

ESTUDIO DE CASOS DE LA SENSIBILIDAD DEL ESPECTRO ARMÓNICO DE  
CARGAS DE ILUMINACIÓN ANTE VARIACIONES EN LA AMPLITUD Y  
DISTORSIÓN DE LA TENSIÓN DE ALIMENTACIÓN

RUBEN DARIO URIBE COLLANTE  
THOMAS EDUARDO MEDINA PEREA

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

2016

ESTUDIO DE CASOS DE LA SENSIBILIDAD DEL ESPECTRO ARMÓNICO DE  
CARGAS DE ILUMINACIÓN ANTE VARIACIONES EN LA AMPLITUD Y  
DISTORSIÓN DE LA TENSIÓN DE ALIMENTACIÓN

RUBEN D. URIBE COLLANTE

THOMAS E. MEDINA PEREA

Trabajo de Grado para optar al título de  
Ingeniero Electricista

DIRECTOR

Dr. CÉSAR A. DUARTE GUALDRÓN

CODIRECTORES

Dr. GABRIEL ORDÓÑEZ PLATA

MSc. GABRIEL A. MALAGÓN CARVAJAL

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

2016

*Este logro es dedicado a mis padres, hermana y cuñado de quienes he podido aprender como rebasar los obstáculos y a entender que las cosas toman su tiempo, pero se consiguen con paciencia y esfuerzo.*

*Quisiera agradecer a mi compañero de trabajo de grado, Thomas E. Medina P por su confianza y trabajo durante la investigación.*

*Ruben D. Uribe Collante*

*A mis padres, hermana y tíos les dedico este gran logro, A ustedes que fueron el motor que siempre me dio fuerza necesaria para seguir adelante y así lograr hacer realidad nuestro sueño.*

*Dedicado a Dios quien me provee de tenacidad, entendimiento, paciencia y sabiduría para afrontar los retos que se presentan en la vida.*

*Quisiera agradecer a mi compañero de trabajo de grado, Ruben Uribe Collante por su confianza y trabajo durante la investigación.*

*Aprovecho para agradecer a muchas personas que siempre me abrieron las puertas de su amistad a lo largo de todo este tiempo, logrando con esto hacer más fácil mi transitar por la UIS, haciendo mención especial a Jeset Imbrecht, Fabián Ortiz, Laura F. Gómez, Luis rada, Anderson López, Miguel Torres, Jose Guarín, Maira Cabrales, Paola Muñoz, Cristian Martínez, Jose Velásquez, Diego Guarín, Nelson Castro, Camilo Prieto, Jenny Bonilla a todos ustedes mil y mil gracias por su valiosa compañía y amistad.*

*Thomas E. Medina Perea*

## **AGRADECIMIENTOS**

Los autores de este documento expresan su más sincero agradecimiento al director del proyecto el Dr. César A. Duarte Gualdrón, al codirector del proyecto el Dr. Gabriel Ordoñez Plata por la asesoría, orientación y consejos que permitieron el desarrollo de este trabajo de grado.

Un agradecimiento especial al MSc. Gabriel A. Malagón codirector del proyecto por su apoyo, colaboración y disposición que fue fundamental en el desarrollo del trabajo.

Agradecemos al Ingeniero Electricista y joven investigador Jeison Bello por su participación y aportes en el manejo de instrumentos de medición utilizados en el trabajo.

A la Universidad Industrial de Santander por la formación y el conocimiento.

## CONTENIDO

	pág.
INTRODUCCIÓN .....	21
1. DEFINICIÓN DEL PROBLEMA.....	24
2. JUSTIFICACIÓN .....	26
3. OBJETIVOS .....	28
3.1. OBJETIVO GENERAL.....	28
3.2. OBJETIVOS ESPECIFICOS.....	28
4. MARCO REFERENCIAL .....	30
4.1. ASPECTOS GENERALES .....	30
4.2. TECNOLOGÍA CFL.....	32
4.3. ARMÓNICOS.....	33
4.3.1 Índice de distorsión armónica total (THD).. ..	33
4.3.2 Índice de factor de atenuación ( $r_{att}$ ).. ..	34

4.3.3	Factor de diversidad (FD).....	35
4.4.	FUENTE CHROMA AC PROGRAMABLE .....	35
4.5.	REGULACIÓN .....	36
4.6.	ESTADO DEL ARTE.....	38
5.	METODOLOGÍA PARA EL DESARROLLO DEL PROYECTO .....	43
5.1.	FUNDAMENTACIÓN.....	43
5.1.1	Fuente programable y medidor de calidad de la potencia. ....	44
5.2.	SELECCIÓN DE LA MUESTRA .....	44
5.3.	MEDIDAS PRELIMINARES.....	44
5.4.	TIEMPO NECESARIO DE CADA MEDIDA .....	47
5.5.	PROCEDIMIENTO PARA LA REALIZACIÓN DE LOS EXPERIMENTOS .....	47
5.5.1.	Selección de la señal de tensión de alimentación para los experimentos. ....	49
5.6.	PROCEDIMIENTO PARA LA REALIZACIÓN DE UNA MEDIDA .....	50
5.7.	REPOSITORIO ORGANIZADO DE MEDIDAS.....	54
5.8.	METODOLOGÍA PARA EL ANÁLISIS DE LOS DATOS OBTENIDOS ....	56

6. RESULTADOS.....	61
6.1. CASO DE ESTUDIO 1: FORMA DE ONDA Y CARACTERÍSTICAS ARMÓNICAS DE LA SEÑAL DE TENSIÓN EN EL LABORATORIO INTEGRACIÓN ENERGÉTICA .....	63
6.2. CASO DE ESTUDIO 2: ESTUDIO DE LA DISTORSIÓN ARMÓNICA DE CORRIENTE THDI.....	67
6.3. CASO DE ESTUDIO 3: RESULTADO EN LA FORMA DE ONDA DE CORRIENTE EN LA CARGA CON LAS TRES SEÑALES DE ALIMENTACIÓN (SENO, FLAT-TOP Y POINTED-TOP).....	73
6.4. CASO DE ESTUDIO 4: COMPORTAMIENTO DE LA CORRIENTE PARA CADA LUMINARIA AL REALIZAR VARIACIONES EN LA MAGNITUD DE LA TENSIÓN Y DISTANCIA DEL PUNTO DE ACOPLE COMÚN.....	78
6.5. CASO DE ESTUDIO 5: COMPORTAMIENTO DE LA MAGNITUD DE CORRIENTE PARA EL ESPECTRO ARMÓNICO .....	85
6.6. CASO DE ESTUDIO 6: COMPORTAMIENTO DEL ESPECTRO ARMÓNICO ANTE VARIACIONES DE LA MAGNITUD DE TENSIÓN Y CIRCUITO RAMAL PARA CADA LUMINARIA.....	90
6.7. CASO DE ESTUDIO 7: COMPORTAMIENTO DE LA CORRIENTE DE CARGA $I_{rms}$ A VARIACIONES DE LONGITUD Y MAGNITUD DE LA TENSIÓN DE ALIMENTACIÓN.....	93
6.8. CASO DE ESTUDIO 8: ESTUDIO DEL ÍNDICE DE ATENUACIÓN .....	98
6.9 CASO DE ESTUDIO 9: ESTUDIO DEL ÍNDICE DE DIVERSIDAD .....	100
7. CONCLUSIONES Y CONSIDERACIONES .....	103

REFERENCIAS ..... 106

BIBLIOGRAFIA..... 109

ANEXOS ..... 110

## LISTA DE FIGURAS

pág.

Figura 1. Fuentes de luz utilizadas actualmente .....	31
Figura 2. Organigrama de medidas por luminaria .....	48
Figura 3. Tablero de distribución principal TN A308 .....	51
Figura 4. Tablero de distribución secundario .....	52
Figura 5. Interfaz fuente programable Chroma. ....	53
Figura 6. Analizador de la calidad de la energía Power visa .....	54
Figura 7. Medidor PowerVisa con la carga seleccionada a medir.....	54
Figura 8. Organización de medidas por luminaria.....	55
Figura 9. Organización de archivos .mat .....	56
Figura 10. Metodología para la obtención de los datos y análisis.....	60
Figura 11. Señal de tensión y corriente en un periodo.....	62
Figura 12. Error en señal de tensión.....	62
Figura 13. Señal de tensión medida en laboratorio, periodo 1: (9 a.m. hasta las 10:30 a.m.).....	64
Figura 14. Señal de tensión medida en laboratorio, periodo 2: (10:45 a.m. hasta las 12: 15 m).....	64
Figura 15. Señal de tensión medida en laboratorio, periodo 3: (2 p.m. hasta las 3:30 p.m.).....	65
Figura 16. Señal de tensión medida en laboratorio, periodo 4: (3:45 p.m. hasta las 5:15 p.m.).....	65
Figura 17. Distorsión armónica por luminaria Sinusoidal .....	70
Figura 18. Distorsión armónica por luminaria Flat-top .....	71
Figura 19. Distorsión armónica por luminaria Pointed-top .....	71
Figura 20. Señal de corriente luminaria 1 .....	73
Figura 21. Señal de corriente luminaria 13 .....	73
Figura 22. Señal de corriente luminaria 15 .....	74
Figura 23. Valor pico de corriente para cada luminaria.....	74
Figura 24. Valor pico de corriente para cada luminaria.....	75

Figura 25. Valor pico de corriente para cada luminaria.....	76
Figura 26. Valor pico de corriente para cada luminaria.....	76
Figura 27. Valor pico de corriente para cada luminaria.....	77
Figura 28. Comportamiento de la corriente rms para la luminaria 6 variando la longitud .....	78
Figura 29. Comportamiento de la corriente rms para la luminaria 12 variando la longitud .....	79
Figura 30. Comportamiento de la corriente rms para la luminaria 13 variando la longitud .....	79
Figura 31. Comportamiento de la corriente rms para la luminaria 8 variando la longitud .....	80
Figura 32. Comportamiento de la corriente rms para la luminaria 8 en términos de a frecuencia .....	81
Figura 33. Comportamiento de la corriente rms para la luminaria 12 en términos de a frecuencia .....	82
Figura 34. Comportamiento de la corriente rms para la luminaria 9 variando la tensión a longitud de 0 [m] el punto de acople común. ....	83
Figura 35. Comportamiento de la corriente rms para la luminaria 12 variando la tensión a longitud de 2,4 [m] el punto de acople común. ....	83
Figura 36. Comportamiento de la corriente rms para la luminaria 15 variando la tensión a longitud de 7 [m] el punto de acople común. ....	84
Figura 37. Comportamiento de la corriente rms para la luminaria 14 variando la tensión a longitud de 20 [m] el punto de acople común. ....	84
Figura 38. Comportamiento de la corriente rms para la luminaria 9 variando la tensión a longitud de 40 [m] el punto de acople común. ....	85
Figura 39. Variación max y min de los ak .....	86
Figura 40. Variación max y min de los ak .....	86
Figura 41. Variación max y min de los ak .....	87
Figura 42. Variación max y min de los ak .....	87
Figura 43. Variación max y min de los ak .....	88
Figura 44. Variación max y min de los ak .....	88
Figura 45. Variación max y min de los ak .....	89
Figura 46. Variación max y min de los ak .....	89
Figura 47. Comportamiento magnitud y fase del espectro armónico .....	91
Figura 48. Comportamiento magnitud y fase del espectro armónico .....	91
Figura 49. Comportamiento magnitud y fase del espectro armónico .....	92
Figura 50. Comportamiento magnitud y fase del espectro armónico .....	92
Figura 51. Factor de atenuación .....	99
Figura 52. Factor de atenuación .....	99
Figura 53. Factor de diversidad .....	100
Figura 54. Comparación factor de diversidad .....	101

Figura 55. Ángulos para cada orden armónico .....	102
Figura 56. Ángulos para cada orden armónico .....	102
Figura 57. Panel Frontal .....	110
Figura 58. Interfaz de Inicio .....	111
Figura 59. OUTPUT: More Setting.....	112
Figura 60. Output Waveform Selection .....	112
Figura 61. View Waveform.....	113
Figura 62. Output Mode .....	113
Figura 63. Synthesis Flat Top .....	114
Figura 64. Synthesis Waveform Viewer (Flat Top).....	115
Figura 65. Synthesis Running (Flat Top) .....	115
Figura 66. Synthesis Pointed Top.....	116
Figura 67. Synthesis Waveform Viewer (Pointed Top) .....	117
Figura 68. Synthesis Running (Pointed Top) .....	117
Figura 69. Menú principal .....	118
Figura 70. Submenú INICIAR/config.....	119
Figura 71. Selección de las pinzas de corriente.....	119
Figura 72. Factores de escala.....	120
Figura 73. Tipo de conexión .....	120
Figura 74. Valores Nominales.....	121
Figura 75. Modo Operativo .....	121
Figura 76. Modo Monitorizar .....	122
Figura 77. Opciones Avanzadas .....	122
Figura 78. Intervalo del Jornal.....	123
Figura 79. Tarjeta de memoria.....	123
Figura 80. Monitorear el mismo circuito .....	124
Figura 81. Toma de datos en curso .....	125
Figura 82. Tarjeta HASP del Dranetz.....	126
Figura 83. Pantalla de inicio Dran-View. ....	127
Figura 84. Propiedades del Programa .....	128
Figura 85. Ventana de 12 ciclos con formas de onda de tensión y corriente .....	129
Figura 86. Grupo de 15 ventanas de observación .....	130
Figura 87. Exportar datos. ....	130

## LISTA DE TABLAS

	<b>pág.</b>
Tabla 1. Características luminarias Tipo CFL .....	45
Tabla 2. Espectros de cada señal tensión de alimentación .....	50
Tabla 3. Distorsión armónica para cada una de las señales.....	66
Tabla 4. Distorsión de las señales medidas y utilizadas .....	66
Tabla 5. Angulo de fase por orden armónico.....	67
Tabla 6. Variación de THDI para las lum 1 a la lum 7.....	67
Tabla 7. Variación de THDI para las lum 8 a la lum 15.....	68
Tabla 8. Variación de THDI para las lum 1 a la lum 7.....	68
Tabla 9. Variación de THDI para las lum 8 a la lum 15.....	69
Tabla 10. Variación de Irms lum 1 a la lum 5.....	93
Tabla 11. Variación de Irms lum 6 a la lum 10.....	94
Tabla 12. Variación de Irms lum 11 a la lum 15.....	94
Tabla 13. Sensibilidad de Irms lum 1 a la lum 5.....	95
Tabla 14. Sensibilidad de Irms lum 6 a la lum 10.....	95
Tabla 15. Sensibilidad de Irms lum 11 a la lum 15.....	95
Tabla 16. Variación de Irms para las lum 1 a la lum 5.....	96
Tabla 17. Variación de Irms para las lum 6 a la lum 10.....	96
Tabla 18. Variación de Irms para las lum 11 a la lum 15.....	97
Tabla 19. Sensibilidad de Irms lum 1 a la lum 5.....	97
Tabla 20. Sensibilidad de Irms lum 6 a la lum 10.....	97
Tabla 21. Sensibilidad de Irms lum 11 a la lum 15.....	98
Tabla 22. Variación de Irms lum 1 a la lum 5.....	132
Tabla 23. Variación de Irms lum 6 a la lum 10.....	132
Tabla 24. Variación de Irms lum 11 a la lum 15.....	133
Tabla 25. Sensibilidad de Irms lum 1 a la lum 5.....	133
Tabla 26. Sensibilidad de Irms lum 6 a la lum 10.....	133
Tabla 27. Sensibilidad de Irms lum 11 a la lum 15.....	134
Tabla 28. Variación de Irms para las lum 1 a la lum 5.....	134
Tabla 29. Variación de Irms para las lum 6 a la lum 10.....	135
Tabla 30. Variación de Irms para las lum 11 a la lum 15.....	135
Tabla 31. Sensibilidad de Irms lum 1 a la lum 5.....	135
Tabla 32. Sensibilidad de Irms lum 6 a la lum 10.....	136

Tabla 33. Sensibilidad de Irms lum 11 a la lum 15.....	136
Tabla 34. Variación de Irms para las lum 1 a la lum 5 .....	136
Tabla 35. Variación de Irms para las lum 6 a la lum 10 .....	137
Tabla 36. Variación de Irms para las lum 11 a la lum 15 .....	137
Tabla 37. Sensibilidad de Irms lum 1 a la lum 5 .....	137
Tabla 38. Sensibilidad de Irms lum 6 a la lum 10.....	138
Tabla 39. Sensibilidad de Irms lum 11 a la lum 15.....	138
Tabla 40. Variación de Irms para las lum 1 a la lum 5 .....	139
Tabla 41. Variación de Irms para las lum 6 a la lum 10 .....	139
Tabla 42. Variación de Irms para las lum 11 a la lum 15 .....	139
Tabla 43. Sensibilidad de Irms lum 1 a la lum 5 .....	140
Tabla 44. Sensibilidad de Irms lum 6 a la lum 10.....	140
Tabla 45. Sensibilidad de Irms lum 11 a la lum 15.....	140
Tabla 46. Variación de THDI para las lum 1 a la lum 7 .....	141
Tabla 47. Variación de THDI para las lum 8 a la lum 15.....	141
Tabla 48. Variación de THDI para las lum 1 a la lum 7 .....	142
Tabla 49. Variación de THDI para las lum 8 a la lum 15.....	142
Tabla 50. Variación de THDI para las lum 1 a la lum 7 .....	143
Tabla 51. Variación de THDI para las lum 8 a la lum 15.....	143
Tabla 52. Variación de THDI para las lum 1 a la lum 7 .....	144
Tabla 53. Variación de THDI para las lum 7 a la lum 15.....	144

## LISTA DE ANEXOS

pág.

ANEXO A: CONFIGURACIÓN DE LA FUENTE PROGRAMABLE CHROMA....	110
ANEXO B: CONFIGURACIÓN DEL POWERVISA .....	118
ANEXO C: PROCEDIMIENTO PARA GUARDAR UNA PRUEBA EN LA HERRAMIENTA DRAN-VIEW .....	126
ANEXO D: TABLAS CON LOS RESULTADOS DE LA SENSIBILIDAD DE CORIENTES PARA LAS SEÑALES FLAT-TOP Y POINTED-TOP.....	132
ANEXO E: VARIACIÓN THDI PARA LAS SEÑALES DE ALIMENTACIÓN FLAT- TOP Y POINTED-TOP.....	141

## RESUMEN

**TÍTULO:** ESTUDIO DE CASOS DE LA SENSIBILIDAD DEL ESPECTRO ARMÓNICO DE CARGAS DE ILUMINACIÓN ANTE VARIACIONES EN LA AMPLITUD Y DISTORSIÓN DE LA TENSIÓN DE ALIMENTACIÓN<sup>1</sup>

**AUTORES:** RUBEN D. URIBE COLLANTE, THOMAS E. MEDINA PEREA<sup>2</sup>

**PALABRAS CLAVE:** Distorsión armónica, atenuación, espectro armónico, armónicos, calidad de la potencia, luminarias CFL, balastos electrónicos, factor de potencia.

**DESCRIPCIÓN:** El objetivo del presente trabajo de grado es determinar el efecto que produce la distorsión de tensión sobre la distorsión de corriente. El estudio es llevado a cabo en torno a la sensibilidad que presenta una muestra de 15 luminarias ante variaciones en la tensión de alimentación y variación en la longitud del circuito ramal. La sensibilidad se cuantifica por medio de índices como la distorsión armónica de corriente THDi, factor de atenuación ( $r_{att}$ ), factor de diversidad, valor eficaz de corriente Irms, y magnitud y fase del espectro armónico de las luminarias.

Para la ejecución del estudio se tomaron mediciones de manera experimental a una muestra de luminarias CFL ver Tabla 1, donde se realizaron una serie de pruebas a cada luminaria en las cuales se varía la señal de alimentación 5.4.1, distancia al punto de acople común y señal tensión.

Estas comparaciones son realizadas a mediciones eléctricas ejecutadas de manera experimental en laboratorio a una serie de luminarias. A cada luminaria se le realizó una serie de pruebas en las cuales se varía la señal de alimentación, la distancia al punto de acople común y la magnitud en la señal de tensión; esto con el fin de establecer que tanto se afecta el espectro armónico ante estas variaciones y así establecer la sensibilidad que puede llegar a tener cada luminaria.

---

<sup>1</sup> Proyecto de Grado: Trabajo de Investigación

<sup>2</sup> Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas. Escuelas de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones. Director: Dr. CÉSAR A. DUARTE GUALDRÓN. CODIRECTORES: Dr. GABRIEL ORDÓÑEZ PLATA, MSc. GABRIEL MALAGON

## ABSTRACT

**TITLE:** STUDY OF CASES IN SENSIBILITY FROM HARMONIC SPECTRUM IN ILLUMINATION TO CHARGES AMPLITUDE AND DISTORTION VARIATIONS IN VOLTAGE.

**AUTHORS:** RUBEN D. URIBE COLLANTE, THOMAS E. MEDINA PEREA<sup>3</sup>

**KEY WORDS:** Harmonic distortion, attenuation, harmonic spectrum, harmonics, power quality, CFL lamps, electronic ballasts. Power factor.

**DESCRIPCIÓN:** The aim of this work is to determine the degree effect of the voltage distortion on the current distortion.. The study is conducted around the sensitivity that presents a sample of 15 CFL lights to variations in the supply voltage. The sensitivity is measured by comparison of rates as harmonic current distortion THDi, attenuation factor  $r_{att}$ , factor diversity, RMS current  $I_{rms}$ , and magnitude and phase of the harmonic spectrum of CFL lights.

For the execution of the study, experimentally measurements were taken at a sample loads CFL lights see Tabla 1. A series of test were performed on each appliance in which the signal power 5.4.1, distance to the point of common coupling and voltage signal.

To each light was realized a series of proofs which it varies the supply signal, distance to coupling point and voltage regulation; all of this with the end to establishes how much quantity is affected in the spectrum before variations and to establish the sensibility that could every lights has. The compact fluorescent lamps.

---

<sup>3</sup> Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas. Escuelas de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones. Director: Dr. CÉSAR A. DUARTE GUALDRÓN. CODIRECTORES: Dr. GABRIEL ORDÓÑEZ PLATA, MSc. GABRIEL MALAGON

## INTRODUCCIÓN

En la búsqueda de una alta eficiencia, se han desarrollado nuevas tecnologías que pueden prevenir y controlar la posible escasez de recursos no renovables en futuras generaciones. Una de estas tecnologías ha sido la relacionada con la Iluminación, a partir del desarrollo de la bombilla hasta la actualidad, la iluminación ha ido evolucionando a gran escala para dar solución a las necesidades en diferentes lugares y condiciones; esta evolución ha ido de la mano con los avances de la electrónica de potencia y la física de los materiales, permitiendo aumentar la eficiencia de los equipos eléctricos.

Gracias a estos avances, se han incorporado en los sistemas de iluminación diferentes tecnologías que van desde un filamento de tungsteno (resistencia) para la bombilla incandescente, así como la bombilla halógena conformando el grupo de radiadores térmicos entre las fuentes de luz artificial, seguido por las bombillas de descarga en gas de baja y alta presión, que generan radiación en el espectro visible usando un arco controlado en un medio gaseoso (mercurio), seguido del último avance en iluminación de alta eficiencia la tecnología LED.

A su vez, las bombillas de inducción o lámparas fluorescentes compactas (luminarias tipo CFL), cuyo principio de funcionamiento consiste en una corriente inducida en el balasto electrónico, la cual excita los átomos de mercurio al interior de la bombilla generando radiación UV, esta a su vez choca contra una capa de fosfatos depositada en las paredes del tubo que transforma esta radiación invisible en otra de onda más larga y que se encuentra dentro del espectro visible, consiguiendo una mejor emisión de luz debido a los delgados tubos que se curvan y organizan para permitir un aumento en la densidad de radiación [1].

Todas las tecnologías mencionadas anteriormente a excepción de la bombilla incandescente pertenecen a la familia de cargas no lineales, las cuales se caracterizan por distorsionar la forma de onda de corriente de carga. Por un lado la CFL tiene componentes no lineales de consumo de energía, este comportamiento de no linealidad hace difícil su modelado, porque actúa de forma diferente bajo distintos niveles de tensión, además generan armónicos debido a los dispositivos de conmutación implicados [2].

Esta distorsión en la forma de onda de corriente de carga, se presenta debido a la composición interna de esta tecnología generando problemas como: fallas en la operación de equipos y cargas conectadas al sistema, calentamiento de conductores y devanados, deterioro del aislamiento de los mismos, corrientes por el neutro, el aumento de tensión neutro tierra, incremento de pérdidas en motores y transformadores, errores en los equipos de medición de energía eléctrica, efecto piel, disparo de protecciones no deseado, además un incremento de costos en la operación y mantenimiento [3].

En el presente trabajo busca realizar un estudio de la distorsión armónica de cargas no lineales de iluminación como son las luminarias fluorescentes compactas CFL; también a analizar de la sensibilidad armónica en la señal de corriente distorsionada frente a variaciones en la señal de tensión de alimentación.

Para el análisis propuesto se realizan pruebas de laboratorio con la fuente programable Chroma<sup>4</sup>, y equipos de monitorización de la calidad de la potencia, además se diseñan experimentos enfocados a modelar el comportamiento de las cargas de iluminación tipo residencial, y su conexión a los diferentes circuitos ramales. Se abordan parámetros de la señal de corriente medida como: energía, valor pico, valor rms, distorsión armónica total, comportamiento de la magnitud y el ángulo de fase del espectro armónico e índice de atenuación, los cuales pueden incidir fuertemente durante la evaluación de la distorsión y por tanto en los mecanismos que se prevean para su mitigación [4].

---

<sup>4</sup> Fuentes programables de corriente alterna monofásicas y/o trifásicas. La fuente variable de corriente alterna Chroma generan señales CA muy limpias en onda seno desde 15Hz hasta 1kHz o señales distorsionadas programadas.

## 1. DEFINICIÓN DEL PROBLEMA

La iluminación se convertido en un elemento de vital importancia para el hombre y por tanto representa un alto porcentaje del consumo total energético. Teniendo como premisa la eficiencia energética, actualmente se vienen desarrollando planes masivos de sustitución de las tecnologías de iluminación, en donde las lámparas fluorescentes compactas se han posicionado sobre los demás tipos de tecnologías.

Con la rápida sustitución por parte de los usuarios de las tecnologías convencionales (incandescentes, halógenas, fluorescentes, etc.) por Luminarias tipo CFL, se ha desencadenado una creciente distorsión de corriente y tensión en el sistema de distribución, afectando sus valores eficaces y máximos. A pesar que la distorsión armónica aportada por una sola luminaria no es lo suficientemente grande para ser considerada como causal de posibles problemas a la red de distribución y los equipos, una adopción masiva de esta tecnología podría llegar a ser significativa y por tanto podría ocasionar una gran disminución en la calidad de potencia, teniendo efectos perjudiciales sobre las cargas que componen el sistema alterando su operación [3].

De esta manera se presenta una urgente necesidad en la realización de estudios a través de mediciones de laboratorio, que permitan analizar el comportamiento armónico descritos por medio de THDi (distorsión armónica total de corriente) y factor de atenuación ( $r_{att}$ ), índices que indican el impacto en redes de distribución de baja tensión; estos estudios permitirán el desarrollo de mejores modelos que describan la naturaleza de este comportamiento y que a su vez permitan estudiar y evaluar el problema de forma más adecuada.

Con los resultados obtenidos a partir de pruebas realizadas para este trabajo de grado, se analizó la sensibilidad del espectro armónico de la señal de corriente en cargas de iluminación CFL. Teniendo en cuenta magnitud y ángulo de fase; para así poder determinar el comportamiento del espectro de las luminarias frente a las distintas condiciones de alimentación proporcionadas por fuente programable Chroma y los diferentes frentes de medida (fabricante, distancia al punto de acople común, potencia nominal, entre otros).

## 2. JUSTIFICACIÓN

Con la instalación masiva de equipos a base de electrónica de potencia (ordenadores, variadores de velocidad, cargas para iluminación como CFL, entre otros), equipos que denominamos cargas de comportamiento no lineal provocan distorsiones armónicas, con lo cual la mayoría de los usuarios se enfrenta a la presencia de armónicos en las redes de distribución eléctrica, trayendo consigo múltiples problemas en operación y funcionamiento de equipos.

De esta forma, algunos organismos internacionales han promovido la creación de regulaciones, normas y estándares como [5] y [6], dirigidos a conocer pautas adecuadas para establecer objetivos internos de calidad de la potencia, así como determinar el impacto de armónicos, daños en los equipos, y posteriormente la implementación de un sistema integral de mitigación a estos efectos.

Este trabajo de grado se presenta con la idea fundamental de estudiar y dar a conocer de una manera clara y concisa, la sensibilidad de la señal de corriente y su espectro armónico a variaciones de amplitud y distorsión de la señal de alimentación. De esta forma se hace necesario el diseño de experimentos en laboratorio, con la realización de una serie de mediciones sobre algunas cargas de iluminación CFL y su evaluación de las posibles emisiones armónicas hacia la red.

Se presentan resultados con base a pruebas de laboratorio en distintos escenarios de medición, con ello se realiza una caracterización inicial de los espectros en magnitud y ángulo de fase de la corriente de carga.

Estos resultados ayudaran para futuras investigaciones y a su vez permitirán realizar el proceso de simulación, evaluación y predicción del impacto de las señales distorsionadas de tensión y corriente así como la obtención de una posible disminución de los costos de diseño de los mecanismos de mitigación, la disminución de los errores en el sobre-dimensionamiento de conductores y transformadores, mejorando de esta forma 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 el proyecto.

#### **3.1. OBJETIVO GENERAL**

Estudiar la sensibilidad del espectro armónico de cargas no lineales de iluminación ante variaciones de amplitud y distorsión de la tensión de alimentación, mediante prácticas y análisis en el laboratorio, realizadas con una fuente programable y equipos de medición de la calidad de la potencia.

