA]	29,9248	8,8337	11,3285	5,3893	21,9253	6,1936	3,0065	3,5457
Energía [A^2]	0,0471	0,0175	0,0233	0,0109	0,0374	0,0108	0,0099	0,0013

ANEXO E. Grafica de corriente eficaz y valor pico

Figura 94. Corriente eficaz frente a variaciones en regulación, la distancia y tipo de onda de alimentación del electrodoméstico 2 (equipo de sonido)

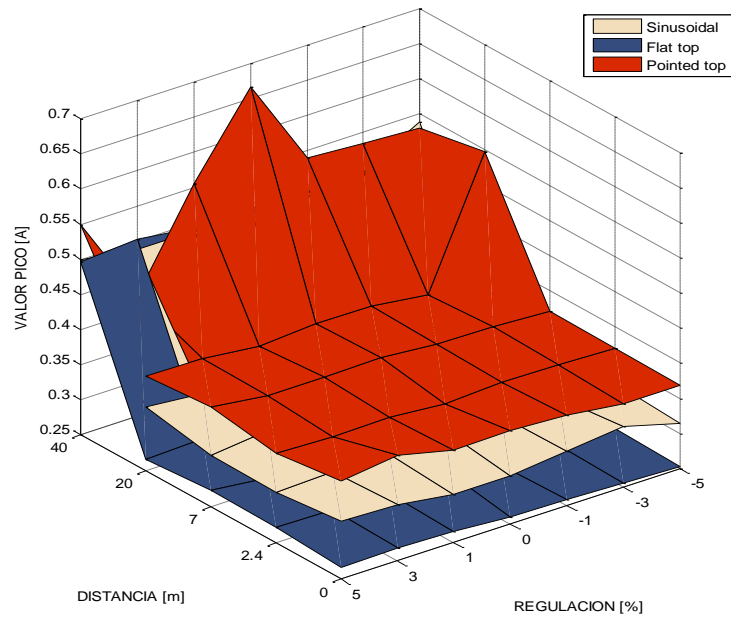


Figura 95. Valor pico de corriente frente a variaciones en regulación, la distancia y tipo de onda de alimentación del electrodoméstico 2 (equipo de sonido)