#### **3.2. OBJETIVOS ESPECIFICOS**

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

- i. Seleccionar la muestra de luminarias tipo CFL teniendo en cuenta parámetros como potencia, tensión, frecuencia y características específicas.
- ii. Definir un procedimiento para realizar los experimentos en donde se contemplen los criterios de ajuste de la fuente, ajuste del equipo de medida y conexión de los dispositivos.

- iii. Establecer una metodología 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.
  
- iv. Cuantificar el impacto del espectro armónico en la señal de corriente consumida por las luminarias CFL debido a variaciones en la fuente de alimentación.

## **4. MARCO REFERENCIAL**

En este capítulo se presentan 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, fenómenos como diversidad, atenuación y agregación armónica, 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. ASPECTOS GENERALES**

Los sistemas de iluminación tanto natural como artificial son de gran importancia para el desarrollo de cualquier actividad, la luz es una sensación que se produce sobre el ojo humano por ondas electromagnéticas y el 80% de las impresiones sensoriales humanas son de naturaleza óptica.

Entre los tipos de luz artificial, la más cómoda, limpia y segura es la luz eléctrica, sin embargo requiere de una eficiente y económica utilización garantizando una buena iluminación a un menor consumo de energía, entre sus características importantes se encuentra el flujo luminoso, el cual es definido como la cantidad de luz emitida por una fuente luminosa en unidad de tiempo, la unidad de medida del flujo luminoso es el Lumen.

En la actualidad, se opta por el uso masivo de las nuevas tecnologías en luminarias, clasificadas en radiadores térmicos, lámparas de descarga y estado sólido como el

diodo emisor de luz (LED) ver Figura 1, tanto en el alumbrado exterior como interior, que garantiza una reducción en el consumo energético, una mayor eficiencia y vida útil comparadas.

Figura 1. Fuentes de luz utilizadas actualmente

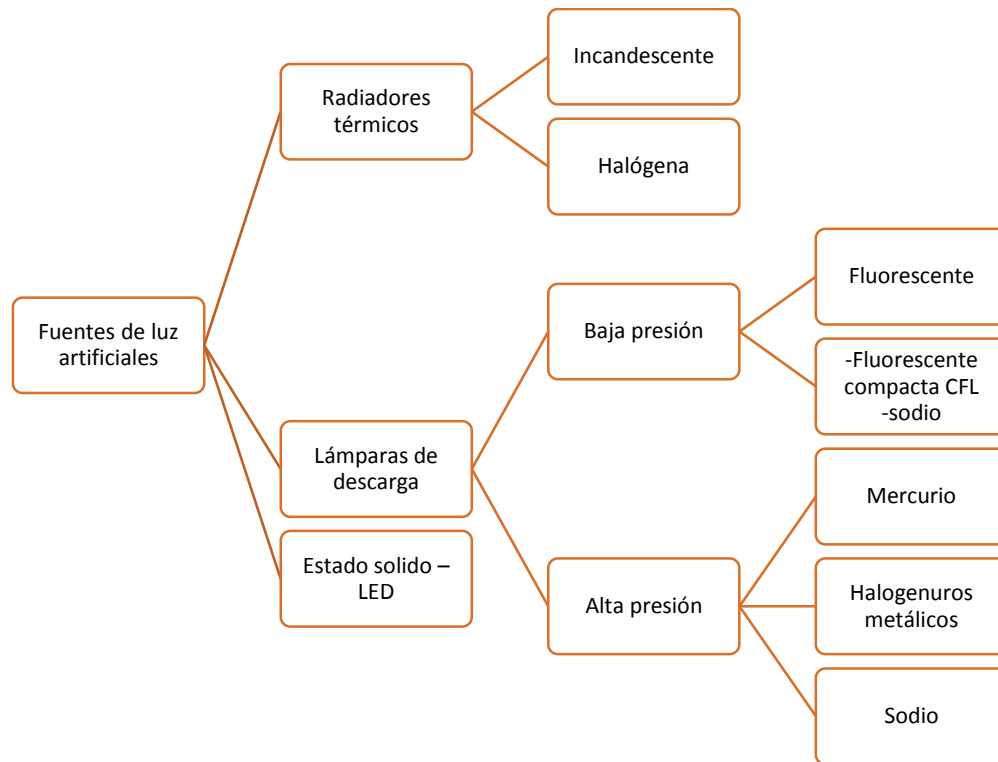


Figura tomada de [1]

En la Figura 1, se presenta la clasificación de fuentes de luz artificial de acuerdo a la tecnología usada para su funcionamiento.

## 4.2. TECNOLOGÍA CFL

Esta tecnología consiste en una lámpara de descarga de baja presión, está compuesta por un tubo de vidrio relleno de un gas en su interior (vapor de mercurio), gas que se estimula con una descarga eléctrica para la emisión de la radiación ultravioleta, la cual choca con los fosfatos en las paredes del tubo que transforma la radiación invisible en un espectro visible. Al igual que las lámparas LED utilizan un balastro electrónico para el tratamiento de la señal de alimentación que llega a los electrodos del tubo (arco eléctrico), por eso esta tecnología también se caracteriza por generar distorsión armónica en la señal de tensión y corriente.

Para el caso Colombiano, el mercado de bombillos fluorescentes compactos se ha venido intensificando debido las normativas impuestas por el Estado respecto a su uso. Por ley, cualquier edificio destinado a una entidad oficial debe usar lámparas fluorescentes compactas en su totalidad y debe ser tenido en cuenta desde el momento de diseño y planeación del edificio. Desde 2007 (año en que cobró vigencia esta ley) son importados alrededor de 11'000.000 de bombillos anualmente de 18 diferentes marcas provenientes de más de 8 países.

Por otra parte, el balastro es un circuito electrónico utilizado por las luminarias tipo CFL que busca garantizar un arco eléctrico adecuado, limitando la señal que fluye por el circuito, evitando parpadeos en la lámpara y brindando un arranque instantáneo, no produce zumbidos ni ruidos y mejoran la eficiencia de la lámpara y sistema. Está conformada por un puente de diodos rectificador, circuito usado en la conversión de corriente alterna a continua.

### 4.3. ARMÓNICOS

Las corrientes armónicas son los componentes similares de una corriente eléctrica periódica descompuesta en la serie de Fourier, los armónicos tiene una frecuencia que es múltiplo (2, 3, 4, 5, ..., n) de la frecuencia fundamental (60 Hz), el número "n" determina el rango de la componente armónica, por ejemplo a una frecuencia fundamental del sistema de 60 Hz, el armónico de rango 5 presentará una frecuencia de 300 Hz. Además del rango, lo armónicos se clasifican según su amplitud (indicada en % con respecto a la fundamental) y su paridad (par o impar). Por su parte la norma IEEE-519 [6], lo define como el contenido de la señal cuya frecuencia es un múltiplo entero de la frecuencia de repetición base o frecuencia fundamental.

Debido a la generación inherente de armónicos se les denomina cargas no lineales a la iluminación tipo CFL dada la gran distorsión que produce esta tecnología sobre la corriente que demandan a la línea de alimentación alterna. Para su análisis se toman en cuenta características como, el índice de distorsión armónica total para tensión y corriente (THDi) y el factor de atenuación ( $r_{att}$ ). [7]

**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. Así para la onda de corriente será [7].

**4.3.2 Índice de factor de atenuación.** La atenuación es provocada por la propia impedancia del sistema de potencia y por la correspondiente distorsión de la señal de tensión que tiende a reducir las corrientes armónicas en la red producida por cargas no lineales. [8], este impacto se cuantifica por el factor de atenuación  $r_{att}^{(k)}$  que es la relación de la suma aritmética total en un armónico k particular cuando se alimenta con una señal de alimentación distorsionada en comparación con el caso sinusoidal (caso de referencia), este factor se convierte por debajo de 1 si la suma aritmética del armónico en particular con señal distorsionada es menor que la suma aritmética para el mismo armónico en estudio con señal de alimentación Senoidal. O mayor a 1 cuando pasa lo contrario. [9]

$$r_{att}^{(k)} = \frac{I_{ARI-DISTORCIONADA}^{(k)}}{I_{ARI-SINUSOIDAL}^{(k)}} \quad (2)$$

Donde:

$k$ : Orden armónico.

$I_{ARI-DISTORCIONADA}^{(k)}$ : 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 diversidad (FD).** Las dispersiones en el ángulo de fase de los armónicos presentes en las cargas individuales, provocan una cancelación parcial de las corrientes armónicas en el punto de acople común. Este efecto, conocido como diversidad, se debe principalmente a diferencias entre los parámetros del sistema de distribución y los de la propia carga [7], [10]. El factor de diversidad de corriente ( $K_p$ ): Se define para cualquier armónico  $k$  y un conjunto de  $n$  cargas conectadas en paralelo, como la magnitud del fasor de la corriente de red, dividido por la suma de magnitudes de las corrientes individuales, para el mismo orden de armónico [7].

$$k_p = \frac{\sum_{i=1}^n \vec{I}_{K(i)}}{\sum_{i=1}^n I_{K(i)}} \quad (3)$$

Este factor varía entre 0 y 1. Un valor cercano a 0 en este índice indicara una importante cancelación para el armónico bajo análisis.

#### 4.4. FUENTE CHROMA AC PROGRAMABLE

Las pruebas de laboratorio sobre los equipos eléctricos, cada vez demandan dispositivos más sofisticados y con mejor rendimiento, puesto que a medida que la regulación se hace más exigente la necesidad de proporcionar un ambiente controlado y simulado se hace evidente.

La Fuente de alimentación de CA Chroma, es capaz de simular una amplia gama de condiciones de alimentación para equipos de corriente alterna. En particular, la serie Chroma CA programable 61511 proporciona la capacidad de simular diferentes condiciones de entrada de línea de CA y medición de características

críticas para los productos bajo prueba, además utilizando el estado de la tecnología PWM, puede ofrecer una tensión de salida máxima de hasta 300 V CA y frecuencia de salida de 15 Hz a 1500 Hz. Asimismo, es capaz de entregar hasta 4 veces el valor pico actual en comparación con su máximo valor nominal actual, lo que la hace ideal para las pruebas de corriente de entrada. Posee la capacidad de generar una salida pura de forma de onda sinusoidal con la distorsión típica menor de 0,3% a 50/60Hz.

La fuente está alimentada por la red y en su salida se puede ver una señal sinusoidal distorsionada con valores de THDi y THDv programados, y en caso de ser una conexión trifásica con la secuencia deseada. Estos modos de salida se pueden seleccionar con facilidad a través del panel frontal o por medio de control remoto. También son capaces de proporcionar la potencia de salida total sin reducción de la misma, incluso con la salida configurada como una sola fase [11].

#### **4.5. REGULACIÓN**

En relación con la distorsión ocasionada por cargas no lineales, cada país ha establecido sus propios estándares de armónicos, así como sus propios límites de emisión según sus requisitos y condiciones individuales de funcionamiento. Sin embargo, el aumento del comercio libre ha hecho que las normativas de armónicos e interarmónicos sean aplicables internacionalmente. Principalmente las normas O estándares proponen los límites para las emisiones armónicas de las cargas no lineales, y por otra establecen niveles de referencia para que las compañías eléctricas puedan vigilar el nivel de distorsión en sus redes.

La regulación nacional en Colombia es liderada por la CREG (Comisión de regulación de energía y gas) y el ICONTEC a través de las NTC (norma técnica Colombiana), estos dos organismos a menudo adoptan normas internacionales propuestas por organismos como el IEEE (Instituto de Ingenieros Electricistas y Electrónicos) que es de origen norteamericano y la IEC (Comisión Electrotécnica Internacional) de origen europeo.

En Colombia, se definen estándares de la calidad de la potencia eléctrica en la resolución CREG 070-1998 [12], CREG 024-2005 [13], CREG 016-2007 [14] (modificación de CREG 024-2005), las Normas Técnicas Colombianas NTC 5000 y NTC 5001, y todas estas hacen referencia al estándar IEEE519.

Por otro lado las normas IEC han sido en su mayoría adoptadas 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 componentes armónicas se encuentra fundamentalmente en las categoría 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 de calidad de la energía y límites armónicos puede encontrarse en [15].

#### 4.6. ESTADO DEL ARTE

Para este trabajo de grado se revisan ciertos aspectos como: la adquisición de datos (medición), tratamiento de datos y señales centrados en el estudio de cargas de iluminación como lo son las luminarias tipo CFL.

Por ejemplo en [9] se clasifican las perturbaciones en la calidad de la potencia debido a los equipos modernos de iluminación (Luminarias Tipo LED y CFL) en dos clases; continuas y transitorias, fueron seleccionadas tres señales con diferente nivel de distorsión armónica de tensión aplicado a las lámparas: sinusoidal, flat-top y pointed-top; además realiza un estudio en dichos equipos de iluminación utilizando la base de datos creada para intercambio de medidas armónicas (PANDA); a partir de estos modelos se estudia el factor de diversidad y atenuación para cada equipo.

Asimismo, [16] realiza un estudio sobre el efecto de la atenuación armónica en luminarias tipo CFL y presenta algunos tópicos de análisis como: la distorsión individual de cada una de las lámparas, distorsión agregada de un grupo de luminarias y un análisis de la influencia de las distancias de separación (7m, 20m y 40m), sobre la distorsión.

Por otra parte, en [17] se realiza una comparación entre las lámparas CFL fabricadas en Colombia y Alemania, para ello toma 10 Luminarias Tipo CFL, 5 Alemanas y 5 Colombianas, se realizan diferentes combinaciones entre ellas, en este artículo se concluye que existe una gran diferencia entre las distorsiones armónicas de la señal de corriente para ambos tipos de luminarias, en donde las lámparas fabricadas en Alemania presentan menor distorsión frente a las fabricadas

en Colombia puesto que las normas de fabricación Colombianas son más permisivas en cuanto a sus características eléctricas [18].

De igual forma, la referencia [19], 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. La correcta ubicación de los sensores y registradores, frecuencia de muestro, intervalos de observación, entre otros parámetros a considerar.

Por otro lado, en [20] se da a conocer cómo deben realizarse las mediciones que se tomen a partir de un experimento, ilustra el funcionamiento de los ciclos de agregación según la clase de medida, clase A o clase S; además de lo relacionado con la toma de datos, el trabajo provee una forma de tratamiento de datos, para la obtención de las magnitudes y ángulos de los armónicos presentes a partir de la señal censada.

El artículo presentado en la referencia [21] realiza un estudio sobre cargas domiciliarias, en el cual se evalúa la distorsión que sufre la corriente de estas cargas 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 cargas. El objetivo de la investigación fue analizar las características de la red de distribución con diversas cantidades de cargas no lineales.

En [22], se muestra un análisis matemático del contenido armónico en la corriente de un circuito que representa una carga residencial no lineal. Además, se presenta un estudio realizado de manera experimental en el que se muestra la distorsión de

corriente que este tipo de cargas ocasiona. El estudio experimental fue elaborado conectando en paralelo una variedad de electrodomésticos y luminarias 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*”.

Por otra parte en [16], se evidencia una investigación sobre el efecto de atenuación de armónicos de lámparas fluorescentes compactas utilizadas para iluminación, En este trabajo se caracterizan las luminarias tipo CFL a través de pruebas de medición, en donde se utilizan doce tipos de lámparas fluorescentes compactas. Las características armónicas se obtienen con la condición de tensión de alimentación de baja distorsión. El objetivo principal es analizar el efecto de atenuación de las lámparas fluorescentes compactas.

En [23], se presenta un estudio del efecto que tiene el uso de múltiples lámparas fluorescentes compactas sobre la calidad de la potencia residencial; se analizan los resultados de los experimentos realizados (15 en total), cada uno ejecutado con diferentes tipos de luminarias (marca, potencia) para poder analizar su interacción armónica y su incidencia sobre los fenómenos de atenuación y diversidad.

Los trabajos considerados a continuación, involucran el aspecto de factor de diversidad y atenuación para luminarias CFL, como también los límites de emisión armónica para luminarias de bajo consumo.

La referencia [24], investiga la inclusión de los efectos de atenuación y diversidad en la evaluación de la distorsión armónica modelando las cargas como fuentes de armónicos distribuidos. El estudio se realiza conectando varias cargas, en este caso computadores personales (PC), a la red de distribución y tomando mediciones en el punto de acople común para todas las cargas.

En [25], se realiza 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 luminarias tipo CFL. El análisis experimental es realizado sobre 12 lámparas tipo CFL 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.

De esta manera se observa en los diferentes trabajos que 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, puesto que facilitan y agilizan el trabajo, logrando así obtener el resultado con un nivel de incertidumbre muy bajo.

En [26], se presenta un análisis experimental de factores de diversidad de luminarias tipo CFL en combinación con luminarias tipo LED, en esta se calcularon los factores de diversidad para diferentes configuraciones de lámparas conectadas al mismo alimentador en una fase, así mismo se presentan resultados de factores de diversidad para distintas configuraciones.

En conclusión, todas las referencias se enfocan en un estudio basado en el análisis de la distorsión armónica por medio de un adecuado medición, para estos estudios solo se tiene en cuenta magnitud de la señal de alimentación, dejando de lado el ángulo de fase, asimismo, estos trabajos contemplan los ciclos de agregación para el análisis considerando los efectos de atenuación y diversidad. De esta forma, algunas de las referencias consultadas realizan un análisis comparativo entre diversas formas de conexión de las cargas a la red de alimentación, conectándolas de forma individual y grupal a diferentes distancias del punto de acople común y combinando diferentes fabricantes y potencias eléctricas. Estas consideraciones serán tenidas en cuenta analizando no solo la magnitud del espectro si no también

su ángulo de fase enfocándose específicamente en como este espectro de corriente cambia frente a variaciones de la amplitud y distorsión de la señal de alimentación.

## **5. METODOLOGÍA PARA EL DESARROLLO DEL PROYECTO**

Para el cumplimiento de los objetivos planteados para este trabajo de grado, su desarrollo se aborda por etapas, las cuales abarcaran la temática completa del proyecto y con ello un óptimo cumplimiento de los objetivos. De acuerdo a investigaciones anteriores se determinaron las siguientes etapas: manejo de equipos de laboratorio, mediciones de prueba, mediciones en los diferentes escenarios planteados, tratamiento de las señales con algoritmos por medio de Matlab, resultados y conclusiones.

### **5.1. FUNDAMENTACIÓN**

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: conocimientos previos acerca del tema, mediciones de prueba, mediciones en los diferentes escenarios planteados, tratamiento de las señales y conclusiones.

**5.1.1 Fuente programable y medidor de calidad de la potencia.** Para este trabajo de grado será necesario la utilización de una fuente programable CHROMA modelo 61511, analizador de redes PowerVisa (Dranetz), multímetros, osciloscopio, pinza amperimétrica; es por ello que se hace necesario realizar un estudio previo de cada manual para su buena manipulación y operación, en el ANEXO A se encuentra un procedimiento para manipular la fuente y la forma de configurar las señales Flat-top y Pointed-top utilizadas en la investigación, además en el ANEXO B se detalla la configuración que se utilizó para el equipo analizador de redes PowerVisa.

## **5.2. SELECCIÓN DE LA MUESTRA**

Debido a que no se encontraron estudios disponibles, donde se determine las marcas y potencias más utilizadas por parte de los usuarios residenciales, se optó que para la selección de la muestra de luminarias a estudiar, sería de forma aleatoria simple, donde su principio fundamental es la selección de  $n$  unidades sacadas de  $N$ , que sería el número máximo de la población en estudio, en nuestro caso las luminarias tipo CFL comercializadas en la ciudad de Bucaramanga, de tal manera que cada una de las muestras tiene la misma probabilidad de ser seleccionada.

Se escoge este modo de selección debido que al realizar un estudio de las diferentes marcas comercializadas, se encontró que habían aproximadamente 15 distintos fabricantes, además se tuvo en cuenta las distintas potencias que se comercializan para los fabricantes encontrados, que van desde 5 a 35 [W], además se tuvo en cuenta los distintos precios para cada luminaria, fabricante y potencia, con el fin de no exceder el presupuesto a utilizar en la investigación.

A su vez es muy importante tener en cuenta la marca a estudiar debido a que la emisión de las corrientes armónicas hacia la red por parte de las cargas no lineales, depende directamente de la topología del circuito usado, este circuito varia y depende de los componentes utilizados por los distintos fabricantes.

En la Tabla 1, se puede observar las características específicas de la muestra seleccionada; que se compone de 15 luminarias donde no se especifica la marca, a su vez se observa la potencia, tensión, frecuencia y corriente, para cada una de las luminarias.

Tabla 1. Características luminarias Tipo CFL

<b>Luminaria</b>	<b>P[W]</b>	<b>V[V]</b>	<b>F(Hz)</b>	<b>I[mA]</b>
Luminaria 1	27	110/127	50/60	0,23
Luminaria 2	5	120	60	0,04
Luminaria 3	15	120/127	50/60	0,13
Luminaria 4	11	110	50/60	0,09
Luminaria 5	15	110/127	50/60	0,13
Luminaria 6	18	110/127	50/60	0,15
Luminaria 7	20	120/127	50/60	0,17
Luminaria 8	23	110/127	50/60	0,19
Luminaria 9	9	110	60	0,08
Luminaria 10	15	120/127	50/60	0,13
Luminaria 11	25	120/127	50/60	0,21
Luminaria 12	5	120	60	0,04
Luminaria 13	13	120/127	50/60	0,11
Luminaria 14	20	120	60	0,17
Luminaria 15	18	120/127	60	0,15

### 5.3. MEDIDAS PRELIMINARES

En esta fase del proyecto se busca 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 desea obtener una estimación del tiempo que se emplea en realizar una prueba, esto con el objetivo de definir los diferentes escenarios de evaluación para no exceder el tiempo de duración del proyecto. En esta etapa se hizo necesario la debida adecuación del laboratorio (Integración Energética) ubicado en el parque tecnológico de Guatiguara, lo que incluye la correcta instalación de la fuente programable Chroma a la red de alimentación, a su vez el acomodamiento del laboratorio para la realización de los diferentes escenarios a evaluar, con el objetivo de 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.

Las mediciones preliminares fueron realizadas a 2 luminarias, las cuales fueron alimentadas con señal de tensión sinusoidal pura, configurada en la fuente programable Chroma; estas medidas fueron tomadas por medio de un equipo analizador de redes Dranetz, a una distancia de 0 [m] al punto de acople común. Estos resultados obtenidos fueron procesados y tratados a través de software Dran-View, además analizados por medio de algoritmos en Matlab.

#### 5.4. TIEMPO NECESARIO DE CADA MEDIDA

Antes de comenzar a tomar las medidas, las luminarias se deben dejar encendidas por lo menos 30 segundos, esto con el ánimo de que ningún transitorio sea medido y vaya a afectar la medición. Este procedimiento se aborda según lo indica el estándar de la referencia [27] numeral 6.2.3.3.

Luego se procede a obtener las muestras de tensión y corriente de cada prueba por medio del analizador de redes Dranetz que utiliza una frecuencia de muestreo de 256 [muestras/ciclo], el número de muestras obtenidas de cada prueba debe representar 180 ciclos de la onda a frecuencias de 60 [Hz] lo que corresponde a 46080 muestras cumpliendo con el estándar IEC-61000-4-30 [28].

Con lo mencionado anteriormente necesitaremos 15 ventanas de observación con 12 ciclos cada una, obteniendo los 180 ciclos correspondientes. Con las medidas preliminares se determinó que el aparato de medida PowerVisa se demora alrededor 25 segundos en tomar las 46080 muestras necesarias. Teniendo en cuenta el error del aparato en empezar a medir y del operario, se estableció que la duración de cada medida debía ser de 30 segundos.

$$t_{total} = 30 + 30 = 60 [s] \quad (4)$$

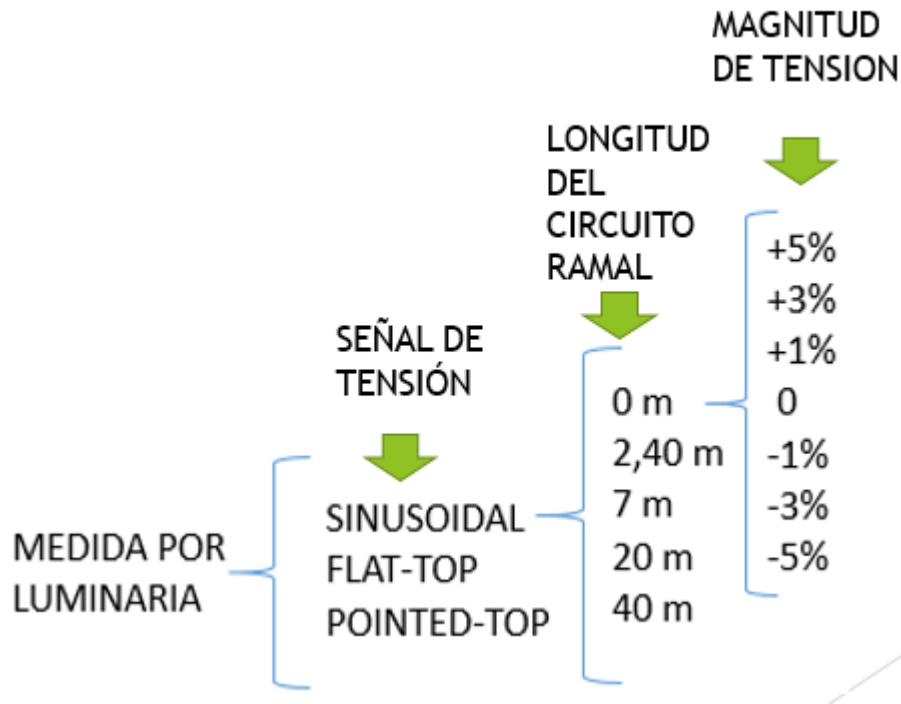
Este sería el tiempo necesario para realizar una medición.

#### 5.5. PROCEDIMIENTO PARA LA REALIZACIÓN DE LOS EXPERIMENTOS

Se describe los procedimientos a través de los cuales se llevó a cabo los diferentes tipos de pruebas para cada escenario planteado en el estudio, a su vez se muestra

la configuración empleada para cada instrumento de medición utilizado, para llevar a cabo las mediciones; como lo es la fuente programable Chroma, el equipo de monitorización de la calidad de la energía Dranetz y la respectiva adecuación del laboratorio de trabajo (ver anexo A y B).

Figura 2. Organigrama de medidas por luminaria



En la Figura 2, se muestra las mediciones a realizar para cada luminaria escogida previamente en la sección 5.3. A cada luminaria se le realizará una serie de pruebas en las cuales se varía la señal de alimentación, distancia y magnitud de la señal de alimentación que fueron parámetros escogidos para llevar a cabo la investigación.

Las distancias para hacer el barrido en longitud del circuito ramal, fueron escogidas de la siguiente manera:

- ✓ 0 [m], se quiso tener una referencia del comportamiento en el punto de acople común, sin efectos de impedancia.

- ✓ 2,4, 7, 20 y 40 [m] son distancias típicas de luminarias en el sector residencial.

para la variación de la magnitud de la señal de tensión alimentación se tiene en cuenta la Tabla 2 (clasificación, denominación y valores de la tensión nominal) de la Norma Técnica Colombia NTC 1340, para un nivel de baja tensión (nivel 1 hasta 1000 [V]) y tensión nominal de 120 [V], la tensión máxima en porcentaje de la nominal corresponde a +5%; se definen valores máximos y mínimos de tensión desde -5% a +5% con pasos de 2% y se tiene como referencia una magnitud de tensión nominal 120[V].

#### **5.5.1. Selección de la señal de tensión de alimentación para los experimentos.**

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 enteros de la fundamental (60 Hz); esto puede no ser adecuado para estas cargas porque se definen tensiones sin distorsión y dependiendo de la forma de onda del voltaje (magnitud y fase) la emisión armónica de las cargas no lineales puede aumentar o disminuir.

Se escogen tres señales de alimentación con distorsiones características, sinusoidal y con base en investigaciones previas se utilizan las señales de alimentación Flat-top presente en el sector residencial y es causada por el uso masivo de rectificadores monofásicos y Pointed-top presente en el sector industrial debido a la presencia masiva de rectificadores de seis pulsos, que representan señales distorsionadas características en las redes de distribución a 230 [V] ver [1] y luego son ajustadas en pu para 120 [V].

Tabla 2. Espectros de cada señal tensión de alimentación

Armónico	Seno [V]	Flat-top [V]	%	Ángulos	Pointed [V]	%	Ángulos
1	120,00	116,6	97,17	0	120,00	100,00	0
3	-	2,8	2,3	0	3,65	3,04	180
5	-	1,9	1,61	180	3,65	3,04	0
7	-	1,0	0,87	0	0,06	0,05	0

En la Tabla 2. Espectros de cada señal tensión de alimentación, se observan los porcentajes, magnitudes y ángulos de cada señal utilizada.

Para el procedimiento planteado en la Figura 2, se observa los diferentes escenarios de medición que son:

- ✓ Dejando la distancia del circuito ramal constante (punto de acople común) y variando el porcentaje de regulación de la señal de tensión.
- ✓ Dejando la tensión constante (% de regulación) y variando la distancia del circuito ramal (punto de acople común).

Cabe resaltar que estos dos escenarios de evaluación son para cada señal de alimentación (seno pura, flat-top, pointed-top). Con lo dicho anteriormente, se puede hallar el número total de pruebas para una luminaria CFL que sería:

$$\text{Número total de pruebas por luminaria} = 1 * 3 * 5 * 7$$

Dónde: 3 representa el número de señales de alimentación, 5 distancias al punto de acople común y 7 diferentes % de regulación, lo que da como resultado 105 pruebas por luminaria, dando un total de 1,575 pruebas para las 15 luminarias.

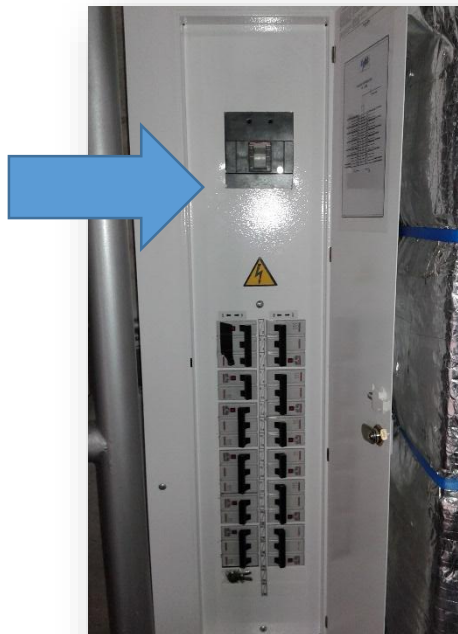
## 5.6. PROCEDIMIENTO PARA LA REALIZACIÓN DE UNA MEDIDA

Para la realización de las medidas es importante conocer cómo funciona el laboratorio y los equipos con los que se trabaja, 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 medida de forma correcta.

- ✓ **Paso 1:** Activar el interruptor por circuito trifásico del tablero de distribución principal TN A308, el cual se encuentra en el cuarto de servicios (ubicado al lado del laboratorio).

Figura 3. Tablero de distribución principal TN A308



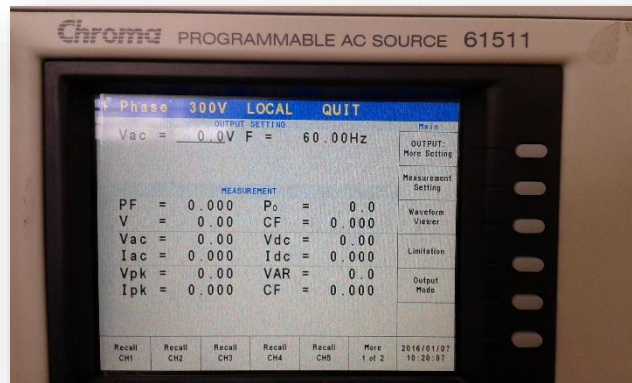
- ✓ **Paso 2:** Se procede a activar el interruptor por circuito secundario del tablero de distribución, ubicado dentro del laboratorio al lado de la fuente programable, al activar esta protección ya se puede encender la fuente.

Figura 4. Tablero de distribución secundario



- ✓ **Paso 3:** Se enciende la fuente Chroma y establecer la configuración deseada según el tipo de señal de tensión a utilizar en la prueba; la configuración y su elaboración será explicada en el ANEXO A más detalladamente.

Figura 5. Interfaz fuente programable Chroma.



- ✓ **Paso 4:** Se selecciona la carga a la cual se le va a realizar la medición y a su vez se ajusta la longitud del circuito ramal, la señal de alimentación (distorsión y porcentaje de regulación).
- ✓ **Paso 5** Se procede a utilizar el equipo analizador de la calidad de la energía Dranetz Figura 6, al cual se le establecerá la configuración creada para la obtención de la mayor cantidad de muestras y dicho proceso será explicado en el ANEXO B más detalladamente.

Figura 7. Analizador de la calidad de la energía Power visa



- ✓ **Paso 6:** En la Figura 8 se puede apreciar al medidor PowerVisa, encendido, la carga seleccionada estará conectada por medio de sus pinzas de tensión y corriente encargadas de la captura de cada señal.

Figura 9. Medidor PowerVisa con la carga seleccionada a medir

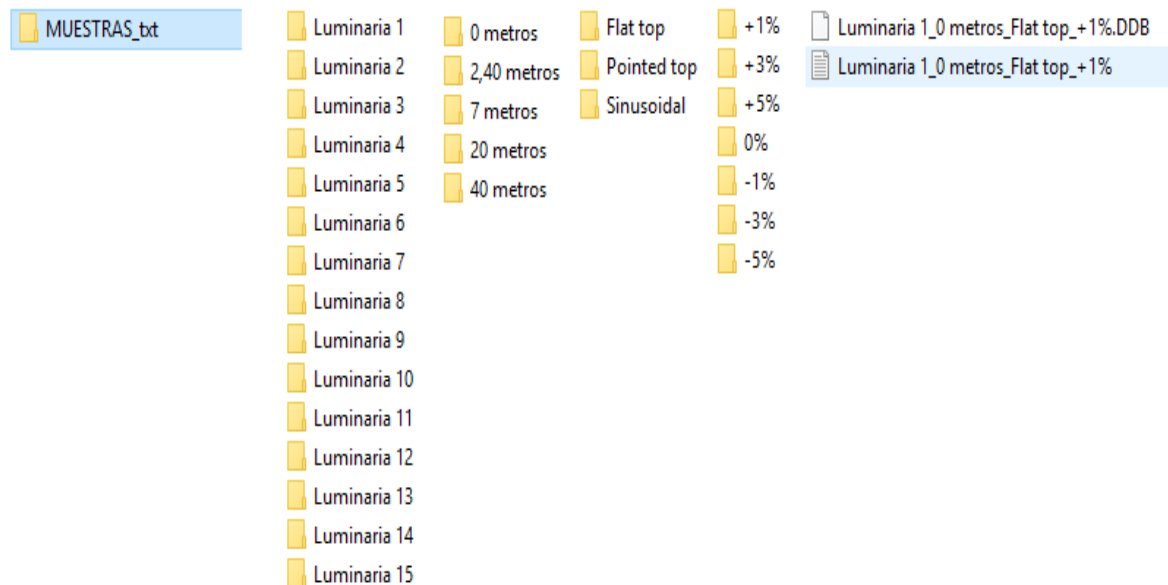


## 5.7. REPOSITORIO ORGANIZADO DE MEDIDAS

Una vez realizadas las pruebas, se lleva a cabo una primera organización clasificándolas por fecha de medida.

Cada prueba esta guardada por defecto con extensión de archivo .DDB por el uso del Dranetz, por ello es necesario llevar estas medidas a un archivo que nos permita trabajar fácilmente; en nuestro caso utilizamos archivos .txt, dicho proceso de exportación de datos ser explica en el ANEXO C más detalladamente.

Figura 10. Organización de medidas por luminaria

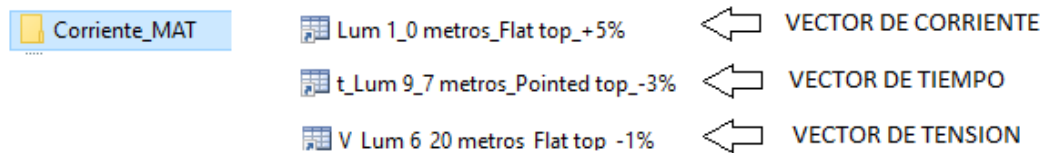


Al tener todos los archivos convertidos a .txt se organizan como se muestra en la Figura 11, en donde se clasifican carpetas por tipo de luminaria, distancia, señal de alimentación y regulación de tensión, en cada carpeta final encontramos los dos archivos utilizados (Luminaria 1\_0 metros\_Flat top\_+1%.DDB y Luminaria 1\_0 metros\_Flat top\_+1%.txt).

Posteriormente se ejecutaban algoritmos en Matlab, el tiempo en la conversión de las señales en .txt hacia Matlab era muy grande, por ello se optó por otro tipo de organización guardando cada una de las señales de tensión, tiempo y corriente de cada prueba en archivos con extensión .mat, con esto se reduce significativamente

el tiempo de ejecución de cada algoritmo, por esta razón la organización final se los archivos se muestra a continuación.

Figura 12. Organización de archivos .mat



Debido al uso de varias carpetas es importante revisar la ubicación del archivo en los algoritmos cada vez que se ejecutan y así evitar posibles errores.

## 5.8. METODOLOGÍA PARA EL ANÁLISIS DE LOS DATOS OBTENIDOS

Para el tratamiento de las señales obtenidas por medio de los equipos de medida en el laboratorio de Guatiguara, se desarrollan algoritmos por medio de Matlab software matemático que combina todas las herramientas necesarias para desarrollar, probar y analizar de forma rápida conceptos y métodos, permitiendo dar una solución óptima.

Para el desarrollo de la investigación se tiene en cuenta un procedimiento para el análisis de los datos obtenidos teniendo en cuenta los criterios para los algoritmos de cálculo de la sensibilidad de la corriente a las variaciones de magnitud de tensión, forma de onda de tensión y longitud del circuito ramal además el espectro armónico (magnitud y ángulo de fase) e índices para la evaluación de los fenómenos de diversidad y atenuación.

1. Por medio del equipo de medida Dranetz Power Visa y el software encargado de leer los datos obtenidos por el equipo en archivo (.DDB) DranView se

pudo exportar las muestras de la señal de corriente medida en un archivo de texto (.txt) para todas las pruebas realizadas; por ello la primera parte del algoritmo realizado en Matlab es buscar las funciones adecuadas para poder leer la información guardada en los archivos de texto por medio de Matlab usando funciones como **Fopen** (abre archivo de texto) y **Textscan** (lee los datos de acuerdo a formato de la cadena de texto establecido).

2. Después de cargados los datos del archivo de texto, para optimizar el proceso de lectura de los datos se guardan cada uno de los vectores de la señal de corriente en archivos .mat que facilitan el trabajo a la hora de crear los algoritmos y ahorran tiempo porque no hay necesidad de volverlos a cargar de nuevo desde el archivo de texto donde se encuentran inicialmente.
3. Después de guardadas las señales de corriente en archivos.mat para facilitar su lectura y tiempo de ejecución del algoritmo se realizan “Bucles” por medio de funciones **For** e **If** en el algoritmo que me permitan “llamar” de forma rápida los datos desde los archivos .mat en donde se contemplen las combinaciones realizadas a la hora de tomar los datos:
  - Numero de luminaria (Numero definido inicialmente en la selección de la muestra de acuerdo a fabricante y potencia).
  - Forma de onda de la señal de alimentación.
  - Magnitud de tensión de la señal de alimentación.
  - Longitud del circuito ramal al punto de acople común.
4. Luego de tener un algoritmo más organizado se incluyen fórmulas de cálculo para cada una de las pruebas, con los que se pudieron determinar los resultados de esta investigación:
  - 4.1. Para el cálculo del espectro armónico en magnitud y ángulo de fase se utiliza la función **FFT (Fast Fourier Transform)** definida en Matlab.
  - 4.2. Se determinan por medio del algoritmo índices de THDi, Atenuación y Diversidad agregando estas funciones en nuevas líneas del algoritmo.

4.3. Se determinan por medio del algoritmo valores de energía, corriente rms y corriente pico agregando estas funciones en nuevas líneas del algoritmo.

5. Luego de obtener y almacenar los resultados de las funciones anteriores por medio de Matlab fue de gran ayuda la creación de gráficas y tablas con las que se pueden identificar claramente cada uno de los resultados. Para la creación de las gráficas se tuvieron en cuenta dos funciones principales **Plot** y **Polar** además se deben identificar las variables mostradas en las gráficas con sus unidades, nombres en ejes y títulos (**xlabel**, **ylabel**, **title**) como también se debe tener siempre encendida la grilla para que no existan confusiones al leer los valores en los ejes de la gráfica (**grid on**).

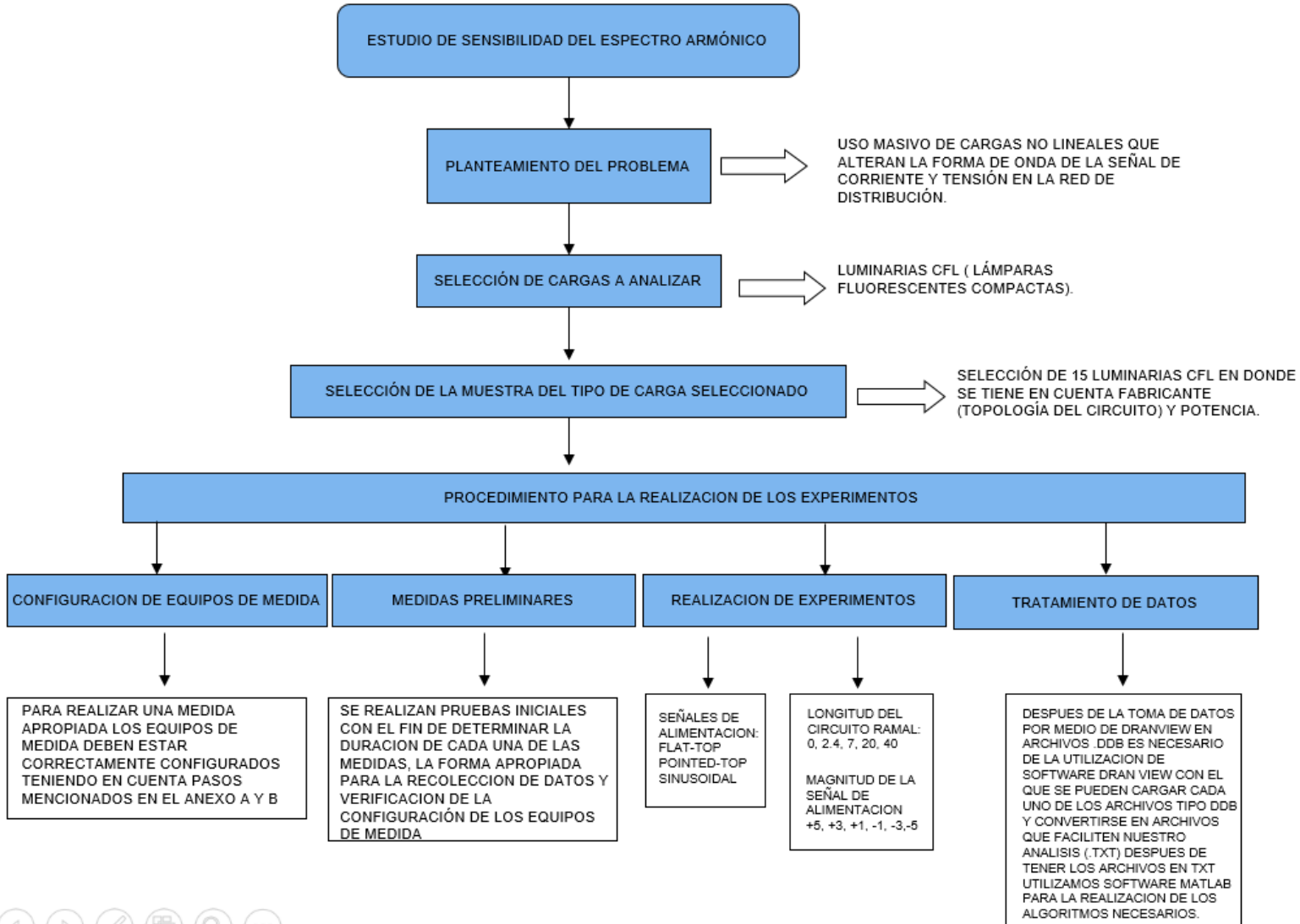
En la sección 6 se presentan los resultados encontrados para los ítem mencionados anteriormente, de esta primera etapa de investigación del comportamiento de la sensibilidad de la corriente en luminarias tipo CFL, se encuentran comportamientos como el posible fenómeno de resonancia a una longitud de 2.4 [m], el comportamiento que presenta el espectro armónico, que serán tópicos para futuras investigaciones, en donde se realicen experimentos más específicos para poder explicarlos de manera correcta.

Se recomienda que para futuras investigaciones que busquen explicar el porqué de los resultados obtenidos, teniendo en cuenta lo siguiente:

- Caracterizar el circuito con el que se vaya a realizar el experimento para determinar el valor de la impedancia.
- Aumentar el número de pasos en la variación de la longitud de circuito ramal para determinar si se presenta para otras longitudes el fenómeno observado en esta investigación para una distancia de 2.4 [m].

- Aumentar el número de pasos en la variación de la magnitud de la señal de alimentación, con el fin de observar mejor el comportamiento de la señal de corriente.
- Tener en cuenta la temperatura en las luminarias para la toma de datos, ya que es posible que este parámetro altere el comportamiento de la luminaria.
- Se deben configurar los equipos de medida para garantizar la confiabilidad en la toma de datos.
- Establecer otros parámetros a estudiar tales como índices de la calidad de la potencia (agregación de carga, diversidad a una distancia diferente de 0[m]) que permitan explicar el comportamiento de la señal de corriente.

Figura 13. Metodología para la obtención de los datos y análisis.



## 6. RESULTADOS

En este capítulo se presentan los resultados obtenidos durante el tratamiento de las señales, con base en los algoritmos realizados por medio de Matlab. Para la programación de estos algoritmos se tienen en cuenta características importantes de las señales medidas y de su espectro armónico como la potencia de la luminaria, magnitud y el ángulo de fase de corriente, la sensibilidad a la variación de tensión, la sensibilidad a la variación de longitud del circuito ramal, el valor eficaz, la energía de las señales además de índices como la distorsión armónica total, factor de atenuación y factor de diversidad.

Para comparar los resultados de cada algoritmo y concluir acerca de las pruebas realizadas correctamente, se estudia un periodo de todas las señales medidas, la señal de interés en nuestro proyecto es la señal de corriente y por ello para dicho periodo de análisis se deben tener en fase todas las diferentes señales de alimentación para todas las pruebas, de manera que podamos establecer un verdadero punto de inicio para el análisis de la señal de corriente, y un mismo periodo y número de muestras para la señal de corriente y tensión.

Para determinar el periodo correcto mostrado en Figura 14, se encuentra la muestra en donde el valor de tensión sea lo más cercano a 0 [V] y el valor de la muestra siguiente sea positiva, a partir de esta muestra se seleccionan 256 muestras correspondientes a un periodo (puesto que la frecuencia de muestreo del medidor es de 256 muestras/ciclo).

Figura 15. Señal de tensión y corriente en un periodo

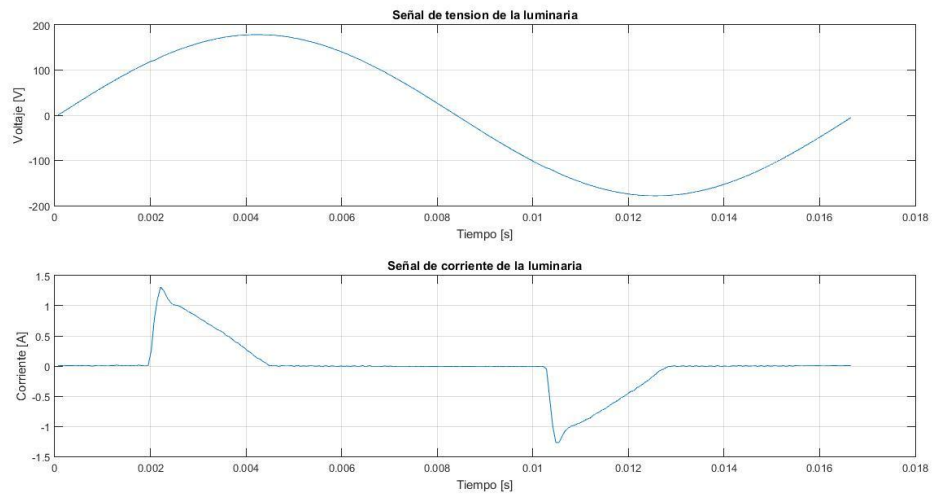
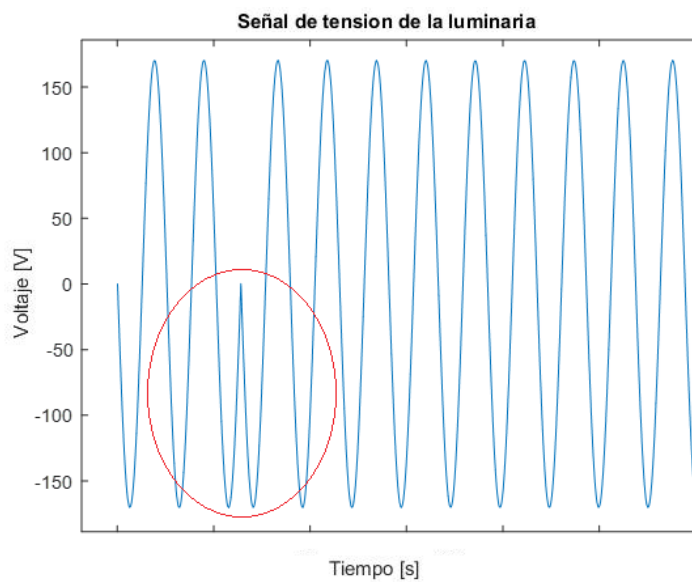


Figura 16. Error en señal de tensión



Se deben inspeccionar cada uno de los periodos seleccionados para cada prueba evitando tomar periodos de la señal incompletos ver Figura 17, en la que se detalla una muesca producto de la agregación de los diferentes periodos de captura del equipo, esto puede ocasionar errores en el tratamiento de la señal.

## **6.1. CASO DE ESTUDIO 1: FORMA DE ONDA Y CARACTERÍSTICAS ARMÓNICAS DE LA SEÑAL DE TENSIÓN EN EL LABORATORIO INTEGRACIÓN ENERGÉTICA**

Puesto que las señales de tensión utilizadas fueron tomadas en un estudio realizado en Alemania [9] y por tanto probablemente la distorsión armónica no es la misma para el caso particular colombiano, fue de nuestro interés conocer que forma podía tener la señal de alimentación en el laboratorio (Integración Energética) ubicado en el parque tecnológico de Guatiguara y compararla con las señales utilizadas.

De igual manera para determinar la sensibilidad de la señal de corriente frente a variaciones en magnitud de tensión y longitud del circuito ramal, se propuso un procedimiento en el cual se compara la respuesta en corriente de las luminarias cuando son alimentadas por una señal de tensión distorsionada y una señal sinusoidal pura de acuerdo a la referencia [9], en donde se utilizan dos señales típicas de tensión en una red de distribución a 230 [V].

Para el caso particular de Colombia no se encontró un trabajo relacionado con caracterización de la forma de onda de tensión de la red de distribución, por tal motivo en el presente trabajo se ajustaron las diferentes señales distorsionadas desde su espectro en p.u a una tensión nominal de 120 [V], conservando cada ángulo de fase, estas señales son presentadas en la Tabla 2.

Estas consideraciones son tenidas en cuenta de manera que los resultados del trabajo puedan ser fácilmente comparables con los resultados de investigaciones previas, sin embargo para el presente trabajo y este caso de estudio particular se realizó un análisis de la señal de tensión disponible en el laboratorio a lo largo del día.

De la Figura 18 a la Figura 19, se muestra la forma de onda de tensión en el laboratorio para diferentes intervalos de tiempo, en comparación con las señales

utilizadas en la investigación (Flat-top, Pointed-top). Para determinar estas formas de onda, se realizaron cuatro pruebas con duración de 90 minutos cada una, en intervalos diferentes de un día.

Figura 20. Señal de tensión medida en laboratorio, periodo 1: (9 a.m. hasta las 10: 30 a.m.).

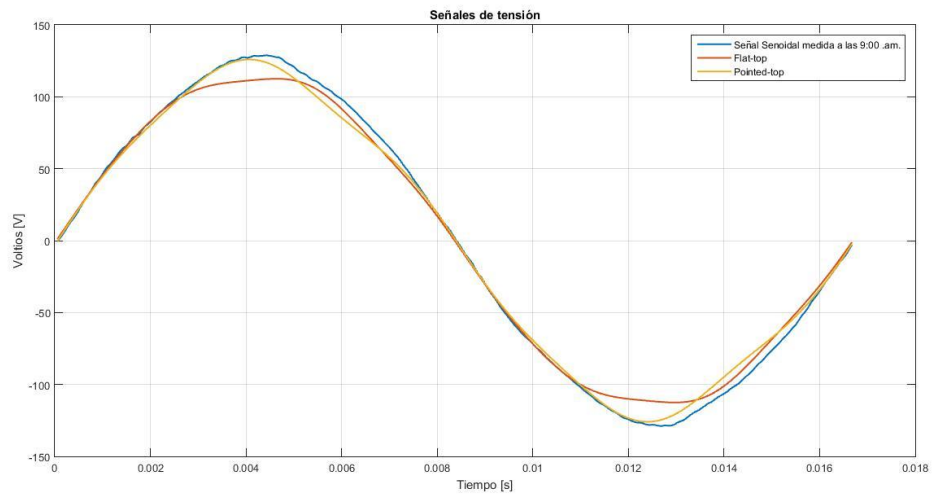


Figura 21. Señal de tensión medida en laboratorio, periodo 2: (10:45 a.m. hasta las 12: 15 m).

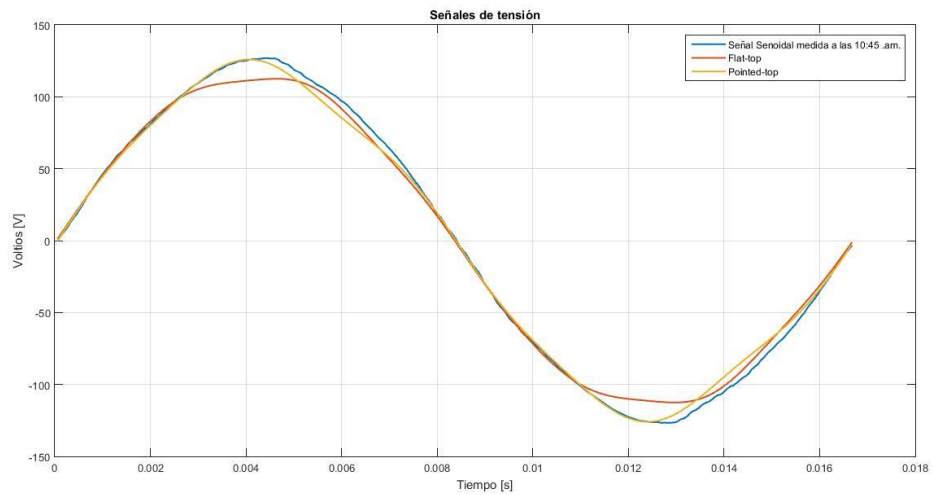


Figura 22. Señal de tensión medida en laboratorio, periodo 3: (2 p.m. hasta las 3:30 p.m.).

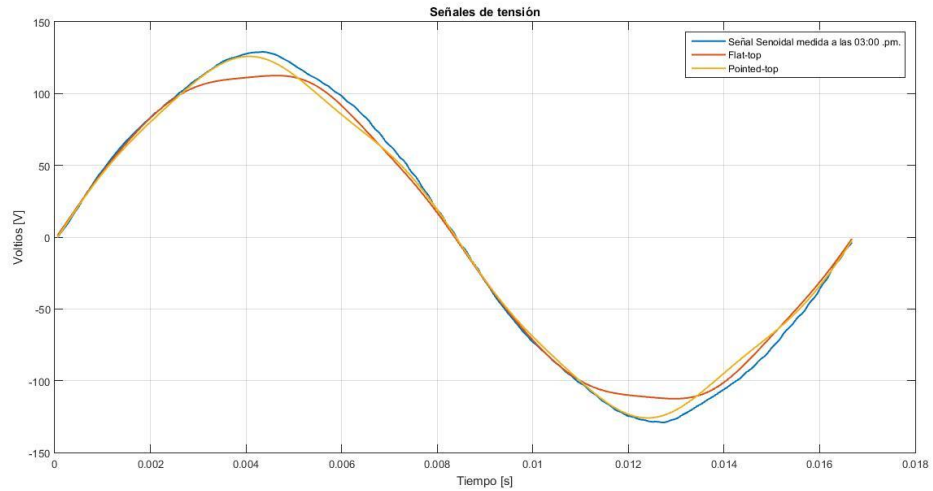
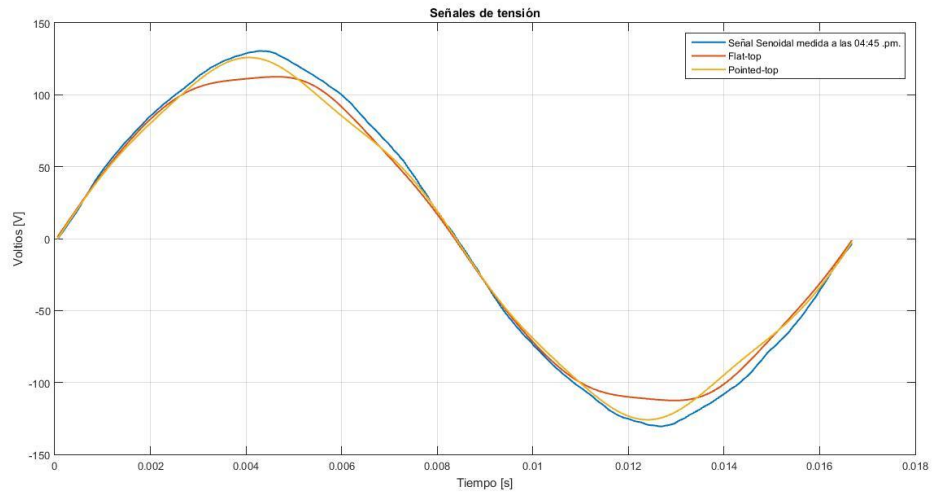


Figura 23. Señal de tensión medida en laboratorio, periodo 4: (3:45 p.m. hasta las 5:15 p.m.).



Para la comparación de las señales de tensión del laboratorio para los diferentes periodos de tiempo y las señales utilizadas en el presente trabajo, se calcula el índice el THDv (distorsión armónica de tensión) En la Tabla 3 podemos ver que la

distorsión armónica del promedio de la señal medida disminuye un 60% con respecto a la señal Pointed-top y 40% con respecto a la señal Flat-top aproximadamente.

Tabla 3. Distorsión armónica para cada una de las señales.

	<b><u>THDv [%]</u></b>
<b>Pointed-top</b>	4,30
<b>Flat-top</b>	3,03
<b>Señal medida 1</b>	1,80
<b>Señal medida 2</b>	1,81
<b>Señal medida 3</b>	1,98
<b>Señal medida 4</b>	1,66

Por otro lado, en la Tabla 4 se presenta la magnitud de tensión en porcentaje con respecto a la tensión fundamental para cada orden armónico, en esta tabla se aprecia que las variaciones en magnitud de las señales de tensión medidas no varían considerablemente, esto también se puede apreciar en la Tabla 5 para el ángulo de fase, con esta información se puede concluir que la señal de tensión de la red de distribución en el laboratorio presenta una forma de onda similar a la Pointed-top pero con diferente información armónica.

Tabla 4. Distorsión de las señales medidas y utilizadas

<b>Arm.</b>	<b>Pointed-top [%]</b>	<b>Flat-top [%]</b>	<b>Señal 1 [%]</b>	<b>Señal 2 [%]</b>	<b>Señal 3 [%]</b>	<b>Señal 4 [%]</b>
<b>1</b>	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00
<b>3</b>	3,04	2,37	0,24	0,28	0,34	0,27
<b>5</b>	3,04	1,66	1,65	1,69	1,82	1,51
<b>7</b>	0,05	0,89	0,50	0,33	0,63	0,48
<b>9</b>	0,00	0,00	0,32	0,35	0,16	0,05
<b>11</b>	0,00	0,00	0,29	0,35	0,28	0,40

Tabla 5. Angulo de fase por orden armónico.

Arm.	Pointed-top [°]	Flat-top [°]	Señal 1 [°]	Señal 2 [°]	Señal 3 [°]	Señal 4 [°]
1	0	0	0	0	0	0
3	180	0	279,56	251,63	213,86	206,58
5	0	180	359,64	1,27	1,94	352,74
7	0	0	36,12	38,88	39,89	37,66
9	0	0	260,77	262,84	297,86	252,01
11	0	0	337,99	324,64	306,68	335,09

## 6.2. CASO DE ESTUDIO 2: ESTUDIO DE LA DISTORSIÓN ARMÓNICA DE CORRIENTE THDI.

En este caso de estudio está orientado a analizar el comportamiento de la distorsión armónica total (THDi) para cada luminaria cuando se presenta un barrido en la magnitud de tensión para una distancia constante de 0 [m], como también haciendo un barrido en longitud del circuito ramal manteniendo constante la variación de tensión, presentando la desviación estándar para las pruebas de cada luminaria.

Tabla 6. Variación de THDI para las lum 1 a la lum 7

Senoidal	Distancia	Lum1	Lum2	Lum3	Lum4	Lum5	Lum6	Lum7
	0	106,74	121,04	105,81	116,99	96,30	80,97	103,69
	2,4	106,05	121,96	104,07	115,51	97,59	91,44	103,58
	7	110,09	121,47	105,36	115,64	96,27	82,55	105,26
	20	106,41	120,79	104,47	115,69	95,19	81,14	104,05
	40	105,50	122,39	104,94	115,61	95,72	81,37	104,31
	desviación	1,81	0,66	0,69	0,62	0,90	4,48	0,67

Tabla 7. Variación de THDI para las lum 8 a la lum 15

Senoidal	Distancia	Lum8	Lum9	Lum10	Lum11	Lum12	Lum13	Lum14	Lum15
	0	90,11	98,49	97,71	113,07	115,95	90,88	118,95	115,41
	2,4	117,61	98,96	96,10	112,53	92,96	82,38	119,28	113,19
	7	91,40	98,42	95,04	111,50	117,44	90,32	119,85	114,94
	20	90,19	98,60	95,37	112,87	117,90	91,04	118,02	114,80
	40	92,13	97,82	95,05	111,36	117,25	91,35	119,13	113,87
	desviación	11,95	0,42	1,12	0,79	10,83	3,83	0,67	0,90

En la Tabla 6 y Tabla 7, se presenta los resultados obtenidos para la distorsión armónica de corriente para cada luminaria, realizando un barrido en distancia del circuito ramal y manteniendo el porcentaje de tensión constante, con señal de alimentación sinusoidal. También se presenta la desviación estándar de las medidas en donde se aprecia que en algunas luminarias la desviación estándar es muy pequeña por debajo del 3.5%, en estas luminarias se puede concluir que el THDI no se ve afectado por la variación de impedancia del circuito ramal.

Por otro lado, para las luminarias (6, 8 y 12) presentan una mayor variación de distorsión, esto se debe a que el resultado encontrado para la distancia de 2,4 [m] se aleja de las demás medidas, provocando esta variación, la impedancia del circuito ramal y las componentes internas de cada luminaria pueden ser los causantes de este fenómeno. Sin embargo aún se necesita fuerte investigación en este comportamiento para conocer con certeza su causa.

Tabla 8. Variación de THDI para las lum 1 a la lum 7

Senoidal	Tensión	Lum1	Lum2	Lum3	Lum4	Lum5	Lum6	Lum7
	5	108,84	124,45	107,42	118,03	97,87	82,25	106,48
	3	108,55	121,07	105,81	117,88	96,70	81,25	105,56
	1	106,15	122,71	104,74	116,02	96,00	81,53	104,63
	0	106,74	121,04	105,81	116,99	96,30	80,97	103,69
	-1	104,79	118,08	104,03	114,94	94,79	80,91	103,81
	-3	103,58	120,13	102,17	114,68	94,58	80,21	103,14
	-5	102,51	117,97	101,45	114,39	93,98	79,46	101,90
	desviación	2,40	2,34	2,12	1,53	1,37	0,90	1,53

Tabla 9. Variación de THDI para las lum 8 a la lum 15

Senoidal	Tensión	Lum8	Lum9	Lum10	Lum11	Lum12	Lum13	Lum14	Lum15
	5	91,43	98,04	98,45	115,67	118,04	92,78	121,38	117,39
	3	91,19	99,90	97,90	114,85	119,26	92,65	119,66	115,98
	1	92,08	97,76	97,35	114,29	116,31	90,70	118,56	113,78
	0	90,11	98,49	97,71	113,07	115,95	90,88	118,95	115,41
	-1	90,98	97,86	95,50	112,54	117,09	89,69	117,40	112,41
	-3	88,69	96,27	94,70	111,33	118,27	88,95	116,46	112,04
	-5	90,35	95,55	93,59	111,08	114,29	87,33	115,44	111,36
desviación	1,10	1,43	1,85	1,75	1,67	1,96	2,01	2,27	

Por otra parte, en las Tabla 8 y Tabla 9 se presenta los resultados obtenidos para la distorsión armónica de corriente para cada luminaria, realizando un barrido en tensión y manteniendo la distancia constante a 0 [m] con señal de alimentación sinusoidal. También se presenta la desviación estándar, donde se puede apreciar que la variación no es mayor al 2%, se puede concluir que para las luminarias en estudio el THDI no se ve afectado para este caso en particular.

Para ver los resultados encontrados con señales de alimentación Flat-top y Pointed-top ver **ANEXO D**.

Por otra parte de la Figura 24 a la Figura 25, se presenta el THDi con respecto a la potencia de cada luminaria, en estas figuras es posible apreciar que no existe una relación directa entre la potencia de cada luminaria y su distorsión armónica. Así mismo es posible observar diferentes distorsiones para la misma potencia en luminarias de diferentes fabricantes, esto podría ser causado por las diferentes configuraciones de sus circuitos eléctricos y/o componentes para los diferentes fabricantes, iniciativas orientadas a mejorar la vida útil de las luminarias o a cumplir con algún estándar en materia de distorsión.

Además, también se puede observar que la luminaria 6 con potencia de 18 [W] presenta la menor distorsión para las tres señales de alimentación, asimismo, la luminaria 2 con una potencia de 5 [W] presenta una mayor distorsión para las tres señales de alimentación y de forma general puede observarse que la distorsión armónica para todas las luminarias es mayor con una señal de alimentación Pointed-top que con una Sinusoidal.

Figura 26. Distorsión armónica por luminaria Sinusoidal

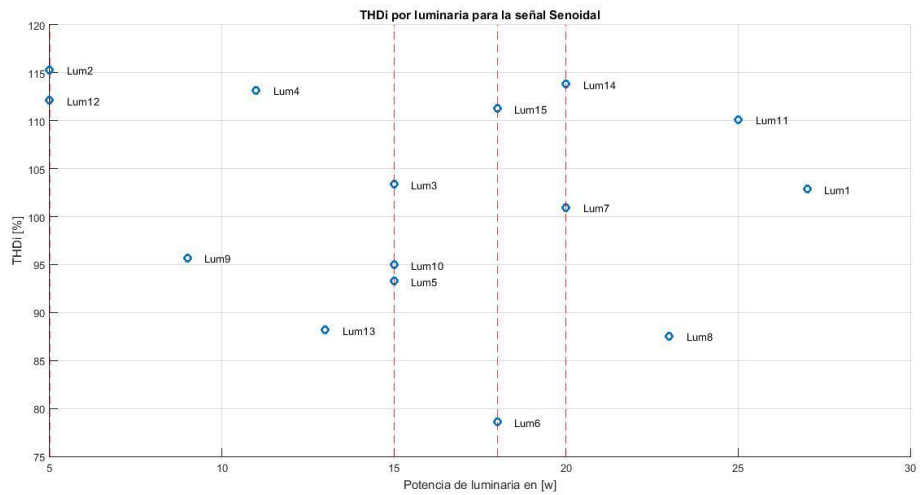


Figura 27. Distorsión armónica por luminaria Flat-top

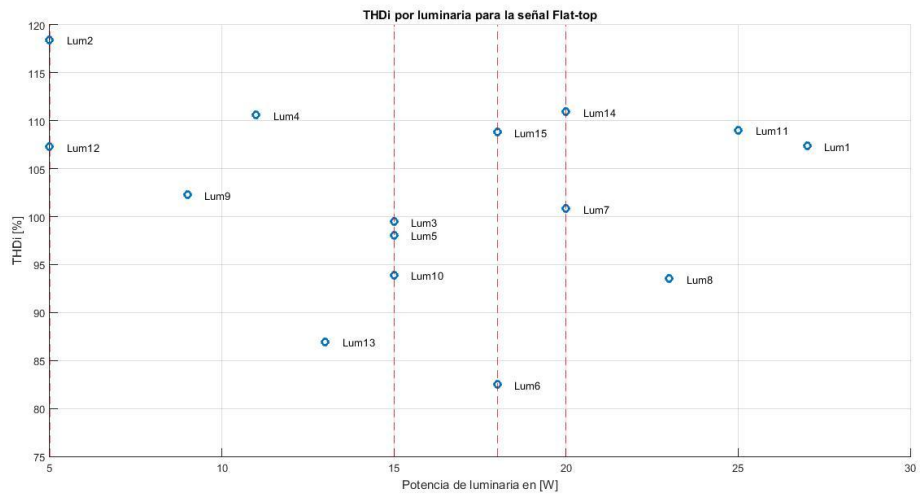
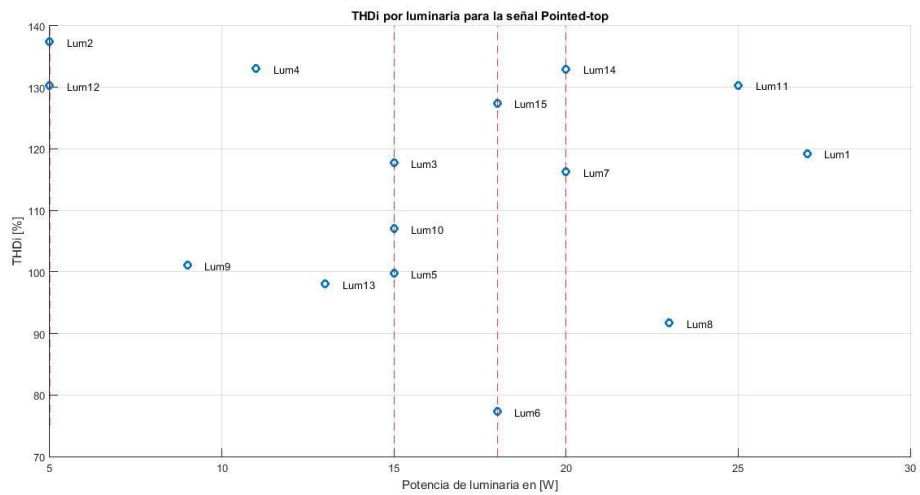


Figura 28. Distorsión armónica por luminaria Pointed-top



### **6.3. CASO DE ESTUDIO 3: RESULTADO EN LA FORMA DE ONDA DE CORRIENTE EN LA CARGA CON LAS TRES SEÑALES DE ALIMENTACIÓN (SENO, FLAT-TOP Y POINTED-TOP)**

De la Figura 29 a la Figura 30, se muestra el comportamiento de la señal de corriente para la luminaria 1, luminaria 13 y luminaria 15 con potencias de 27 [W], 18 [W] y 18 [W] respectivamente, para las diferentes señales de alimentación, con longitud del circuito ramal de 0 [m] y variación de tensión constante 120 [V]. Como resultado se espera que al mantener la longitud del circuito ramal constante ( $Z$  constante) la respuesta en la señal de corriente en la carga sea mayor cuando se alimenta con la señal de tensión en la que su componente fundamental sea mayor (ver Tabla 2).

Como resultado se encontró que el valor pico de la señal de corriente es más significativo cuando se alimenta la carga con señal de tensión Flat-top en comparación con las señales de tensión sinusoidal y Pointed-top, a pesar de que la magnitud de la componente fundamental de la señal de tensión flat-top es menor con respecto a las componentes fundamentales de las señales de tensión seno y pointed-top ver Tabla 2.

Figura 31. Señal de corriente luminaria 1

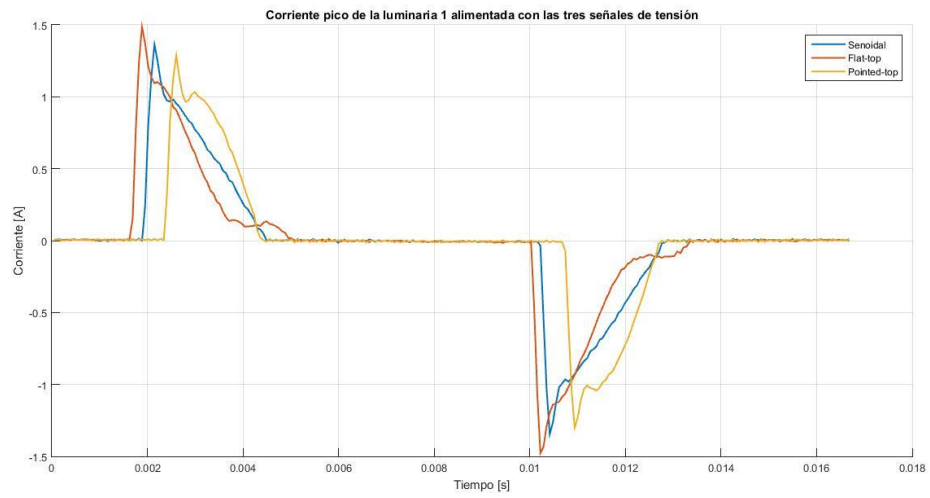


Figura 32. Señal de corriente luminaria 13

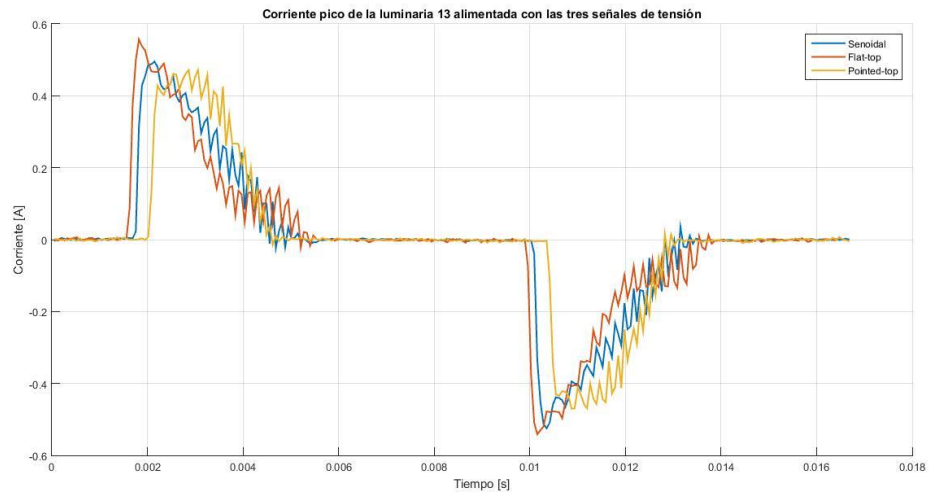


Figura 33. Señal de corriente luminaria 15

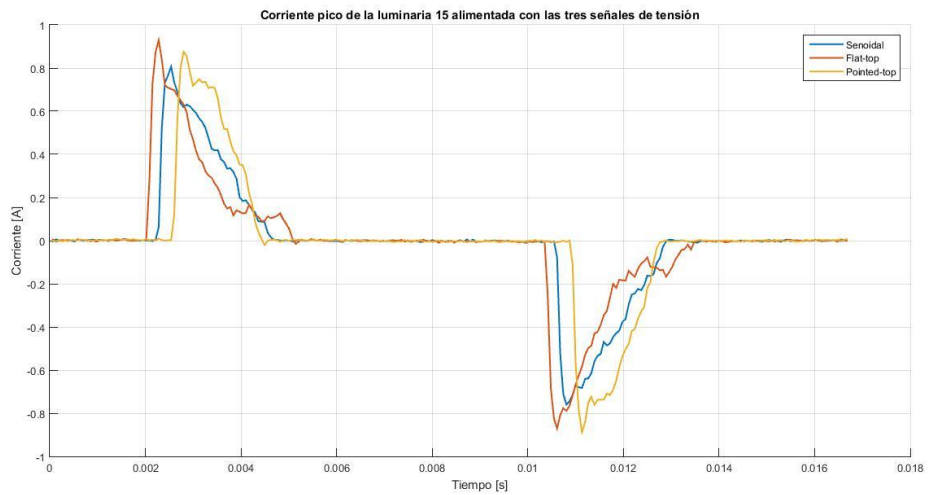
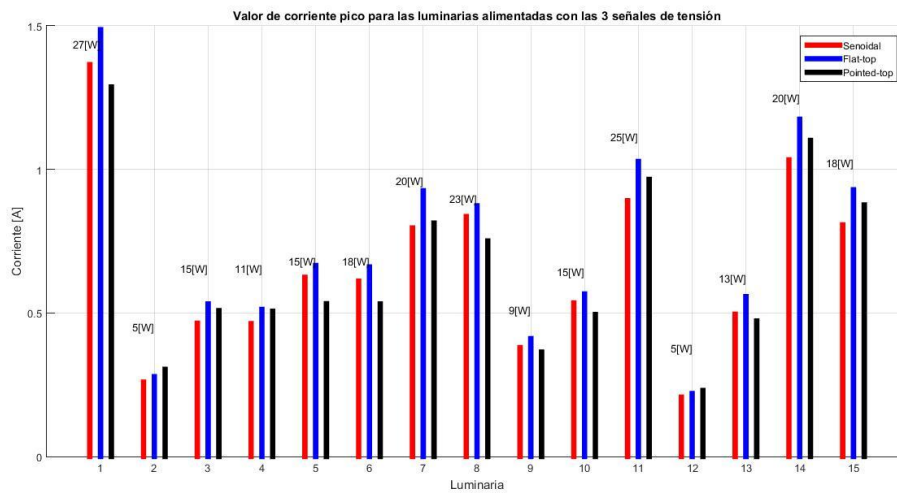


Figura 34. Valor pico de corriente para cada luminaria

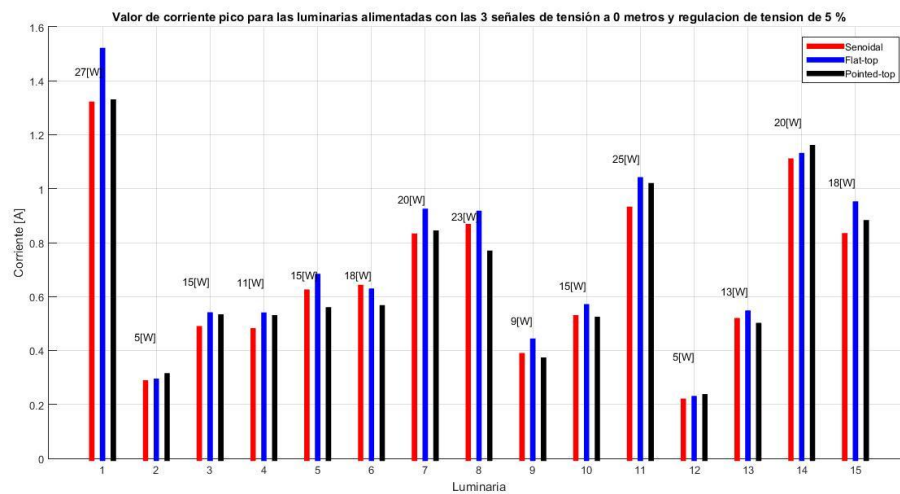


Para confirmar el resultado encontrado anteriormente, se presenta el valor pico de la corriente para cada luminaria alimentada con las tres señales de tensión a distancia 0 [m] y variación en la magnitud de tensión 120[V]; en la Figura 35 se evidencia que el valor pico de la señal de corriente es más significativo cuando se

alimenta la carga con señal de tensión Flat-top en comparación con las otras dos señales de tensión .excepto para las dos luminarias de menor potencia, Luminaria 2 y 12 con potencia 5[W] cada una.

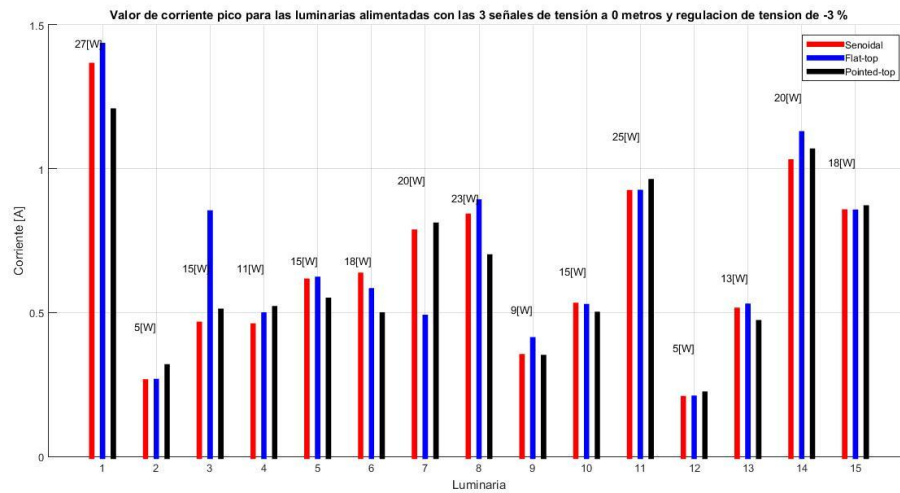
Este comportamiento se presenta para todas las luminarias en estudio a variación de tensión de 120 [V] y distancia del punto de acople común 0 [m].

Figura 36. Valor pico de corriente para cada luminaria



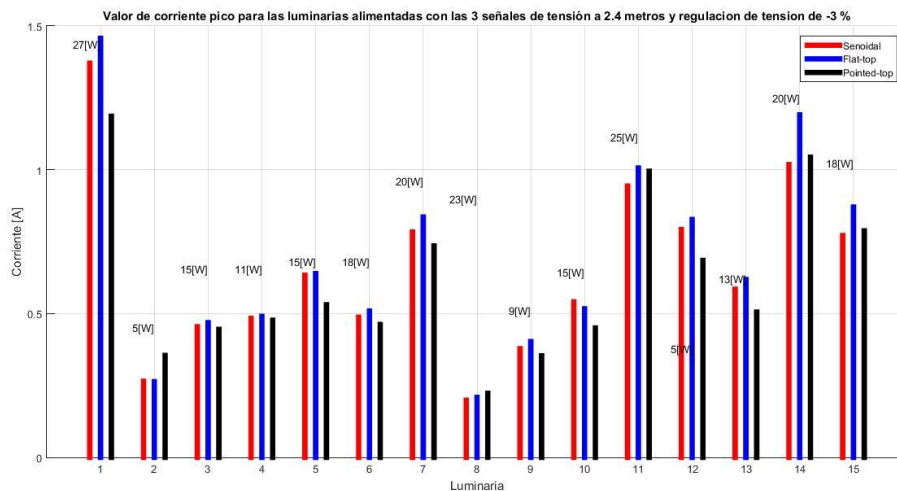
En la Figura 37 se presenta el valor pico de la corriente para cada luminaria alimentada con las tres señales de tensión a distancia 0 [m] y variación en la magnitud de tensión del 5%, donde se evidencia que no se presenta el mismo comportamiento encontrado en 0 [m] y 0% que sería 120[V] en magnitud de tensión, dado que las luminarias con potencia de: 5[W], 18[W] y 20 [W] su respuesta en corriente al ser alimentado con señal de tensión flat-top es menor, en comparación con la señal de tensión pointed-top.

Figura 38. Valor pico de corriente para cada luminaria



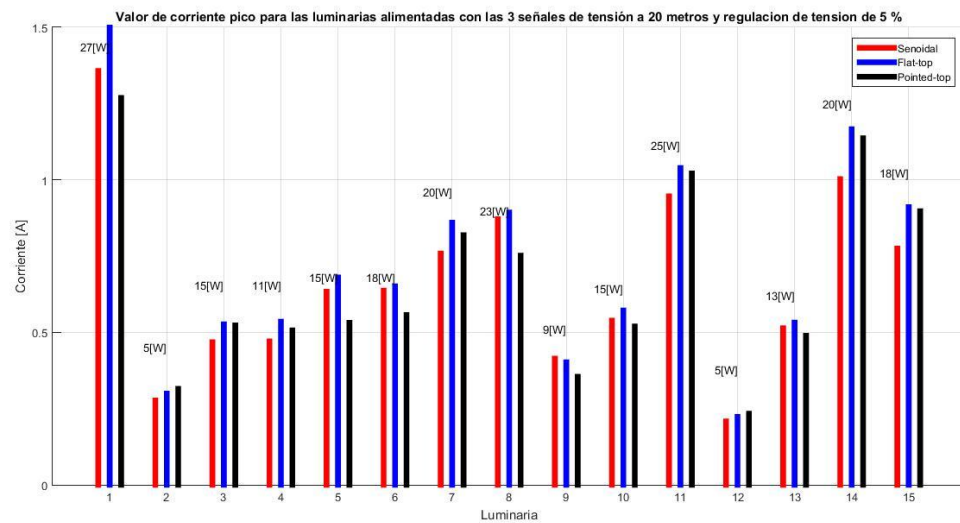
En la Figura 39, se presenta el valor pico de la corriente para cada luminaria alimentada con las tres señales de tensión a distancia 0 [m] y -3% en variación de la magnitud de tensión, donde se evidencia que no presenta el mismo comportamiento para 0 [m] y 0% de variación en la señal de tensión, dado que las luminarias con potencia 5[W], 11[W], 15[W], 18 [W] y 20[W], su respuesta en corriente al ser alimentado con señal de tensión flat-top es menor, en comparación con señal de tensión pointed-top.

Figura 40. Valor pico de corriente para cada luminaria



En Figura 41 se presenta el valor pico de la corriente para cada luminaria alimentada con las tres señales de tensión a distancia 2,4 [m] y -3%, en variación de la magnitud de tensión, donde se evidencia que no se presenta el mismo comportamiento para 0 [m] y 0% de variación de tensión, dado en que las luminarias de potencia 5[W], 15[W], 23[W] la respuesta en corriente al ser alimentado con señal de tensión flat-top es menor, en comparación con señal de tensión pointed-top o Senoidal.

Figura 42. Valor pico de corriente para cada luminaria



En Figura 43, se presenta el valor pico de la corriente para cada luminaria alimentada con las tres señales de tensión a distancia 20 [m] y 5% en variación de la magnitud de tensión, donde se evidencia que no se presenta el mismo comportamiento para 0 [m] y 0% de variación de tensión, dado en que las luminarias de potencia 5[W], 9[W], 23[W] la respuesta en corriente al ser alimentado con señal de tensión flat-top es menor, en comparación con la señal de tensión pointed-top o Senoidal.

#### 6.4. CASO DE ESTUDIO 4: COMPORTAMIENTO DE LA CORRIENTE PARA CADA LUMINARIA AL REALIZAR VARIACIONES EN LA MAGNITUD DE LA TENSIÓN Y DISTANCIA DEL PUNTO DE ACOPLE COMÚN.

En este caso de estudio se analiza el comportamiento que tiene la corriente rms por luminaria, realizando variación de longitud en el circuito ramal dejando constante la variación en magnitud de la señal de tensión.

Se espera como resultado que a medida que se aumenta la distancia del punto de acople común (impedancia creciente) la corriente de carga tienda a decrecer, al dejar el valor de tensión constante.

Figura 44. Comportamiento de la corriente rms para la luminaria 6 variando la longitud

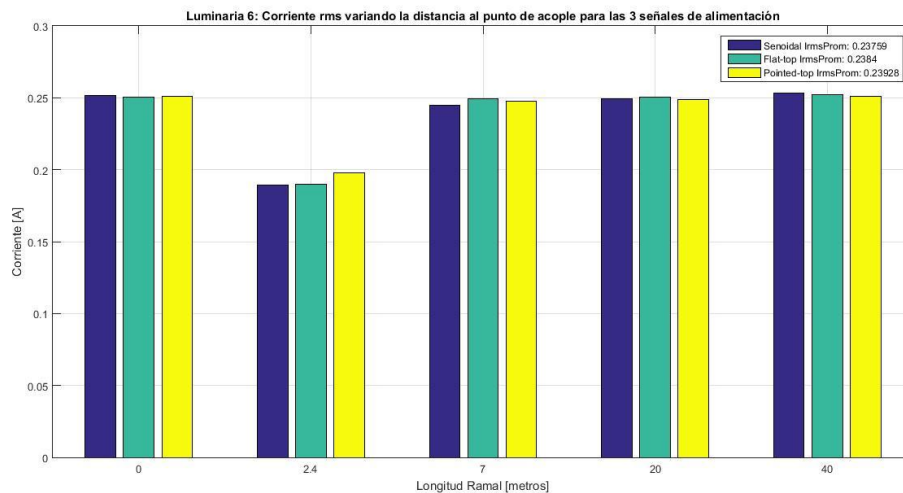


Figura 45. Comportamiento de la corriente rms para la luminaria 12 variando la longitud

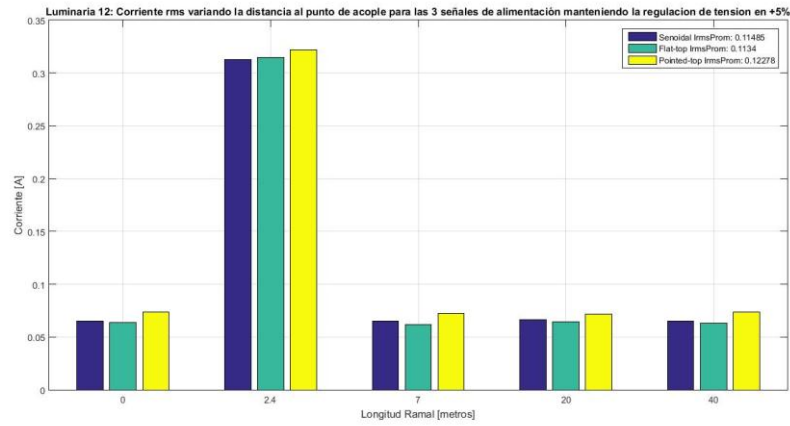


Figura 46. Comportamiento de la corriente rms para la luminaria 13 variando la longitud

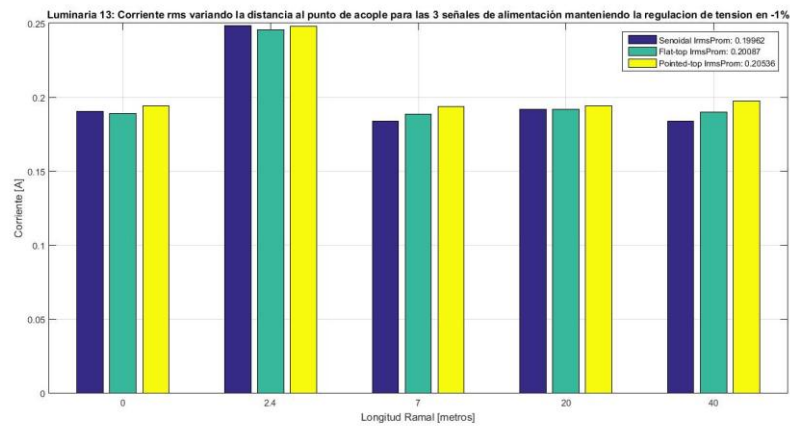
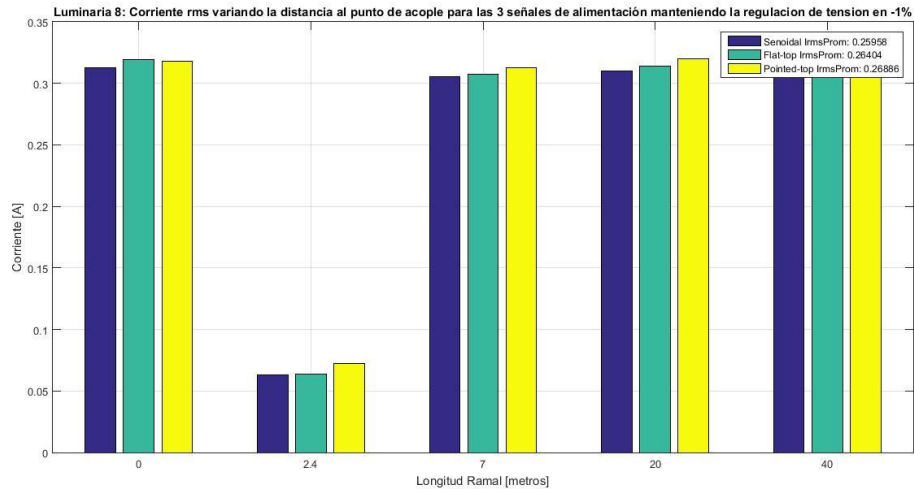


Figura 47. Comportamiento de la corriente rms para la luminaria 8 variando la longitud



En el barrido en longitud, de la Figura 48 a la Figura 49, se presenta un comportamiento inusual para la distancia 2,4 [m] del punto de acople común, debido a que para los distintos escenarios de medición mostrado en los gráficos anteriores la corriente es mucho mayor o menor con respecto a las demás distancias. Creemos que este comportamiento puede, estar relacionado con un fenómeno de resonancia a dicha distancia, sin embargo aún se necesita de fuerte investigación al respecto.

Asimismo, hay que tener en cuenta que la distancia a 0 [m] se presenta en él toma de la caja utilizada para realizar las mediciones y por tanto existe un circuito ramal desde la bornera de la fuente hasta este punto.

Por otra parte, también se evidencia que para las demás distancias el valor de corriente eficaz (Irms) es casi constante, siendo esto un tópico para futuras investigaciones en el que se revise exhaustamente si existente otras longitudes sobre las cuales no se realizó medición y que también se pudiera presentar este fenómeno

Se quiso determinar para que frecuencia se presenta el fenómeno expuesto en los gráficos anteriores, se graficó la corriente rms en términos del orden armónico dejando porcentaje de variación de tensión 0% y variando la longitud en el circuito ramal, como ejemplo se dan la Figura 50 y Figura 51 en donde se aprecia que la corriente a la distancia de 2,4 [m] es mucho menor o mayor en comparación con las demás distancias para todo el orden armónico mostrado, también las demás corrientes a las otras distancias son casi constante.

Figura 52. Comportamiento de la corriente rms para la luminaria 8 en términos de a frecuencia

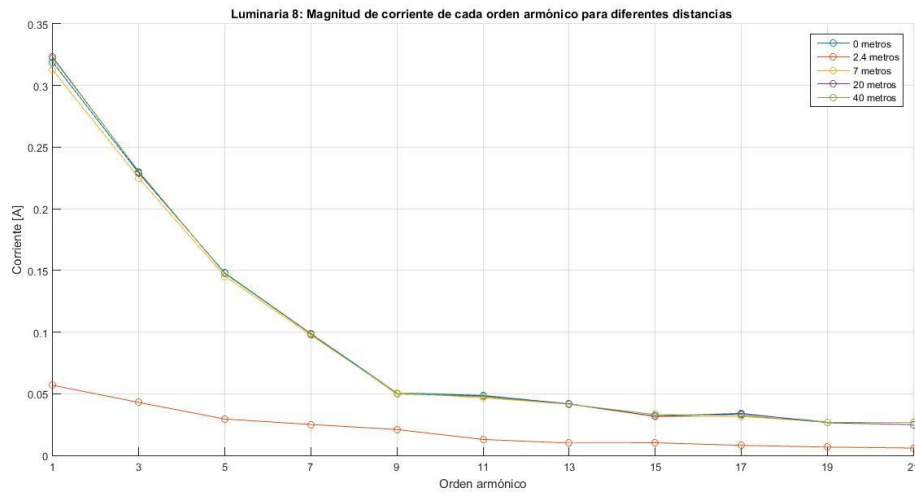
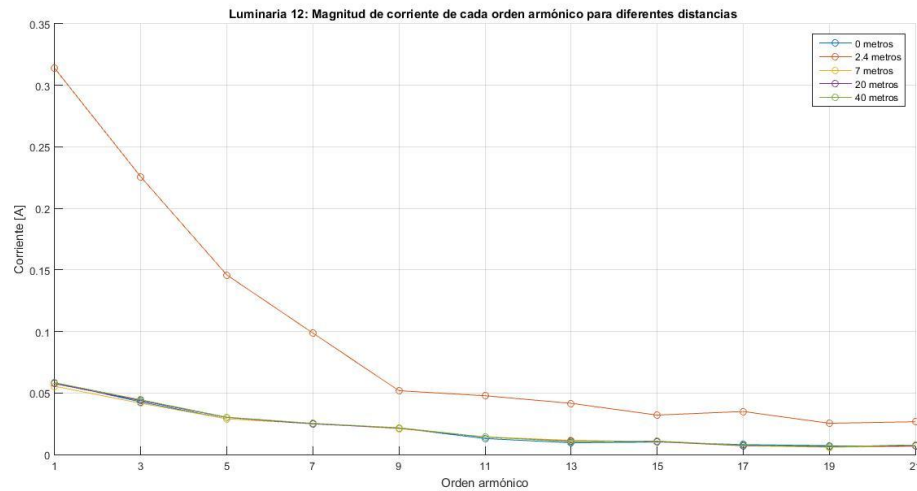


Figura 53. Comportamiento de la corriente rms para la luminaria 12 en términos de a frecuencia



Por otra parte también sería importante realizar un pequeño barrido en longitud con un paso más fino sobre la longitud de circuito ramal en busca de una mejor explicación para este comportamiento.

Por otra parte, este fenómeno de posible resonancia no se evidencia al realizar variación en la magnitud de la señal de alimentación, a longitud constante, del punto de acople común, ver Figura 54 a la Figura 55 el valor eficaz de corriente permanece cuasi constante para cada señal de alimentación a distintas variaciones en su magnitud, de manera que el fenómeno presentado en el análisis anterior pudiera depender directamente de la impedancia del circuito ramal.

Figura 56. Comportamiento de la corriente rms para la luminaria 9 variando la tensión a longitud de 0 [m] el punto de acople común.

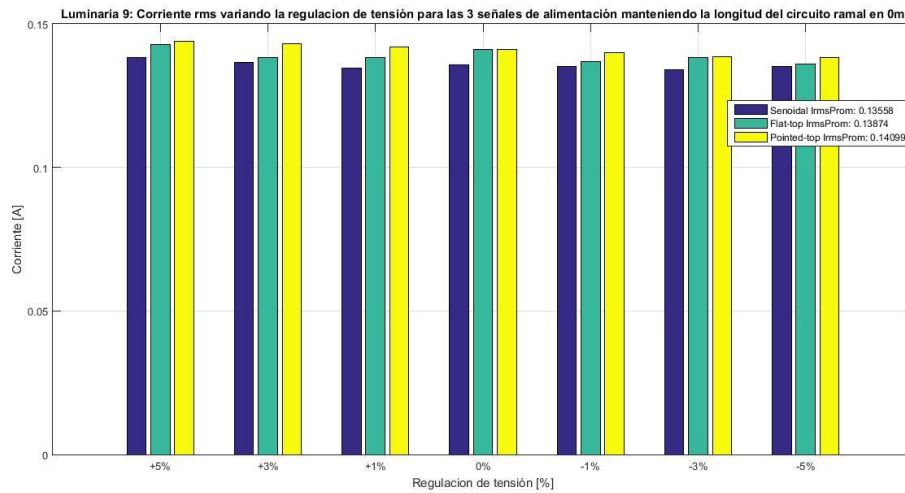


Figura 57. Comportamiento de la corriente rms para la luminaria 12 variando la tensión a longitud de 2,4 [m] el punto de acople común.

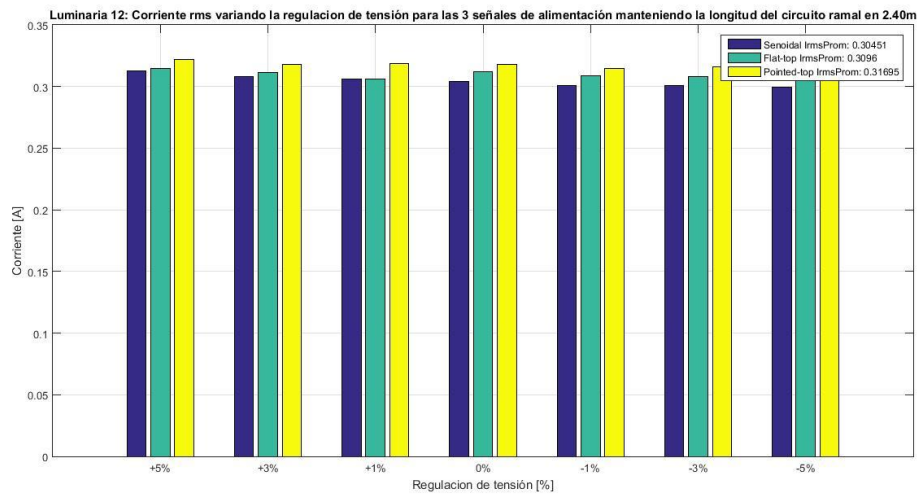


Figura 58. Comportamiento de la corriente rms para la luminaria 15 variando la tensión a longitud de 7 [m] el punto de acople común.

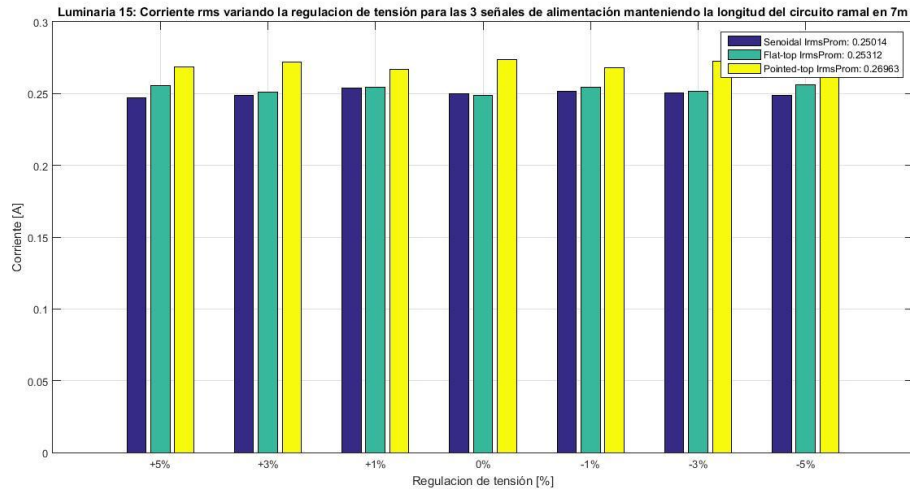


Figura 59. Comportamiento de la corriente rms para la luminaria 14 variando la tensión a longitud de 20 [m] el punto de acople común.

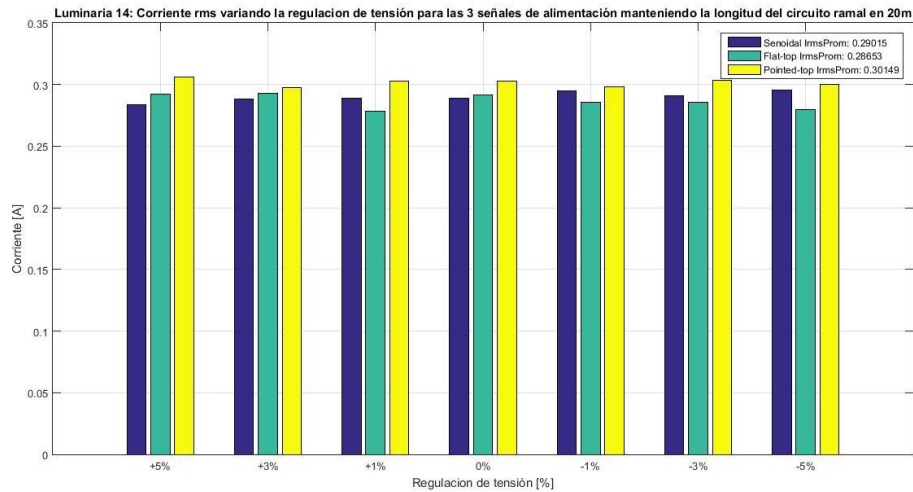
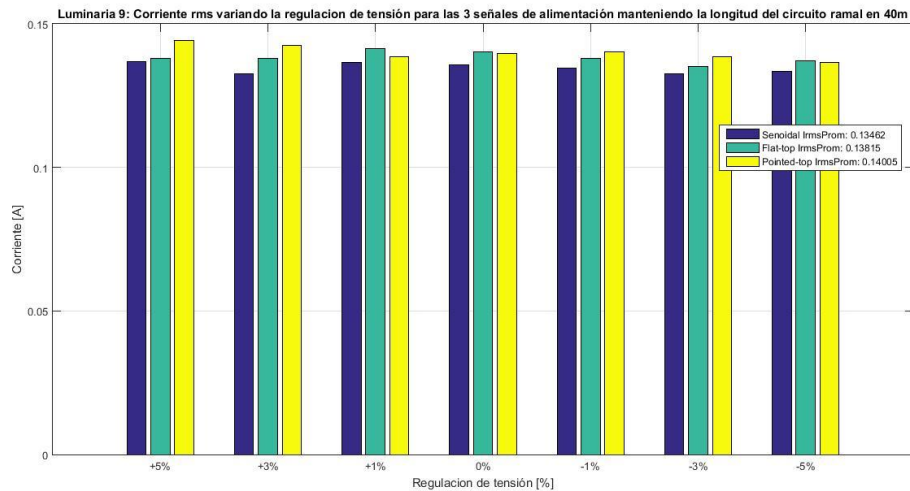


Figura 60. Comportamiento de la corriente rms para la luminaria 9 variando la tensión a longitud de 40 [m] el punto de acople común.



## 6.5. CASO DE ESTUDIO 5: COMPORTAMIENTO DE LA MAGNITUD DE CORRIENTE PARA EL ESPECTRO ARMÓNICO

En este caso de estudio se analiza el comportamiento que tienen los  $a_k$  máximos y mínimos de cada orden armónico de corriente por luminaria, al realizar un barrido en longitud del circuito ramal y variación en la magnitud para las tres señales de alimentación.

En la Figura 61 a la Figura 62 se presenta que para el barrido en longitud del circuito ramal a diferentes variaciones de tensión, la variación de los  $a_k$  de corriente del orden armónico 1 es apreciable cuando se alimenta las luminarias con una señal de tensión Flat-top y Pointed-top en comparación que cuando se alimenta con una señal sinusoidal pura, esta variación puede estar asociada a la distorsión armónica de cada señal de alimentación y la impedancia del circuito ramal. Este comportamiento se presenta para las 15 luminarias analizadas.

Figura 63. Variación max y min de los ak

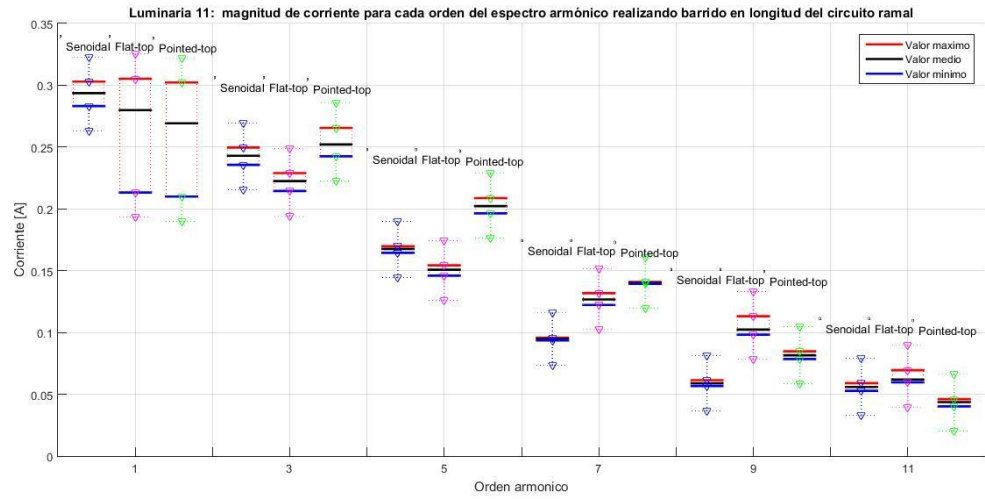


Figura 64. Variación max y min de los ak

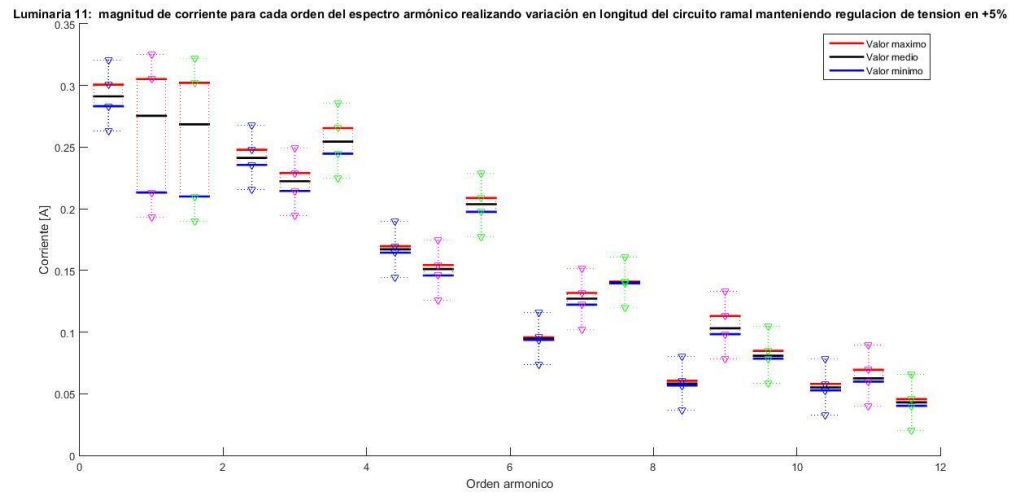


Figura 65. Variación max y min de los ak

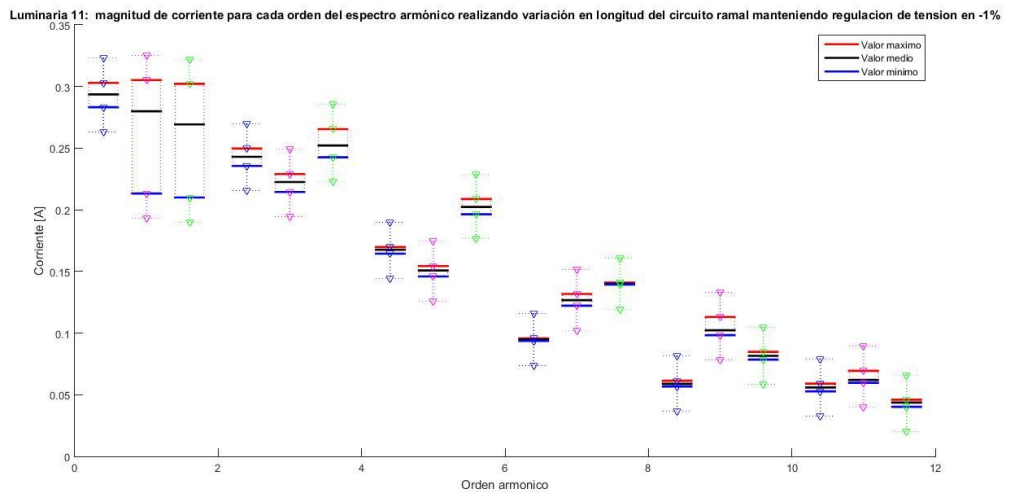


Figura 66. Variación max y min de los ak

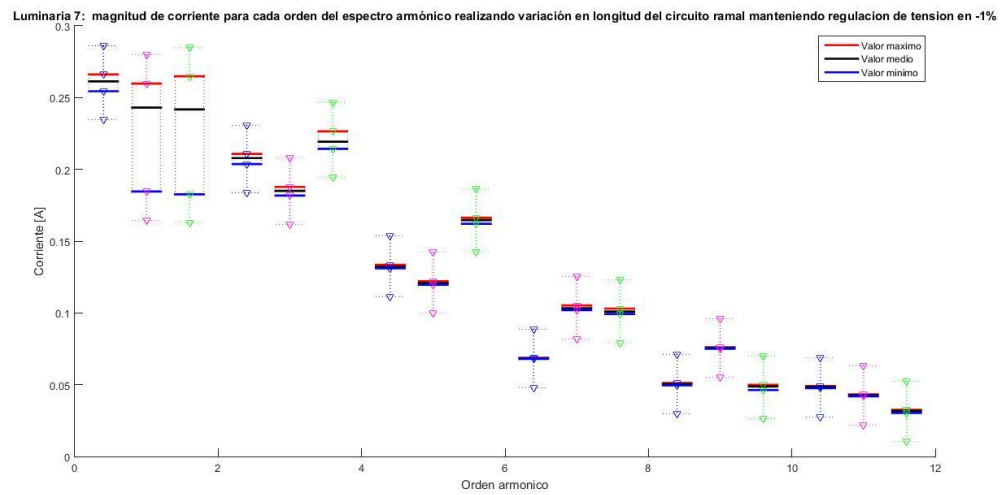


Figura 67. Variación max y min de los ak

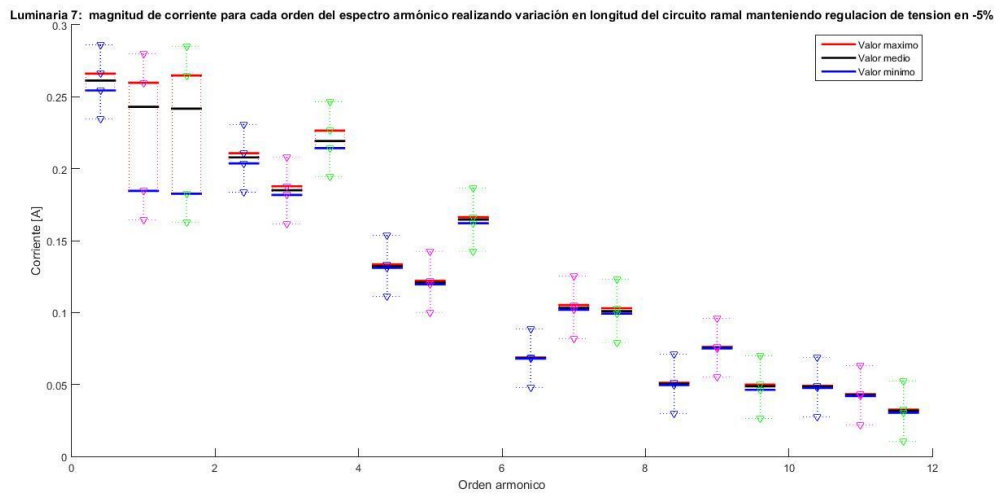


Figura 68. Variación max y min de los ak

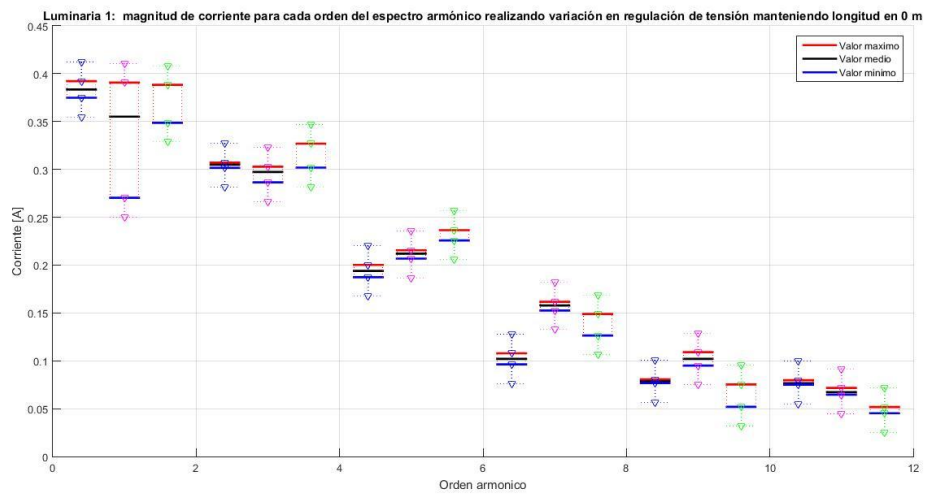


Figura 69. Variación max y min de los  $a_k$

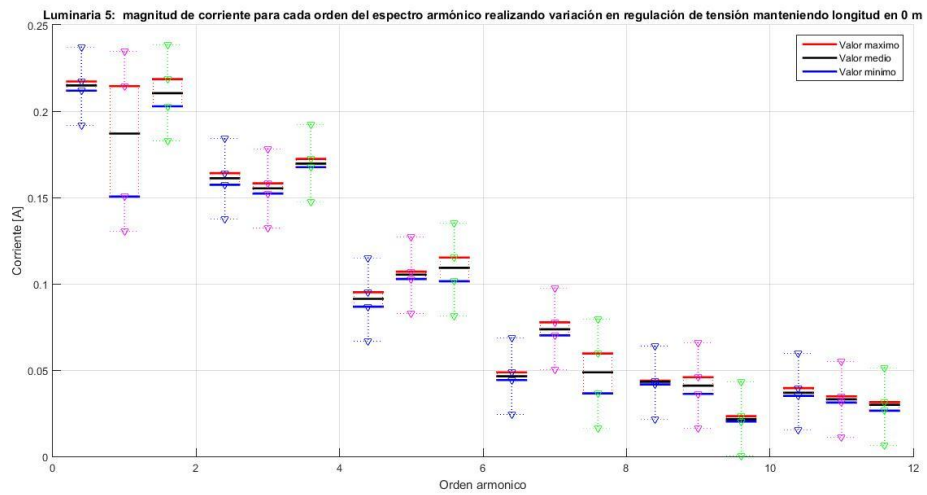
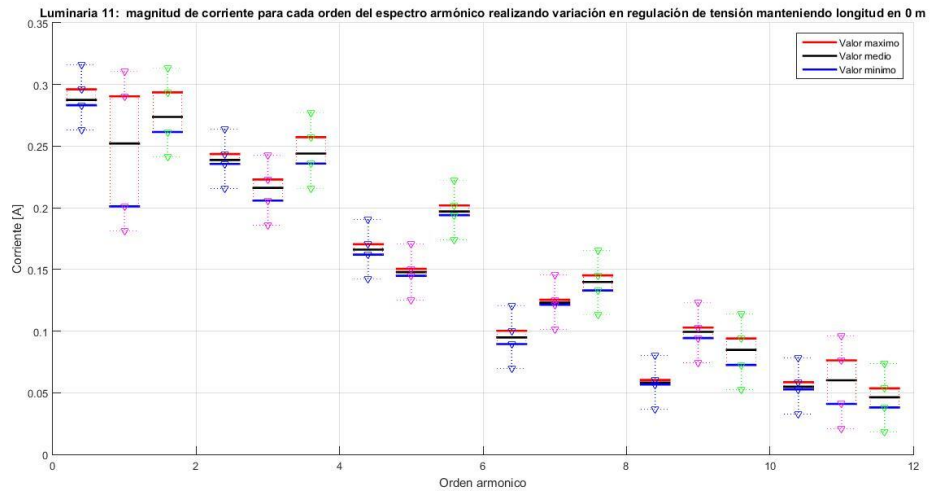


Figura 70. Variación max y min de los  $a_k$



En la Figura 71 a la Figura 72, se presenta que para el barrido en la magnitud de la señal de alimentación y mantenido la distancia del punto de acople común a 0 [m], la variación de los  $a_k$  de corriente del orden armónico 1 es apreciable cuando se alimenta las luminarias con una señal de tensión Flat-top en comparación que

cuando se alimenta con una señal de tensión sinusoidal pura y Pointed-top. Este comportamiento se presenta para las 15 luminarias analizadas.

Este comportamiento mostrado en el CASO DE ESTUDIO 5 sería un tópico para futuras investigaciones debido a que se necesita un estudio más profundo para explicar correctamente el fenómeno presentado.

#### **6.6. CASO DE ESTUDIO 6: COMPORTAMIENTO DEL ESPECTRO ARMÓNICO ANTE VARIACIONES DE LA MAGNITUD DE TENSIÓN Y CIRCUITO RAMAL PARA CADA LUMINARIA**

Este caso de estudio tiene como objetivo determinar el comportamiento del espectro armónico en magnitud y fase de cada luminaria variando la distancia del punto de acople común y manteniendo la variación de tensión constante (0%); además variando la magnitud de tensión con distancia del circuito ramal a 0 [m].

En las Figura 73 y Figura 74, se muestra el comportamiento en magnitud y fase de los primeros 11 armónicos impares, para un barrido en longitud del circuito ramal magnitud de la señal de alimentación de 0%, donde el 1° armónico es el que presenta mayor magnitud y el 11° armónico es el que presenta menor magnitud, es decir el comportamiento en magnitud es descendente a medida que se incrementa el orden armónico, también se observa que la fase y magnitud es casi constante para cada armónico sin importar la distancia con la que se hizo la prueba.

Figura 75. Comportamiento magnitud y fase del espectro armónico

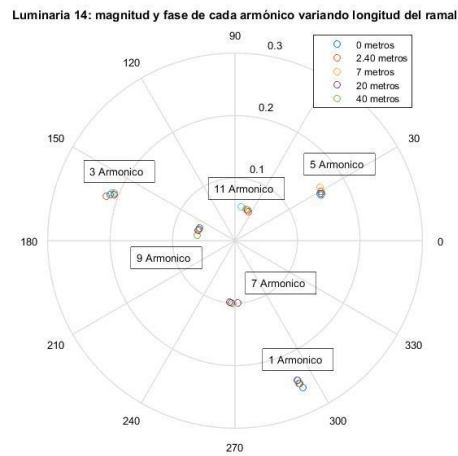
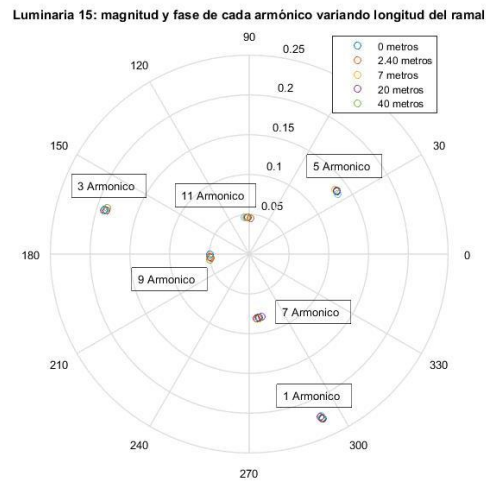


Figura 76. Comportamiento magnitud y fase del espectro armónico



En las Figura 77 y Figura 78 se muestra el comportamiento en magnitud y fase de los primeros 11 armónicos impares, para un barrido en regulación (variación en la

magnitud del circuito ramal) a distancia constante contante de 0 m, donde el 1° armónico es el que presenta mayor magnitud y el 11° armónico es el que presenta menor magnitud, es decir el comportamiento en magnitud es descendente a medida que se incrementa el orden armónico, también se observa que la magnitud es casi constante para cada armónico sin importar el porcentaje de regulación con la que se hizo la prueba. También se puede observar que la fase varía para el mismo orden armónico alrededor de 20°.

Figura 79. Comportamiento magnitud y fase del espectro armónico

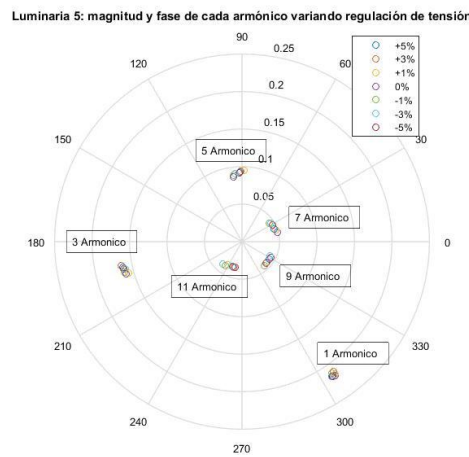
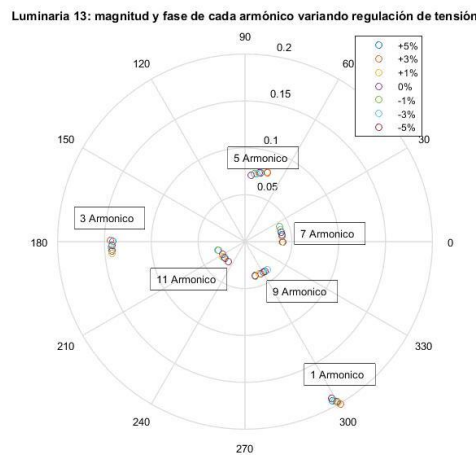


Figura 80. Comportamiento magnitud y fase del espectro armónico



El comportamiento presentado en este caso de estudio sirve como ejemplo para todas las luminarias analizadas.

### 6.7. CASO DE ESTUDIO 7: COMPORTAMIENTO DE LA CORRIENTE DE CARGA $I_{rms}$ A VARIACIONES DE LONGITUD Y MAGNITUD DE LA TENSIÓN DE ALIMENTACIÓN

En este caso de estudio se analiza la variación que presenta la corriente de carga  $I_{rms}$  medida en la carga al variar la longitud del circuito ramal a variación en la magnitud de la tensión constante de 0% y al hacer un barrido en la magnitud de tensión a distancia constante de 0 [m] al punto de acople común. Los resultados presentados en este resultado son en porcentaje, en términos de la base de corriente nominal para cada luminaria.

En las Tabla 10 a Tabla 12, se presenta la corriente  $I_{rms}$  para cada luminaria a distintos niveles en magnitud de la señal de alimentación de tensión sinusoidal y 0 [m] del punto de acople común, también la desviación estándar de las distintas pruebas que presenta la corriente de carga para cada luminaria, donde se puede apreciar que la variación de la magnitud en la señal de alimentación afecta muy mínimo en la corriente de carga ya que dicha variación no es mayor a 3%.

Tabla 10. Variación de  $I_{rms}$  lum 1 a la lum 5

	Tensión	Lum1 [I <sub>rms</sub> %]	Lum2 [I <sub>rms</sub> %]	Lum3 [I <sub>rms</sub> %]	Lum4 [I <sub>rms</sub> %]	Lum5 [I <sub>rms</sub> %]
<b>Senoidal</b>	5	177,09	197,51	137,40	168,40	173,14
	3	176,72	189,51	137,89	168,50	172,57
	1	179,47	190,54	137,73	168,32	171,08
	0	176,80	185,51	134,94	166,57	168,77
	-1	177,62	175,85	137,72	169,52	171,53
	-3	179,38	185,40	137,68	166,66	169,75
	-5	179,09	187,40	139,31	166,78	166,69
<b>Desviaciones</b>		1,25	6,55	1,30	1,15	2,27

Tabla 11. Variación de Irms lum 6 a la lum 10

	<b>Tensión</b>	<b>Lum6 [Irms %]</b>	<b>Lum7 [Irms %]</b>	<b>Lum8 [Irms %]</b>	<b>Lum9 [Irms %]</b>	<b>Lum10 [Irms %]</b>
<b>Senoidal</b>	<b>5</b>	169,43	163,15	167,56	184,32	154,34
	<b>3</b>	169,27	161,73	168,31	182,20	154,75
	<b>1</b>	167,11	162,64	162,65	179,36	150,07
	<b>0</b>	167,65	161,61	166,56	180,98	149,37
	<b>-1</b>	165,64	162,01	163,13	180,03	152,75
	<b>-3</b>	166,01	161,44	166,13	178,50	151,93
	<b>-5</b>	163,73	160,77	158,04	180,04	156,14
<b>Desviaciones</b>	2,04	0,79	3,60	1,96	2,50	

Tabla 12. Variación de Irms lum 11 a la lum 15

	<b>Tensión</b>	<b>Lum11 [Irms %]</b>	<b>Lum12 [Irms %]</b>	<b>Lum13 [Irms %]</b>	<b>Lum14 [Irms %]</b>	<b>Lum15 [Irms %]</b>
<b>Senoidal</b>	<b>5</b>	148,99	155,70	176,00	175,57	167,44
	<b>3</b>	148,54	157,94	172,34	175,45	166,94
	<b>1</b>	147,00	158,88	174,97	176,36	168,22
	<b>0</b>	145,88	157,49	175,79	173,58	165,29
	<b>-1</b>	148,43	153,64	175,86	176,66	168,58
	<b>-3</b>	151,31	155,50	175,20	176,36	168,41
	<b>-5</b>	147,69	150,89	175,52	176,84	167,66
<b>Desviaciones</b>	1,71	2,76	1,27	1,12	1,14	

En las Tabla 13 a Tabla 15 se muestra la sensibilidad de la corriente que se presenta al variar la magnitud de la señal de alimentación y teniendo como referencia el porcentaje de 0 metros.

Tabla 13. Sensibilidad de Irms lum 1 a la lum 5

	Tensión	Lum1 [Irms %]	Lum2 [Irms %]	Lum3 [Irms %]	Lum4 [Irms %]	Lum5 [Irms %]
<b>Senoidal I</b>	5	0,29	12,00	2,47	1,83	4,38
	3	-0,08	4,00	2,96	1,93	3,80
	1	2,68	5,03	2,80	1,76	2,32
	0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	-1	0,83	-9,66	2,78	2,96	2,77
	-3	2,58	-0,11	2,74	0,09	0,98
	-5	2,30	1,89	4,38	0,22	-2,08

Tabla 14. Sensibilidad de Irms lum 6 a la lum 10

	Tensión	Lum6 [Irms %]	Lum7 [Irms %]	Lum8 [Irms %]	Lum9 [Irms %]	Lum10 [Irms %]
<b>Senoidal</b>	5	1,78	1,54	1,01	3,35	4,97
	3	1,62	0,12	1,76	1,22	5,38
	1	-0,54	1,03	-3,91	-1,62	0,70
	0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	-1	-2,01	0,40	-3,43	-0,95	3,38
	-3	-1,64	-0,17	-0,43	-2,48	2,57
	-5	-3,92	-0,84	-8,52	-0,94	6,78

Tabla 15. Sensibilidad de Irms lum 11 a la lum 15

	Tensión	Lum11 [Irms %]	Lum12 [Irms %]	Lum13 [Irms %]	Lum14 [Irms %]	Lum15 [Irms %]
<b>Sinusoidal</b>	5	3,10	-1,79	0,21	1,99	2,15
	3	2,66	0,45	-3,45	1,87	1,66
	1	1,12	1,39	-0,82	2,78	2,94
	0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	-1	2,54	-3,85	0,07	3,08	3,29
	-3	5,43	-1,99	-0,59	2,78	3,12
	-5	1,81	-6,60	-0,27	3,26	2,37

En las Tabla 16 a Tabla 18 se presenta la corriente  $I_{rms}$  para cada luminaria a diferentes distancias del punto de acople común con señal de alimentación de tensión sinusoidal y 0%, también la desviación estándar de las distintas pruebas que presenta la corriente de carga para cada luminaria, donde se puede apreciar que para una distancia de 2,4 [m] del punto de acople común la corriente  $I_{rms}$  se aleja de las demás medidas provocando esta una desviación estándar significativa, este fenómeno puede ser causado por la impedancia del circuito y las componentes internas de cada luminaria.

Tabla 16. Variación de Irms para las lum 1 a la lum 5

Sinusoidal	DISTANCIA [m]	Lum1 [Irms %]	Lum2 [Irms %]	Lum3 [Irms %]	Lum4 [Irms %]	Lum5 [Irms %]
	0	175,83	214,49	145,97	178,52	172,34
	2,4	164,55	247,73	131,04	163,75	151,37
	7	184,22	218,51	146,31	182,34	174,58
	20	182,74	212,55	137,50	171,23	167,29
	40	186,09	210,01	148,85	181,25	175,34
<b>Desviación</b>		8,80	15,45	7,45	7,83	9,91

Tabla 17. Variación de Irms para las lum 6 a la lum 10

Sinusoidal	DISTANCIA [m]	Lum6 [Irms %]	Lum7 [Irms %]	Lum8 [Irms %]	Lum9 [Irms %]	Lum10 [Irms %]
	0	167,39	170,53	166,78	188,26	154,51
	2,4	132,07	151,63	37,15	185,71	141,91
	7	164,93	169,57	165,27	186,20	164,65
	20	165,78	165,74	164,17	186,68	161,43
	40	167,44	173,65	167,99	186,30	164,90
<b>Desviación</b>		15,38	8,63	57,66	0,98	9,66

Tabla 18. Variación de Irms para las lum 11 a la lum 15

Sinusoidal	DISTANCIA [m]	Lum11 [Irms %]	Lum12 [Irms %]	Lum13 [Irms %]	Lum14 [Irms %]	Lum15 [Irms %]
	0	155,73	170,40	177,72	189,26	182,15
	2,4	148,04	762,47	231,85	172,12	163,45
	7	166,92	170,10	180,68	186,05	182,36
	20	160,84	169,53	181,63	181,81	169,72
	40	154,83	169,53	179,42	189,58	181,57
<b>Desviación</b>	7,06	265,01	23,30	7,22	8,75	

En la Tabla 19 a Tabla 21, se presenta la sensibilidad de la corriente que se presenta a ir variando la distancia del punto de acople común teniendo como referencia la distancia 0.

Tabla 19. Sensibilidad de Irms lum 1 a la lum 5

Sinusoidal	DISTANCIA [m]	Lum1 [Irms %]	Lum2 [Irms %]	Lum3 [Irms %]	Lum4 [Irms %]	Lum5 [Irms %]
	0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	2,4	-11,27	33,24	-14,93	-14,77	-20,97
	7	8,39	4,02	0,34	3,82	2,24
	20	6,91	-1,94	-8,48	-7,29	-5,06
	40	10,26	-4,48	2,88	2,73	3,00

Tabla 20. Sensibilidad de Irms lum 6 a la lum 10

DISTANCIA [m]	Lum6 [Irms %]	Lum7 [Irms %]	Lum8 [Irms %]	Lum9 [Irms %]	Lum10 [Irms %]
0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
2,4	-35,32	-18,90	-129,62	-2,55	-12,60
7	-2,46	-0,96	-1,51	-2,06	10,14
20	-1,61	-4,79	-2,61	-1,58	6,92
40	0,05	3,12	1,22	-1,96	10,39

Tabla 21. Sensibilidad de Irms lum 11 a la lum 15

Sinusoidal	DISTANCIA [m]	Lum11 [Irms %]	Lum12 [Irms %]	Lum13 [Irms %]	Lum14 [Irms %]	Lum15 [Irms %]
	0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	2,4	-7,69	592,07	54,13	-17,13	-18,70
	7	11,18	-0,30	2,97	-3,20	0,20
	20	5,11	-0,87	3,91	-7,45	-12,43
	40	-0,91	-0,87	1,70	0,32	-0,58

Para ver los resultados que se presentan con señales de alimentación Flat-top y Pointed-top ir al **ANEXO D**.

### 6.8. CASO DE ESTUDIO 8: ESTUDIO DEL ÍNDICE DE ATENUACIÓN

Este caso de estudio analiza el factor de atenuación  $r_{Att}$  que es la relación de la suma aritmética total en un armónico particular y la distorsión de la tensión de suministro particular, en comparación con el caso ideal sinusoidal.

En la Figura 81 y Figura 82 muestra los resultados de  $r_{att}$  para las luminarias 4 y 11 que sirven de ejemplo ya que el comportamiento para el total de luminarias es similar, se detalla la magnitud  $r_{att}$  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 igual a 1, si el factor es menor a uno nos indica que el  $a_k$  de corriente de la señal distorsionada es más pequeño, y si es mayor a 1 nos indica que el  $a_k$  es mayor para señal distorsionada

Al observar las gráficas anteriores vemos que la THDI es menor para la señal flat-top comparándola con la señal sinusoidal, esto debido a que los  $a_k$  de orden armónico 3 y 5 son menores a 1, provocando que sea favorable alimentar con señal distorsionada de flat-top las luminarias. Caso contrario ocurre cuando se alimenta con señal Pointed-tot debido a que es la señal que más provoca distorsión armónica el factor es mayor a 1 para casi todo el orden armónico, indicando que los  $a_k$  de

corriente son mayores en comparación con los ak de corriente cuando se alimenta con sinusoidal.

Figura 83. Factor de atenuación

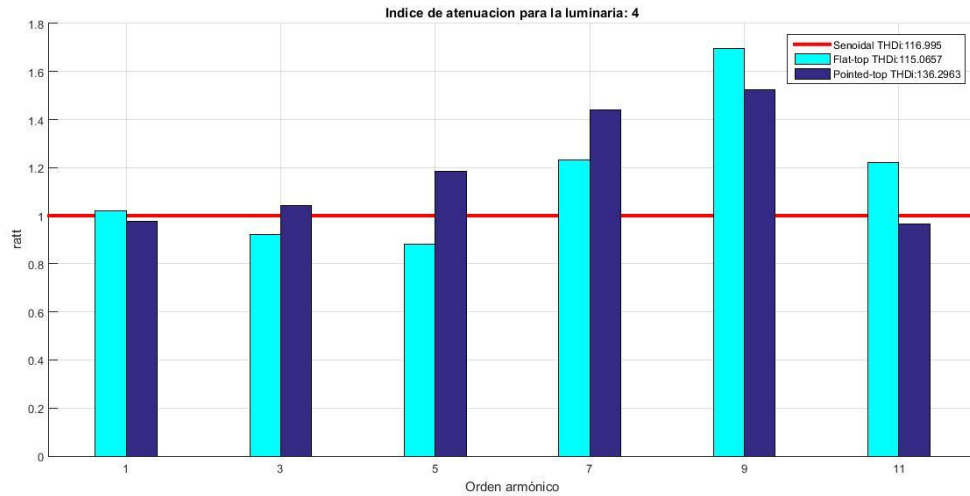
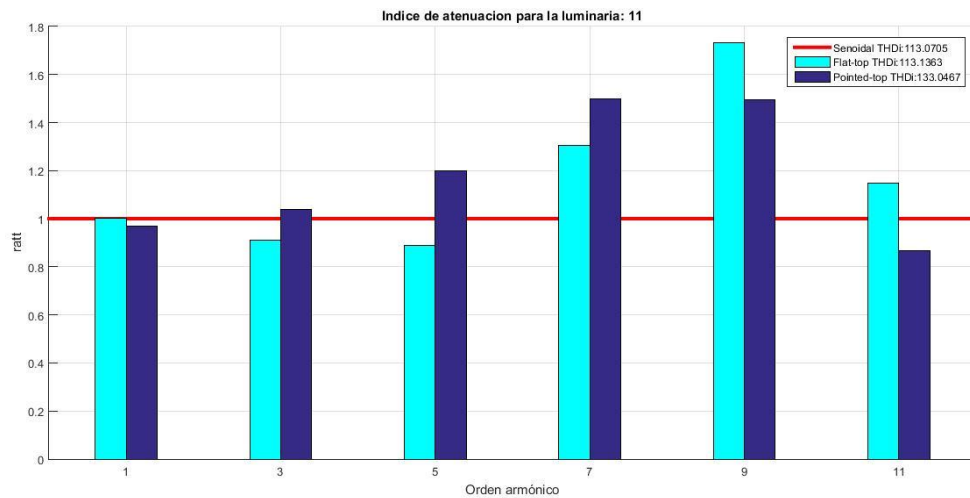


Figura 84. Factor de atenuación

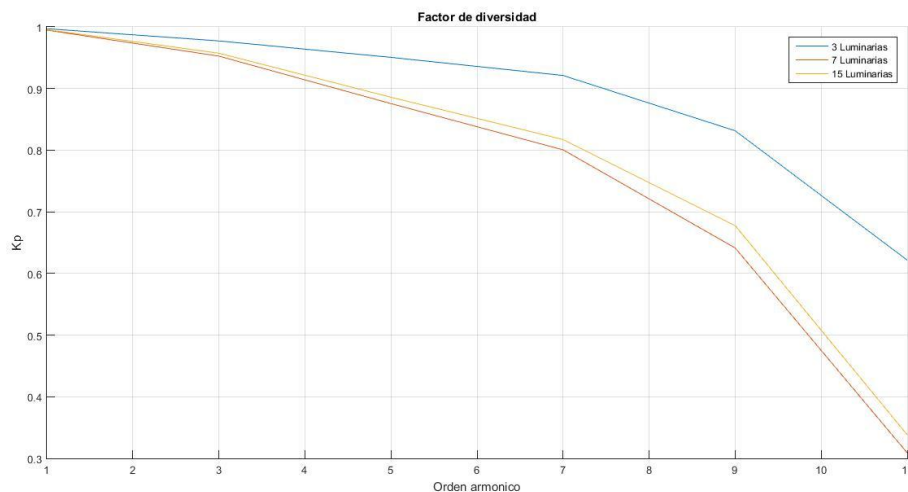


## 6.9 CASO DE ESTUDIO 9: ESTUDIO DEL ÍNDICE DE DIVERSIDAD

Puesto que una gran cantidad de lámparas fluorescentes compactas están conectadas de forma simultánea a las redes de baja tensión, se produce una cancelación debido a la diversidad del ángulo de fase y esto puede tener una gran influencia en la distorsión armónica total. Este efecto se cuantifica por el factor de diversidad  $K_p$  individual para cada armónico.

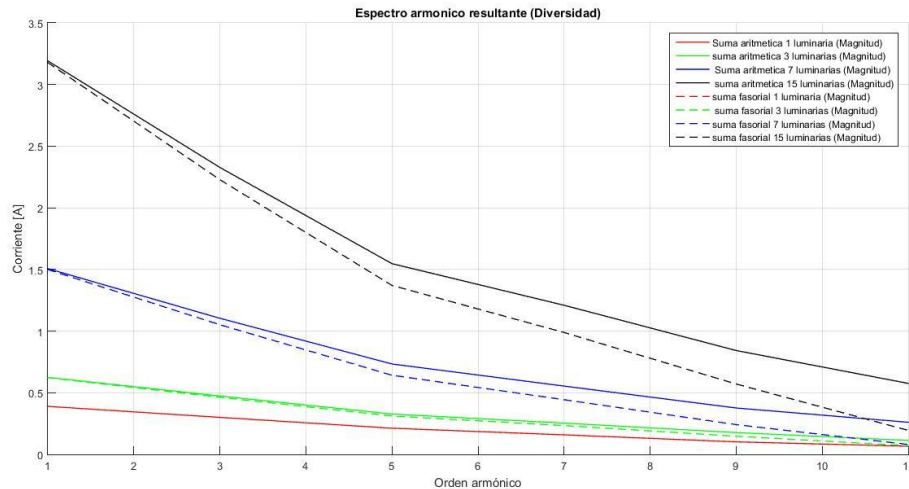
En la Figura 85 se observa el factor de diversidad  $K_p$  hallado para varios grupos de luminarias conectadas al mismo punto de acople común 0 [m], este  $k_p$  oscila entre 0 (cancelación perfecta) y 1 (sin cancelación), en la gráfica se observa que para los tres grupos de luminarias conectadas no hay cancelación para el 1 armónico de corriente, pero a medida que aumenta el orden armónico también aumenta la diversidad en los ángulos, por ejemplo; para el armónico 7 la diversidad del ángulo de fase para los tres grupos de lámparas conectadas al mismo punto, hace que haya cancelación parcial.

Figura 86. Factor de diversidad



En la Figura 87 se muestra el índice Kp para distintos grupos de luminarias conectadas al mismo punto de acople común 0 [m], hallado de dos maneras: teniendo en cuenta solo magnitud y magnitud y fase, se puede ver que entre más luminarias haya en el punto de acople común los ak disminuyen en valor a medida que se aumenta el orden armónico. Entre menos luminarias hayan conectadas en el mismo punto de acople común los resultados para los ak son casi constante debido a la interacción del ángulo de fase es muy mínima.

Figura 88. Comparación factor de diversidad



En las Figura 89 y Figura 90 se observa la dispersión que presentan los ángulos de fase para cada orden armónico en un grupo de 15 luminarias conectadas al mismo punto de acople común, esta diversidad en fase es la causante de la cancelación completa o parcial para los ak de corriente.

Figura 91. Ángulos para cada orden armónico

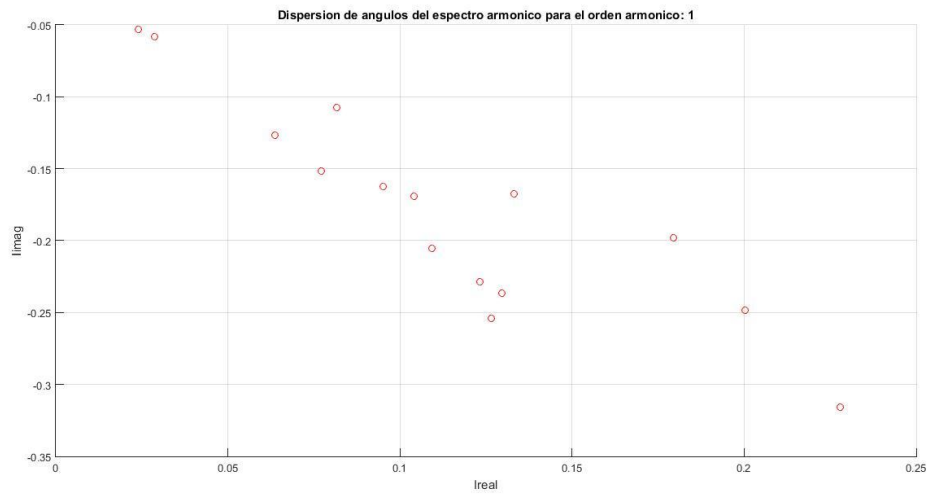
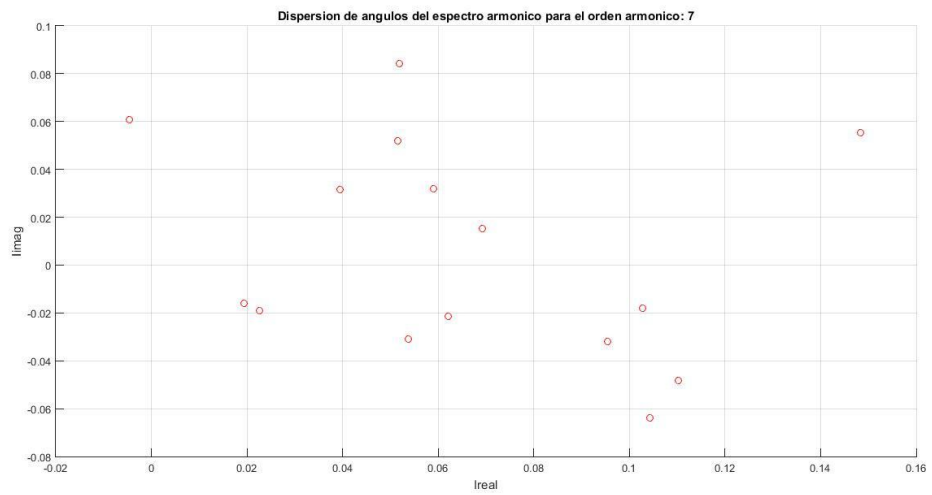


Figura 92. Ángulos para cada orden armónico



## 7. CONCLUSIONES Y CONSIDERACIONES

A continuación se presentan algunas conclusiones, consideraciones y recomendaciones sobre el estudio sensibilidad armónica de cargas de iluminación CFL ante variaciones en la magnitud de la señal de tensión y distancia del circuito ramal (punto de acople en común)

- ✓ Debido a que en Colombia no se encontraron estudios de caracterización de la señal de tensión en las redes de baja tensión, se optó por utilizar señales de tensión características en la red de distribución en Alemania (Pointed-Top, Flat-Top), esto para tener una referencia de la investigación, pero para tener una imagen aproximada de cómo se comporta la señal de tensión en nuestro sitio de trabajo (Laboratorio de Integración Energética) ubicado en el parque tecnológico de Guatiguara, se realizaron medidas en diferentes intervalos de tiempo durante un día, mostrando la variación de la señal de tensión. Con los resultados obtenidos se determinó que la forma de onda es muy similar a la Pointed-Top pero con información armónica diferente, (Ángulos de fase y magnitud para cada componente armónica y THDv).
  
- ✓ Con los resultados obtenidos se determinó que la distorsión armónica para la señal de corriente en la carga cuando se alimenta con señal de tensión seno y al realizar un barrido en distancia del circuito ramal y manteniendo la variación de tensión constante, no se ve afectada debido a que la desviación estándar para las medidas a diferentes distancias para cada luminaria no es mayor al 3%.

- ✓ Se determinó que cuando la carga se alimenta con señal de tensión Pointed-Top o Flat-Top se presenta una desviación estándar bastante significativa para los resultados de distorsión armónica, y esto es debido, a que la distorsión para una distancia de 2,4 [m] del punto de acople común es grande en comparación con los resultados obtenidos en las demás distancias. Se considera que esta distorsión a esa distancia en particular se debe a las características armónicas de las señales de alimentación y a la influencia de la impedancia con las componentes internas de cada luminaria.
  
- ✓ Se pudo comprobar que cuando se realiza la medición a distancia 0[m] y variación en la magnitud de la señal de alimentación 0%, que la corriente pico en la carga es mayor cuando se alimenta con señal de tensión flat-top en comparación con las señal Senoidal y Pointed-Top a pesar que la componente fundamental de la señal de tensión flat-top es menor en comparación con las componentes fundamentales de las otras dos señales, pero este fenómeno solo se cumple cuando se tiene 0[m] y 0%, para los demás barridos no se presenta es comportamiento.
  
- ✓ Se esperaba que La THDI para las luminarias fuera menor al 100%, pero los resultados obtenidos indican que la THDI es mayor del 100 % para la mayoría de las luminarias en estudio. Esta distorsión armónica total es debida a que la magnitud de las componentes armónicas 3, 5 y 7 es bastante significativa en comparación con la magnitud de la componente fundamental.
  
- ✓ La corriente rms por luminaria realizando variación en el circuito ramal y dejando el porcentaje de tensión constante, arrojó que se presenta una corriente elevada o pequeña cuando se hace la prueba a 2,4 [m] del circuito

ramal en comparación con las demás distancias, lo que es sujeto a futuras investigaciones con estudios más específicos.

- ✓ La corriente rms por luminaria realizando variación en la magnitud de la señal de alimentación y dejando distancia constante, arrojó que no se presenta una corriente elevada o pequeña cuando se hace la prueba a 2,4 [m] del circuito ramal en comparación con las demás distancias; resultado que puede estar sujeto a la impedancia del circuito. lo que es sujeto a futuras investigaciones con estudios más específicos.
  
- ✓ El comportamiento del espectro armónico en magnitud y fase ante variación en del circuito ramal y magnitud de la señal de alimentación arrojó que para cada orden armónico sin importar que varié la magnitud es casi constante mientras que el ángulo de fase varía aproximadamente en 25° grados para los armónicos 5, 7, 9 y 11 al realizar variación en la magnitud de la señal de alimentación, a distancia constante.
  
- ✓ Se tiene como una limitante el tiempo; debido que en organizar el experimento que se compone de: configuración de la fuente y del equipo de medida, preparación del circuito ramal, toma de datos, exportación de las medidas a un formato que sea posible estudiarlos (archivos .txt) para fácil tratamiento de las señales y análisis de cada señal, lleva en promedio 15 min, este tiempo para tener en cuenta para futuras investigaciones.

## REFERENCIAS

- [1] A. M. Blanco Castañeda, «Efecto sobre los circuitos de distribución secundarios debido al uso intensivo de bombillas fluorescentes compactas y leds,» p. 138, 2010.
- [2] B. .. J. Richard y Y. A. Nagy, «Evaluación experimental del comportamiento armónico de bombilla LED,» *IEEE*, p. 4, 2013.
- [3] A. T. Llamas, «Efectos de los armónicos en los sistemas eléctricos».
- [4] G. M. Carvajal, «Evaluación y predicción del impacto de armónicos en sistemas de distribución de baja tensión mediante métodos estocásticos,» *Ensayo de candidatura*, 2014.
- [5] IEC 61000-3-2, «Limits – Limits for harmonic current emissions (equipment input current  $\leq 16$  A per phase),» vol. 3.2, 2009.
- [6] «IEEE recommended practice and requirements for harmonic control in electric power systems (Revision of IEEE Std 519-1992),» *IEEE Std 519-2014*, pp. 1-29, June 2014.
- [7] A. Tejada y A. Llamas, «Efectos de los Armónicos en los Sistemas Eléctricos,» *ITESM Campus Monterrey*, pp. 1-8.
- [8] J. Suarez A, G. F. Di Mauro y A. Anaut y C, «Análisis de la distorsión armónica y los efectos de atenuación y diversidad en áreas residenciales,» *IEEE LATIN AMERICA TRANSACTIONS*, vol. 3, nº 5, pp. 1-7, DECEMBER 2005 .
- [9] A. M. Blanco, R. Stiegler y J. Meyer, «Power quality disturbances caused by modern lighting equipment (CFL and LED)».
- [10] G. Malagon Carvajal, J. Bello Peña, G. Ordoñez Plata y C. Duarte, «A Comparison between Circuit and Harmonic Current Source based Models for Compact Fluorescent Lamps,» pp. 1-7, 2015.
- [11] Chroma, «Programmable AC Source 61511/61512 User's Manual,» vol. 1.1, 2009.
- [12] CREG, «Por la cual se establece el Reglamento de Distribución de Energía Eléctrica, como parte del Reglamento de Operación del Sistema Interconectado Nacional,» de *Resolución N°70*, 1998.

- [13] CREG, «Por la cual se modifican las normas de calidad de la potencia eléctrica aplicables a los servicios de Distribución de Energía Eléctrica,» de *Resolucion N°024*, 2005.
- [14] CREG, «Por la cual se modifica parcialmente la Resolución CREG 024 de 2005 que establece las normas de calidad de la potencia eléctrica aplicables a la Distribución de Energía Eléctrica en el Sistema Interconectado Nacional.,» de *Resolucion N°016*, 2007.
- [15] A. D. R. GIL, «Estudio y caracterización de la calidad de suministro eléctrico en los sistemas de alumbrado,» *Memoria de tesis doctoral*, 2012.
- [16] A. B. Nassif y J. Acharya, «An Investigation on the Harmonic Attenuation Effect of Modern Compact Fluorescent Lamps».
- [17] A. M. Blanco, E. Parra y H. Shau, «Comparison between Compact Fluorescent Lamps distributed in Colombia and Germany,» 2011.
- [18] A. M. Blanco, E. Parra y H. Shau, «Comparison between compact fluorescent lamps distributed in Colombia and Germany,» 2011.
- [19] 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 Ingeniería*, vol. 19, nº 1, pp. 76-92, 2011.
- [20] A. Salinas Cala y O. J. Corredor Moreno , «Diseño del Prototipo del Modulo para la Monitorización de las Perturbaciones de Tensión para una unidad Constructiva en el Análisis de los Parámetros de Calidad de Potencia Eléctrica con Base en el Estándar IEC 61000-4-30,» pp. 29-34, 2009.
- [21] Niitsoo, I. Palu, J. Kilter, P. Taklaja y T. Vaimann, «Residential Load Harmonics in Distribution Grid,» *IEEE*, p. 6, 2013.
- [22] 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*, Vols. %1 de %2XI, nº2, p. 10, 2010.
- [23] R. K. Rayudu, R. R. Mariani y M. S. Witherden , «Effect of Multiple Compact Fluorescent Lamp Usage on Residential Power Quality,» *IEEE*, p. 6.

- [24] E. E. Ahmed, W. Xu y G. Zhang, «Analyzing Systems With Distributed Harmonic Sources Including the Attenuation and Diversity Effects,» *IEEE*, vol. 20, nº 4, p. 11.
- [25] A. B. Nassif y J. Acharya, «An Investigation on the Harmonic Attenuation Effect of Modern Compact Fluorescent Lamps,» *IEEE*, p. 6, 2008.
- [26] V. Cuk, J. Cobben, W. Kling y R. Timens, «An Analysis of Diversity Factors applied to,» *IEEE*, p. 6.
- [27] «IEC 61000-3-2,» *Limits– Limits for harmonic current emissions*, Vols. %1 de %23,2, 2009.
- [28] «IEC 61000-4-30,» *Electromagnetic compatibility (EMC) –Part 4-30: Testing and measurement techniques – Power quality measurement*, 2008.

## BIBLIOGRAFIA

A. M. Blanco, E. Parra y H. Shau, «Comparison between Compact Fluorescent Lamps distributed in Colombia and Germany,» 2011.

G. Malagon Carvajal, J. Bello Peña, G. Ordoñez Plata y C. Duarte, «A Comparisson between Circuit and Harmonic Current Source based Models for Compact Fluoresent Lamps,» pp. 1-7, 2015.

A. M. Blanco Castañeda, «Efecto sobre los circuitos de distribucion secundarios debido al uso intensivo de bombillas fluorescentes compactas y leds,» p. 138, 2010.

A. T. Llamas, «Efectos de los armonicos en los sistemas electricos».

IEC 61000-3-2, «Limits – Limits for harmonic current emissions (equipment input current  $\leq 16$  A per phase),» vol. 3.2, 2009.

Chroma, «Programmable AC Source 61511/61512 User's Manual,» vol. 1.1, 2009.

«IEEE recommended practice and requirements for harmonic control in electric power systems (Revision of IEEE Std 519-1992),» *IEEE Std 519-2014*, pp. 1-29, June 2014.

## ANEXOS

### ANEXO A: CONFIGURACIÓN DE LA FUENTE PROGRAMABLE CHROMA

Consideraciones Importantes para manipulación de la Fuente programable Chroma 61511:

- ✓ La fuente puede utilizar frecuencias desde un valor mínimo de 15 Hz y máximo 1500 Hz.
- ✓ La fuente programable Chroma tiene rangos de tensión 150V/300V/Auto en AC, DC y AC+DC.
- ✓ Antes de encender la fuente verificar que la alimentación coincida con la entrada nominal de fuente.
- ✓ Asegurar conectar la tierra “toma” para prevenir descargas eléctricas antes de energizar la fuente.

Configuración de las señales utilizadas:

- ✓ Configuración Señal de Alimentación Seno 120[v] – 60 [Hz]

Figura 93. Panel Frontal



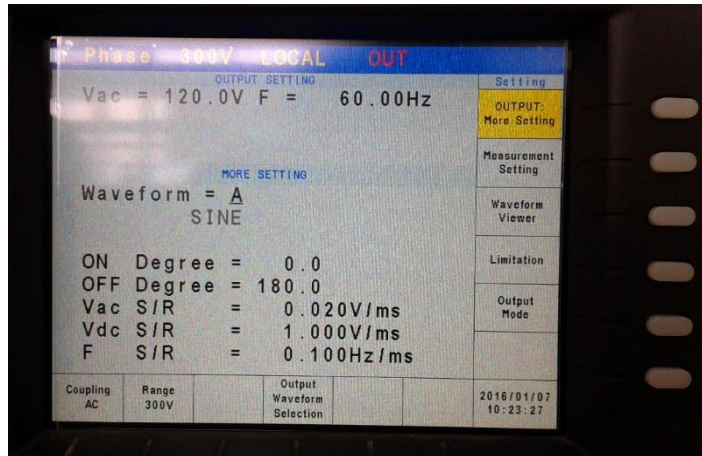
En Figura 94 se tiene el panel frontal de la fuente programable Chroma, en él se detalla: Display, RPG Rotary, cursores de movimiento, y teclado de mando.

Figura 95. Interfaz de Inicio



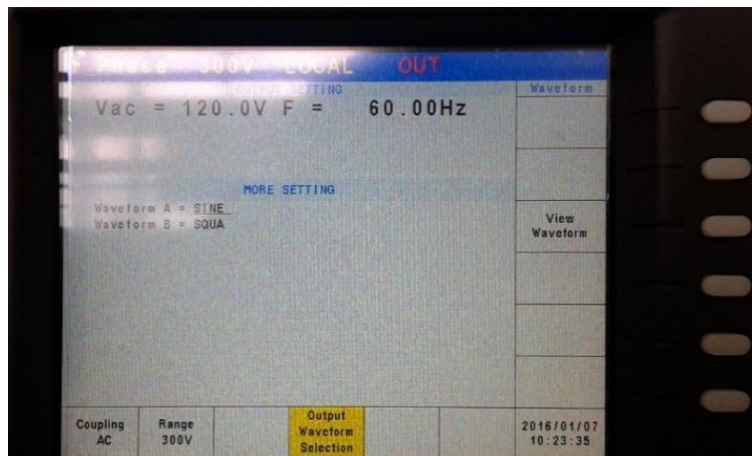
En la Figura 96, observamos la pantalla de inicio que se presenta al momento de encender el equipo, se muestra una columna en la parte derecha de la pantalla y en ella se presenta el menú principal para la configuración de la fuente, (OUTPUT: More Setting, Measurement, Waveform, Limitation, Output Mode), También en la parte inferior de manera horizontal observamos los canales disponibles (CH1, CH3,..., CH10).

Figura 97. OUTPUT: More Setting



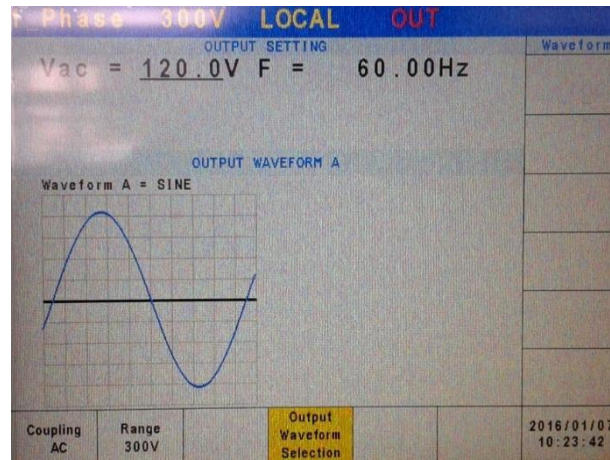
En la Figura 98 se presenta el menú que se despliega al seleccionar la opción OUTPUT More Setting; en esta parte podemos seleccionar el tipo de forma de onda de la señal de salida de la fuente.

Figura 99. Output Waveform Selection



En la Figura 100, Se observa el menú que se despliega al seleccionar la opción Output Waveform Selection, en esta parte podemos seleccionar las distintas señales predeterminadas que trae la fuente y se almacenan en el canal A o B.

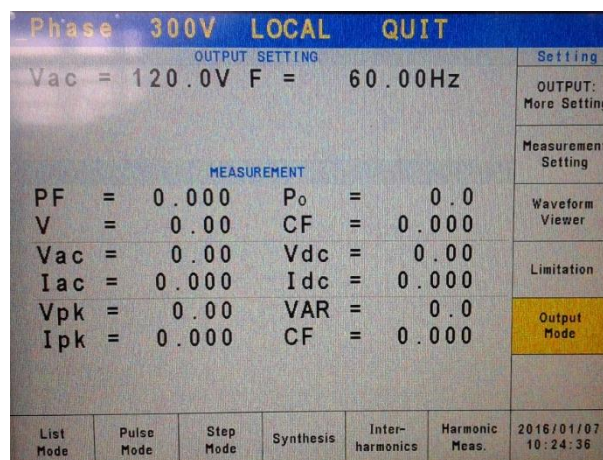
Figura 101. View Waveform



En la Figura 102, Se observa el menú que se despliega al seleccionar la opción View Waveform, donde observamos 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 103. Output Mode



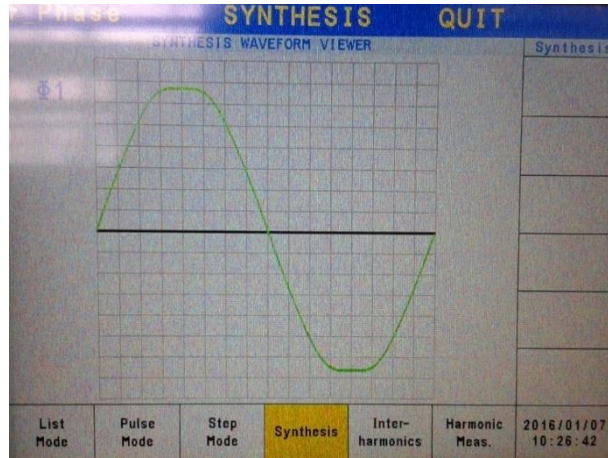
En la Figura 104, Se observa el menú que se despliega al seleccionar la opción Output Mode, esta opción nos despliega en la parte inferior más ajustes que podemos emplear para realizar la configuración de la señal Flat top.

Figura 105. Synthesis Flat Top

SYNTHESIS WAVEFORM FUNDAMENTAL SETTING								
Fundamental = 116.6V			Vdc = 0.0V			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
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

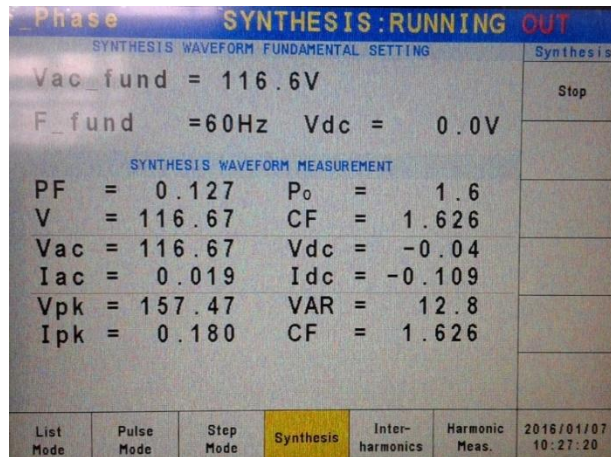
En la Figura 106, Se observa el menú que se despliega al seleccionar la opción Synthesis, donde se configura el valor de la tensión, frecuencia, magnitud y ángulo de los armónicos establecidos para la señal de alimentación (En la Figura mostrada se muestran los valores establecidos para la configuración de la señal Flat Top).

Figura 107. Synthesis Waveform Viewer (Flat Top)



En la Figura 108. Se observa el menú que se despliega al seleccionar la opción View Waveform en la ventana Synthesis, donde observamos la gráfica de la forma de onda predeterminada (En la figura se observa la gráfica de la señal Flat Top).

Figura 109. Synthesis Running (Flat Top)



En la Figura 110, Se observa el menú que se despliega al seleccionar la opción Run en la ventana Synthesis, Al oprimir Run la fuente energiza con la señal de

alimentación configurada; al circuito que se va a alimentar, en el Display podemos monitorear los valores establecidos como también otras variables medidas por la fuente.

✓ Configuración Señal de Alimentación Pointed Top 120[V] – 60 [Hz]

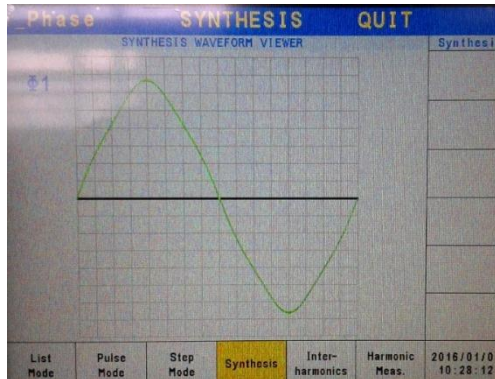
Para realizar la configuración Pointed Top se realiza el mismo procedimiento utilizado para la señal Flat Top. Se diferencia en los valores establecidos para la señal.

Figura 111. Synthesis Pointed Top

SYNTHESIS WAVEFORM			FUNDAMENTAL			SETTING		
Vdc fundamental = 120.0V			Vdc = 0.0V					
F fundamental = 60Hz			Degree = 0.0°					
N	V	φ	N	V	φ	N	V	φ
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
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

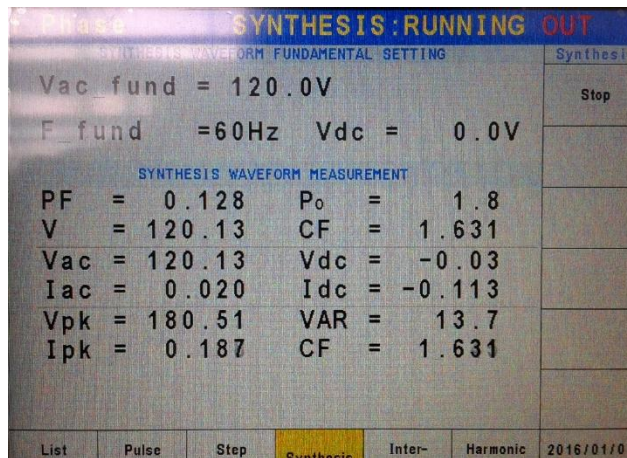
En la Figura 112, se observa el menú que se despliega al seleccionar la opción Synthesis, donde se configura el valor del voltaje, frecuencia, magnitud y ángulo de los armónicos establecidos para la señal de alimentación (En la Figura mostrada se muestran los valores establecidos para la configuración de la señal Pointed Top).

Figura 113. Synthesis Waveform Viewer (Pointed Top)



En la Figura 114, se observa el menú que se despliega al seleccionar la opción View Waveform en la ventana Synthesis, donde observamos la gráfica de la forma de onda predeterminada (En la figura mostrada se observa la gráfica de la señal Pointed Top).

Figura 115. Synthesis Running (Pointed Top)



En la Figura 116, se observa el menú que se despliega al seleccionar la opción Run en la ventana Synthesis, Al oprimir Run la fuente manda la señal de alimentación configurada al circuito que se va a alimentar, en el Display se puede monitorizar los valores establecidos de la señal Pointed Top.

## ANEXO B: CONFIGURACIÓN DEL POWERVISA

Se presentara de forma correcta la configuración del medidor PowerVisa utilizado para realizar las mediciones.

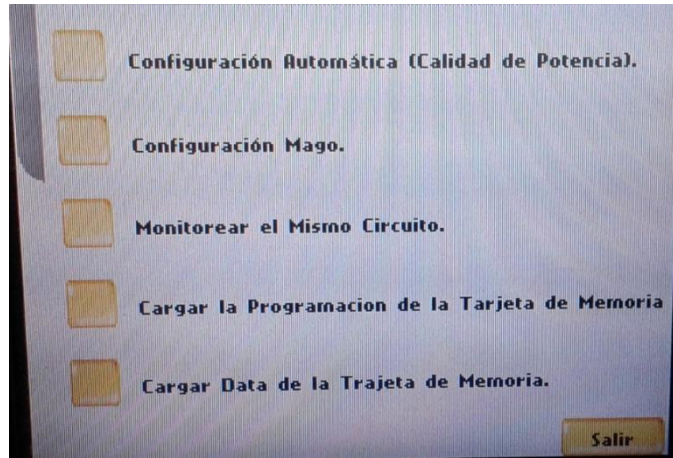
Figura 117. Menú principal



En la Figura 118, se detalla el menú principal que se despliega después de encender el equipo, en él se observan sus funciones principales como lo son: osciloscopio, medidor, armónicos, fasores, historial de medidas, eventos especiales, reporte de las medidas y modo preferencia donde se puede configurar el quipo como la hora, fecha.

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.

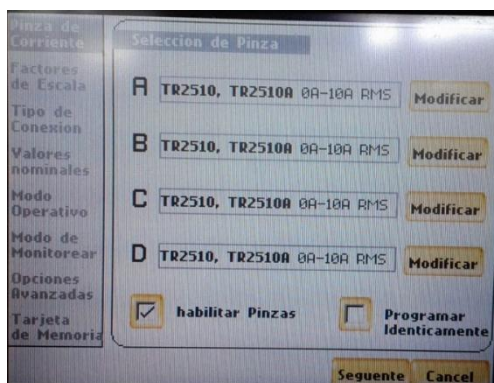
Figura 119. Submenú INICIAR/config



En la Figura 120, observamos el menú que se despliega después de seleccionar en la pantalla la barra INICIAR/config. Aquí tenemos diferentes opciones como configuración mago o avanzada 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.

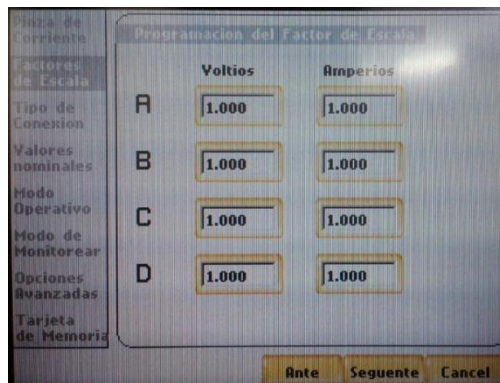
Al oprimir la opción configuración mago se tiene:

Figura 121. Selección de las pinzas de corriente



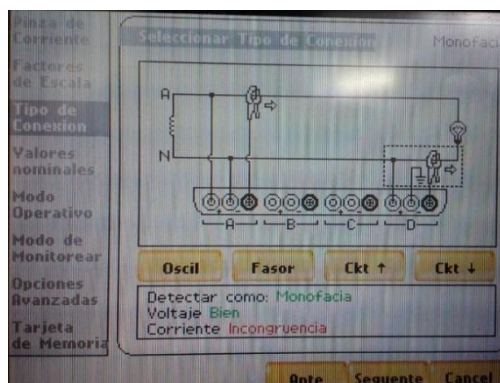
En esta parte se escoge las pinzas de corriente que uno quiera utilizar, en nuestro caso es la TR2500 de 10[A]. Después de haber seleccionado correctamente las pinzas se oprime siguiente que nos desplaza ver Figura 72, Acá se programa factores de escala que es cuando se vayan a utilizar PT o CT en nuestro caso como no se van a utilizar se deja así.

Figura 122. Factores de escala



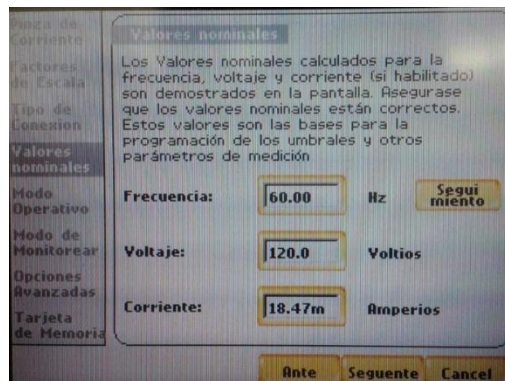
Después de haber seleccionado los factores escala se debe escoger el tipo de conexión al cual se va a conectar el medidor, es muy importante escoger la configuración correcta ya que puede generar daños irreversibles al equipo ver Figura 123.

Figura 124. Tipo de conexión



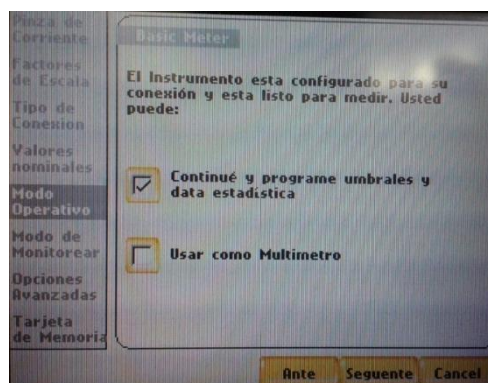
Para cambiar el tipo de circuito, se oprime la función Ckt, después de escoger el tipo de configuración ya sea monofásico, trifásico etc, se oprime siguiente.

Figura 125. Valores Nominales



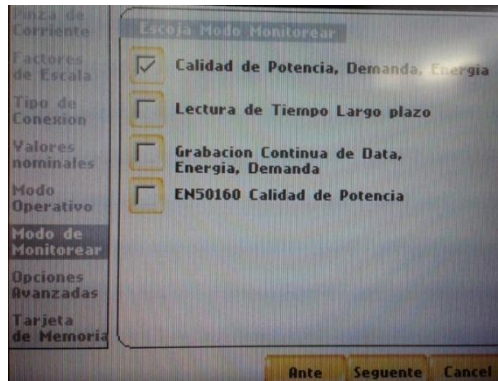
En la Figura 126 se establecen los valores nominales de frecuencia, voltaje y corriente, es importante tener claro la frecuencia nominal para que la medición sea correcta, en cambio la tensión y la corriente, el equipo las configura al momento de la medida de forma automática.

Figura 127. Modo Operativo



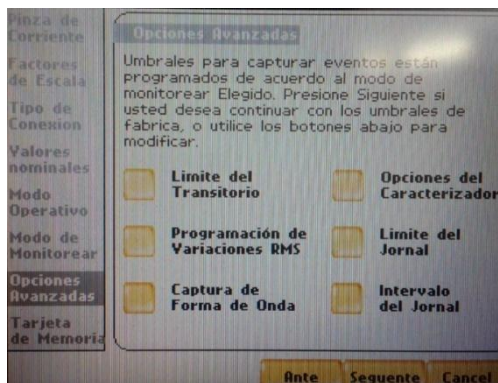
En la Figura 128, se observa el modo operativo, donde se puede seleccionar que el equipo trabaje como multímetro o seguir con la configuración avanzada

Figura 129. Modo Monitorizar



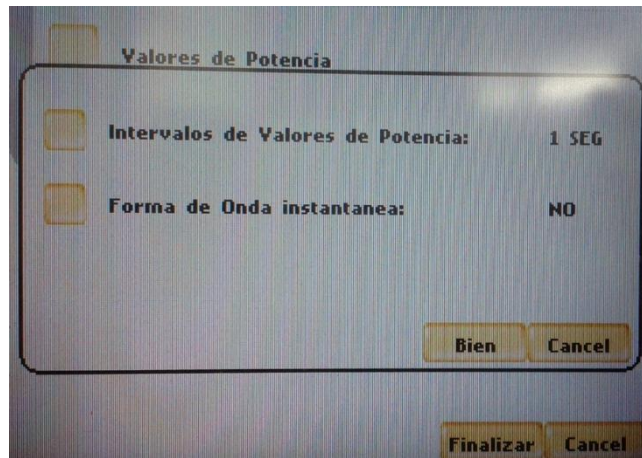
En esta opción modo monitorear, se puede seleccionar cualquier ítem, esto depende del tipo de datos que se quieran medir. En calidad de potencia, demanda y energía es donde se puede almacenar continuamente la forma de onda, en nuestro caso se utilizo está opción ver Figura 130.

Figura 131. Opciones Avanzadas



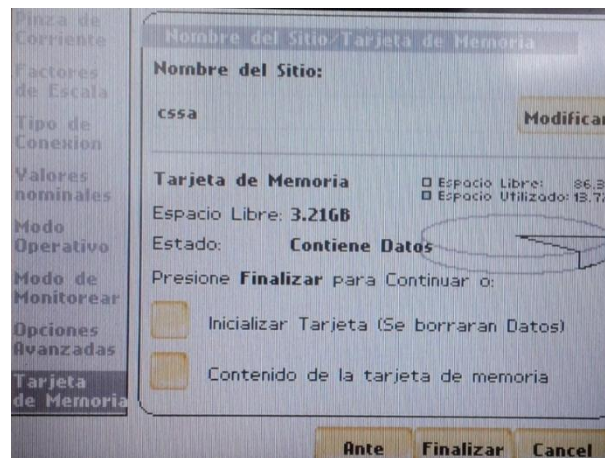
En la Figura 132 se observa el menú de opciones avanzadas en el que podemos establecer el límite de transitorios, variaciones de la señal, captura de forma de onda, al seleccionar intervalo del jornal o trabajo tenemos:

Figura 133. Intervalo del Jornal



En la Figura 134 tenemos valores de potencia, en esta opción el tiempo de censado debe ser de 1 segundo para tener un control más preciso de la onda.

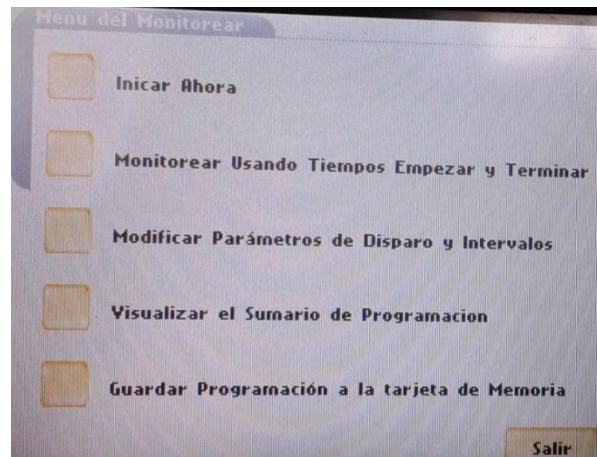
Figura 135. Tarjeta de memoria



En Figura 136 es el menú de la tarjeta de memoria es donde podemos modificar el nombre que queremos que le ponga a los datos que se estén analizando, en la

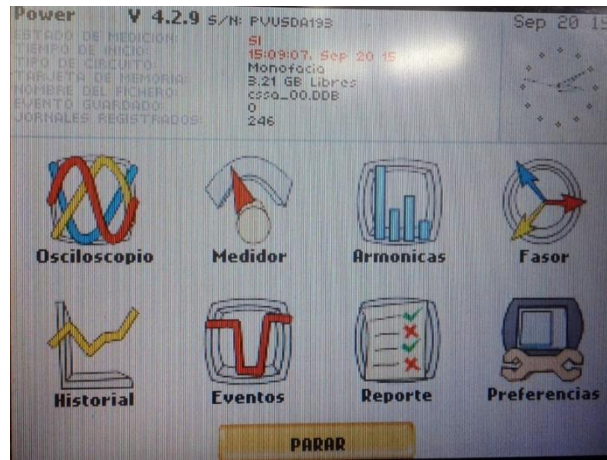
opción iniciar tarjeta se inicializa es decir borra todo lo que tenga almacenado, damos finalizar y con esto se termina la configuración del equipo.

Figura 137. Monitorear el mismo circuito



En la Figura 138 se observa el menú que se despliega después de seleccionar la opción monitorear el mismo circuito que se encuentra en el mismo menú de configuración mago o avanzadas, esto nos permite empezar almacenar datos de la medida al seleccionar en el menú **Iniciar Ahora**.

Figura 139. Toma de datos en curso



Después de iniciar el almacenamiento de datos, se despliega Figura 140, que nos indica que el equipo en realidad está midiendo, para detener la medida se selecciona la opción parar.

## **ANEXO C: PROCEDIMIENTO PARA GUARDAR UNA PRUEBA EN LA HERRAMIENTA DRAN-VIEW**

Para almacenar los datos medidos es de vital importancia conocer la herramienta con la cual trabaja el equipo de medida Dranetz, esto para una buena manipulación y análisis de las pruebas, es por esto que se dará una serie de pasos de cómo se llevó a cabo el almacenamiento de la muestra de una prueba realizada.

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

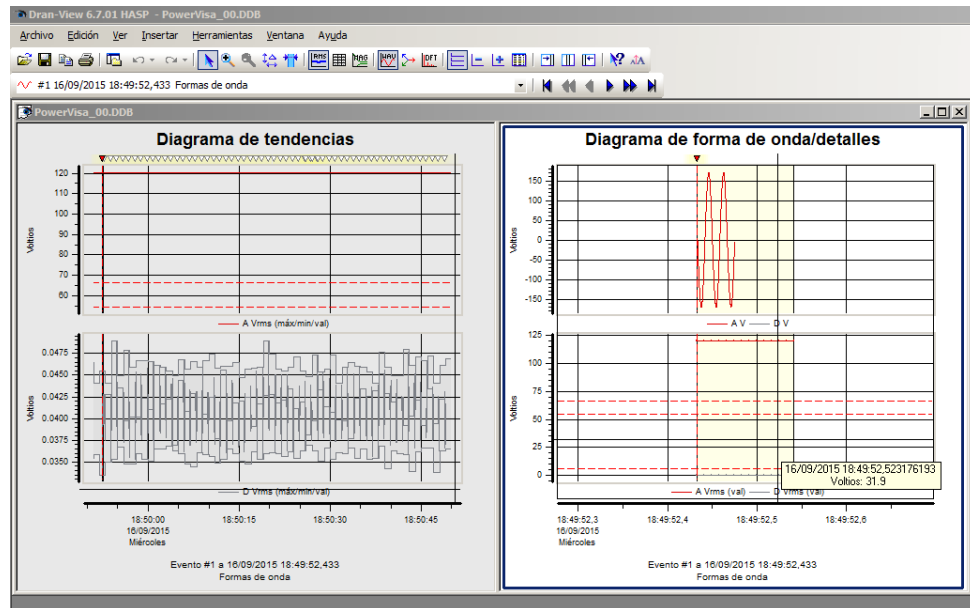
Figura 141. Tarjeta HASP del Dranetz



**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

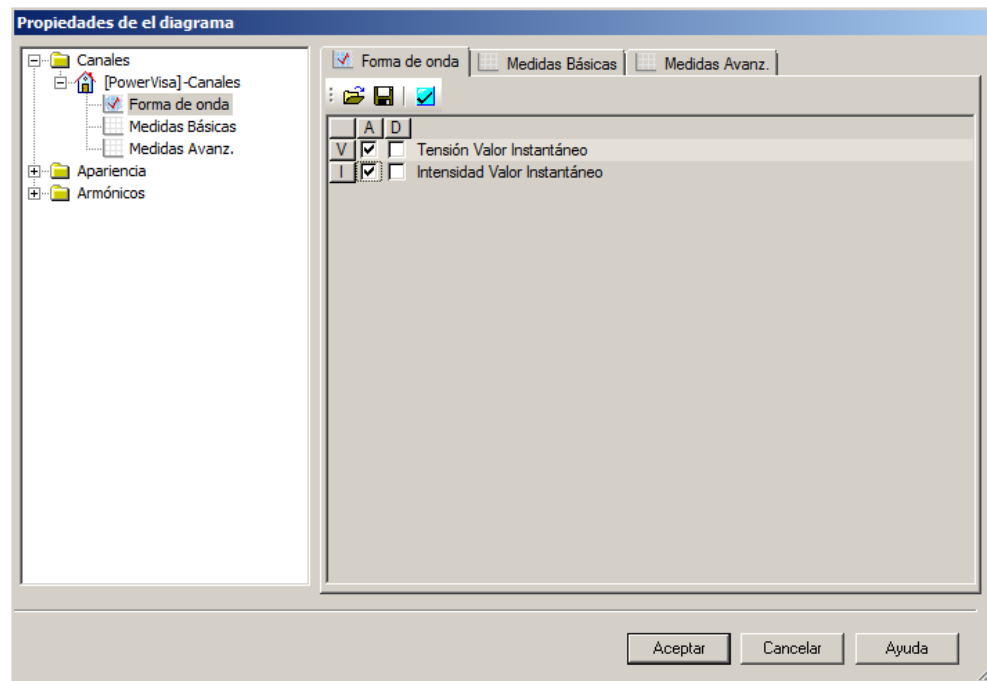
Figura 142. Pantalla de inicio Dran-View.



En la Figura 143, 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 en la opción propiedades del diagrama, a seleccionar los parámetros de medida que se desean observar y analizar.

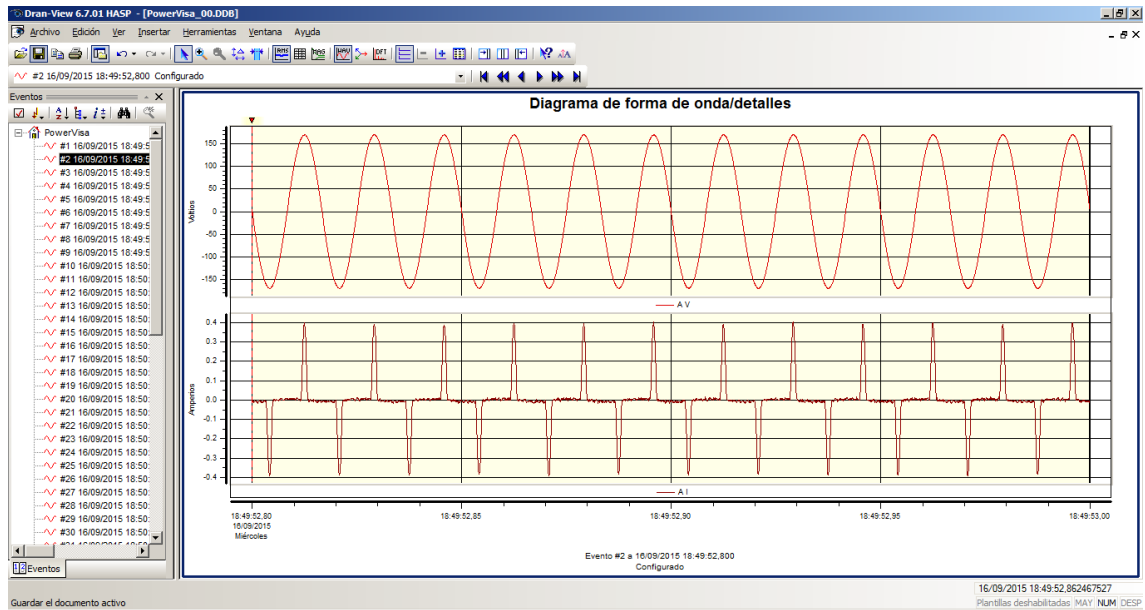
Figura 144. Propiedades del Programa



En la Figura 145, se detalla el menú que se despliega al seleccionar la pestaña forma de onda, con las variables que se desean observar (tensión instantánea o intensidad instantáneo).

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

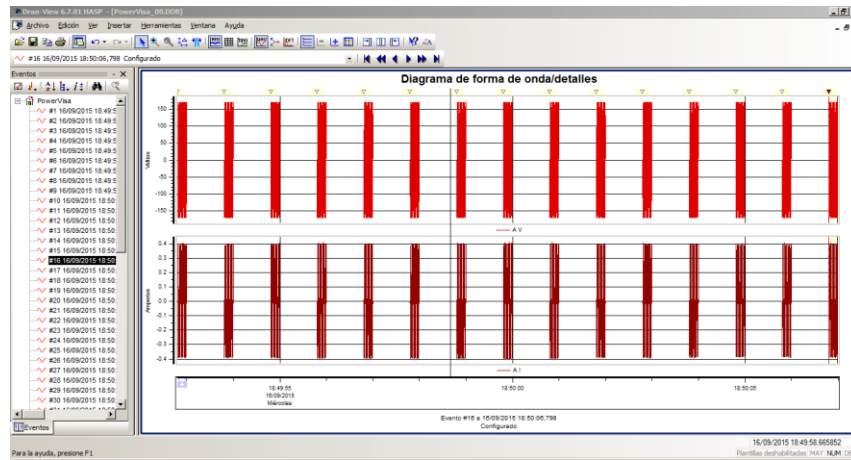
Figura 146. Ventana de 12 ciclos con formas de onda de tensión y corriente



En la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**, se observa la forma de onda de la señal de tensión y corriente seleccionadas, con todos los eventos almacenados que se despliegan al oprimir la opción Alternar Barra Eventos.

**Paso 5:** Se procede a seleccionar 15 ventanas de 12 ciclos cada una

Figura 147. Grupo de 15 ventanas de observación



En la Figura 148 se observa la agrupación de 15 ventanas de observación de 12 ciclos cada una.

Figura 149. Exportar datos.

En la Figura 150 se observa la selección de los parámetros establecidos que son necesarios para la configuración de exportar los datos de las formas de onda.

Nota: este procedimiento fue hecho para las 1575 pruebas que se realizaron con una duración estimada de 3,5 min por prueba.

**ANEXO D: TABLAS CON LOS RESULTADOS DE LA SENSIBILIDAD DE CORRIENTES PARA LAS SEÑALES FLAT-TOP Y POINTED-TOP.**

Sensibilidad de corriente ha barrido en longitud con señal de alimentación Flat-top, y porcentaje de regulación 0% RV, en las Tabla 22 a Tabla 23 se muestra la variación que tiene la corriente para las diferentes distancias y luminarias, con su respectiva desviación estándar, se puede apreciar que para una distancia de 2,4 [m] del punto de acople común la corriente  $I_{rms}$  se aleja de las demás medidas provocando esta desviación notoria, este fenómeno puede ser causado por la impedancia del circuito y las componentes internas de cada luminaria. Los resultados presentados de las corrientes Irms son en pu.

Tabla 24. Variación de Irms lum 1 a la lum 5

	<b>DISTANCIA [m]</b>	<b>Lum1 [Irms%]</b>	<b>Lum2 [Irms%]</b>	<b>Lum3 [Irms%]</b>	<b>Lum4 [Irms%]</b>	<b>Lum5 [Irms%]</b>
<b>Flat-top</b>	<b>0</b>	186,56	180,63	138,36	168,52	175,08
	<b>2,4</b>	164,37	222,39	116,03	149,85	154,18
	<b>7</b>	178,40	180,85	131,40	166,35	172,46
	<b>20</b>	185,06	182,59	135,49	168,42	174,20
	<b>40</b>	186,40	187,50	135,31	168,32	173,47
<b>Desviación</b>		9,44	17,88	8,90	8,12	8,83

Tabla 25. Variación de Irms lum 6 a la lum 10

	<b>DISTANCIA [m]</b>	<b>Lum6 [Irms%]</b>	<b>Lum7 [Irms%]</b>	<b>Lum8 [Irms%]</b>	<b>Lum9 [Irms%]</b>	<b>Lum10 [Irms%]</b>
<b>Flat-top</b>	<b>0</b>	167,17	161,31	165,57	188,12	150,34
	<b>2,4</b>	126,61	140,53	32,44	182,95	134,68
	<b>7</b>	166,08	158,61	162,16	182,95	156,16
	<b>20</b>	166,82	157,99	166,08	184,37	157,39
	<b>40</b>	168,00	159,30	166,00	186,85	157,64
<b>Desviación</b>		18,08	8,49	59,28	2,34	9,72

Tabla 26. Variación de Irms lum 11 a la lum 15

	<b>DISTANCIA [m]</b>	<b>Lum11 [Irms%]</b>	<b>Lum12 [Irms%]</b>	<b>Lum13 [Irms%]</b>	<b>Lum14 [Irms%]</b>	<b>Lum15 [Irms%]</b>
<b>Flat-top</b>	<b>0</b>	146,46	150,79	177,23	179,82	169,05
	<b>2,4</b>	139,21	749,36	229,48	158,36	149,49
	<b>7</b>	155,26	146,93	171,84	171,60	165,84
	<b>20</b>	152,74	151,72	174,77	174,86	169,50
	<b>40</b>	151,61	154,07	176,29	170,58	167,44
<b>Desviación</b>	6,37	267,66	24,44	7,95	8,39	

En las Tabla 27 a Tabla 28 se muestra la sensibilidad que presenta la corriente de carga al variar la longitud del circuito ramal para cada luminaria teniendo como referencia 0 [m].

Tabla 29. Sensibilidad de Irms lum 1 a la lum 5

	<b>DISTANCIA [m]</b>	<b>Lum1 [Irms%]</b>	<b>Lum2 [Irms%]</b>	<b>Lum3 [Irms%]</b>	<b>Lum4 [Irms%]</b>	<b>Lum5 [Irms%]</b>
<b>Flat-top</b>	<b>0</b>	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	<b>2,4</b>	-22,19	41,76	-22,33	-18,67	-20,90
	<b>7</b>	-8,17	0,22	-6,95	-2,18	-2,62
	<b>20</b>	-1,50	1,96	-2,87	-0,10	-0,88
	<b>40</b>	-0,16	6,87	-3,05	-0,20	-1,61

Tabla 30. Sensibilidad de Irms lum 6 a la lum 10

	<b>DISTANCIA [m]</b>	<b>Lum6 [Irms%]</b>	<b>Lum7 [Irms%]</b>	<b>Lum8 [Irms%]</b>	<b>Lum9 [Irms%]</b>	<b>Lum10 [Irms%]</b>
<b>Flat-top</b>	<b>0</b>	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	<b>2,4</b>	-40,56	-20,79	-133,13	-5,17	-15,65
	<b>7</b>	-1,08	-2,71	-3,42	-5,17	5,83
	<b>20</b>	-0,35	-3,32	0,51	-3,75	7,05
	<b>40</b>	0,83	-2,02	0,43	-1,27	7,30

Tabla 31. Sensibilidad de Irms lum 11 a la lum 15

	<b>DISTANCIA [m]</b>	<b>Lum11 [Irms%]</b>	<b>Lum12 [Irms%]</b>	<b>Lum13 [Irms%]</b>	<b>Lum14 [Irms%]</b>	<b>Lum15 [Irms%]</b>
<b>Flat-top</b>	<b>0</b>	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	<b>2,4</b>	-7,25	598,57	52,25	-21,46	-19,57
	<b>7</b>	8,80	-3,86	-5,39	-8,21	-3,22
	<b>20</b>	6,28	0,93	-2,46	-4,95	0,44
	<b>40</b>	5,15	3,28	-0,93	-9,24	-1,62

Sensibilidad de corriente ha barrido en longitud con señal de alimentación Pointed-Top, y porcentaje de regulación 0%, en las Tabla 32 a Tabla 33 se muestra la variación que tiene la corriente para las diferentes distancias y luminarias, con su respectiva desviación estándar, se puede apreciar que para una distancia de 2,4 [m] del punto de acople común la corriente  $I_{rms}$  se aleja de las demás medidas provocando esta desviación notoria, este fenómeno puede ser causado por la impedancia del circuito y las componentes internas de cada luminaria.

Tabla 34. Variación de Irms para las lum 1 a la lum 5

	<b>DISTANCIA [m]</b>	<b>Lum1 [Irms%]</b>	<b>Lum2 [Irms%]</b>	<b>Lum3 [Irms%]</b>	<b>Lum4 [Irms%]</b>	<b>Lum5 [Irms%]</b>
<b>Pointed-top</b>	<b>0</b>	175,83	214,49	145,97	178,52	172,34
	<b>2,4</b>	164,55	247,73	131,04	163,75	151,37
	<b>7</b>	184,22	218,51	146,31	182,34	174,58
	<b>20</b>	182,74	212,55	137,50	171,23	167,29
	<b>40</b>	186,09	210,01	148,85	181,25	175,34
<b>Desviación</b>		8,80	15,45	7,45	7,83	9,91

Tabla 35. Variación de Irms para las lum 6 a la lum 10

	<b>DISTANCIA [m]</b>	<b>Lum6 [Irms%]</b>	<b>Lum7 [Irms%]</b>	<b>Lum8 [Irms%]</b>	<b>Lum9 [Irms%]</b>	<b>Lum10 [Irms%]</b>
<b>Pointed-top</b>	<b>0</b>	167,39	170,53	166,78	188,26	154,51
	<b>2,4</b>	132,07	151,63	37,15	185,71	141,91
	<b>7</b>	164,93	169,57	165,27	186,20	164,65
	<b>20</b>	165,78	165,74	164,17	186,68	161,43
	<b>40</b>	167,44	173,65	167,99	186,30	164,90
<b>Desviación</b>		15,38	8,63	57,66	0,98	9,66

Tabla 36. Variación de Irms para las lum 11 a la lum 15

	<b>DISTANCIA [m]</b>	<b>Lum11 [Irms%]</b>	<b>Lum12 [Irms%]</b>	<b>Lum13 [Irms%]</b>	<b>Lum14 [Irms%]</b>	<b>Lum15 [Irms%]</b>
<b>Pointed-top</b>	<b>0</b>	155,73	170,40	177,72	189,26	182,15
	<b>2,4</b>	148,04	762,47	231,85	172,12	163,45
	<b>7</b>	166,92	170,10	180,68	186,05	182,36
	<b>20</b>	160,84	169,53	181,63	181,81	169,72
	<b>40</b>	154,83	169,53	179,42	189,58	181,57
<b>Desviación</b>		7,06	265,01	23,30	7,22	8,75

En las Tabla 37 a Tabla 38 se muestra la sensibilidad que presenta la corriente de carga al variar la longitud del circuito ramal para cada luminaria teniendo como referencia 0 [m].

Tabla 39. Sensibilidad de Irms lum 1 a la lum 5

	<b>DISTANCIA [m]</b>	<b>Lum1 [Irms%]</b>	<b>Lum2 [Irms%]</b>	<b>Lum3 [Irms%]</b>	<b>Lum4 [Irms%]</b>	<b>Lum5 [Irms%]</b>
<b>Pointed-top</b>	<b>0</b>	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	<b>2,4</b>	-11,27	33,24	-14,93	-14,77	-20,97
	<b>7</b>	8,39	4,02	0,34	3,82	2,24
	<b>20</b>	6,91	-1,94	-8,48	-7,29	-5,06
	<b>40</b>	10,26	-4,48	2,88	2,73	3,00

Tabla 40. Sensibilidad de Irms lum 6 a la lum 10

	<b>DISTANCIA [m]</b>	<b>Lum6 [Irms%]</b>	<b>Lum7 [Irms%]</b>	<b>Lum8 [Irms%]</b>	<b>Lum9 [Irms%]</b>	<b>Lum10 [Irms%]</b>
<b>Pointed-top</b>	<b>0</b>	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	<b>2,4</b>	-35,32	-18,90	-129,62	-2,55	-12,60
	<b>7</b>	-2,46	-0,96	-1,51	-2,06	10,14
	<b>20</b>	-1,61	-4,79	-2,61	-1,58	6,92
	<b>40</b>	0,05	3,12	1,22	-1,96	10,39

Tabla 41. Sensibilidad de Irms lum 11 a la lum 15

	<b>DISTANCIA [m]</b>	<b>Lum11 [Irms%]</b>	<b>Lum12 [Irms%]</b>	<b>Lum13 [Irms%]</b>	<b>Lum14 [Irms%]</b>	<b>Lum15 [Irms%]</b>
<b>Pointed-top</b>	<b>0</b>	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	<b>2,4</b>	-7,69	592,07	54,13	-17,13	-18,70
	<b>7</b>	11,18	-0,30	2,97	-3,20	0,20
	<b>20</b>	5,11	-0,87	3,91	-7,45	-12,43
	<b>40</b>	-0,91	-0,87	1,70	0,32	-0,58

Sensibilidad de corriente ha barrido en tensión con señal de alimentación Flat-top, y distancia a 0 [m] del punto de acople común, en las Tabla 42 a Tabla 43 se muestra la variación que tiene la corriente para las distintas regulaciones y luminarias, con su respectiva desviación estándar. En la Tabla 37 y Tabla 38 muestra la sensibilidad que presenta la corriente de carga al variar el porcentaje de regulación para cada luminaria teniendo como referencia 0%.

Tabla 44. Variación de Irms para las lum 1 a la lum 5

	<b>Tensión</b>	<b>Lum1 [Irms%]</b>	<b>Lum2 [Irms%]</b>	<b>Lum3 [Irms%]</b>	<b>Lum4 [Irms%]</b>	<b>Lum5 [Irms%]</b>
<b>Flat-top</b>	<b>5</b>	186,99	185,33	138,36	166,18	174,87
	<b>3</b>	187,90	180,01	136,93	168,38	175,74
	<b>1</b>	187,35	178,31	137,22	168,60	175,16
	<b>0</b>	186,56	180,63	138,36	168,52	175,08
	<b>-1</b>	185,57	176,90	117,67	148,24	150,29
	<b>-3</b>	162,26	196,52	185,51	148,33	149,84
	<b>-5</b>	159,30	174,81	116,90	147,20	149,00
<b>Desviaciones</b>		12,78	7,29	22,78	10,73	13,64

Tabla 45. Variación de Irms para las lum 6 a la lum 10

	<b>Tensión</b>	<b>Lum6 [Irms%]</b>	<b>Lum7 [Irms%]</b>	<b>Lum8 [Irms%]</b>	<b>Lum9 [Irms%]</b>	<b>Lum10 [Irms%]</b>
<b>Flat-top</b>	<b>5</b>	170,63	161,10	170,64	190,36	150,62
	<b>3</b>	166,94	160,87	164,56	184,29	151,47
	<b>1</b>	170,49	161,62	167,12	184,20	151,03
	<b>0</b>	167,17	161,31	165,57	188,12	150,34
	<b>-1</b>	165,28	138,21	166,74	182,29	128,23
	<b>-3</b>	163,86	88,43	163,02	184,37	127,25
	<b>-5</b>	165,39	138,76	163,18	181,25	128,29
<b>Desviaciones</b>		2,61	26,88	2,65	3,20	12,27

Tabla 46. Variación de Irms para las lum 11 a la lum 15

	<b>Tensión</b>	<b>Lum11 [Irms%]</b>	<b>Lum12 [Irms%]</b>	<b>Lum13 [Irms%]</b>	<b>Lum14 [Irms%]</b>	<b>Lum15 [Irms%]</b>
<b>Flat-top</b>	<b>5</b>	150,64	152,87	176,14	176,23	169,13
	<b>3</b>	149,67	151,39	174,13	178,33	168,31
	<b>1</b>	148,26	151,03	175,68	179,08	168,96
	<b>0</b>	146,46	150,79	177,23	179,82	169,05
	<b>-1</b>	136,04	146,49	174,41	152,05	147,40
	<b>-3</b>	129,22	147,45	175,33	156,33	149,08
	<b>-5</b>	131,34	146,14	175,48	152,79	148,33
<b>Desviaciones</b>		9,17	2,69	1,04	13,28	11,02

Tabla 47. Sensibilidad de Irms lum 1 a la lum 5

	<b>Tensión</b>	<b>Lum1 [Irms%]</b>	<b>Lum2 [Irms%]</b>	<b>Lum3 [Irms%]</b>	<b>Lum4 [Irms%]</b>	<b>Lum5 [Irms%]</b>
<b>Flat-top</b>	<b>5</b>	0,43	4,70	0,00	-2,34	-0,21
	<b>3</b>	1,33	-0,62	-1,42	-0,14	0,66
	<b>1</b>	0,79	-2,32	-1,14	0,08	0,08
	<b>0</b>	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	<b>-1</b>	-0,99	-3,73	-20,69	-20,29	-24,78
	<b>-3</b>	-24,31	15,89	47,16	-20,19	-25,24
	<b>-5</b>	-27,26	-5,82	-21,46	-21,32	-26,08

Tabla 48. Sensibilidad de Irms lum 6 a la lum 10

	<b>Tensión</b>	<b>Lum6 [Irms%]</b>	<b>Lum7 [Irms%]</b>	<b>Lum8 [Irms%]</b>	<b>Lum9 [Irms%]</b>	<b>Lum10 [Irms%]</b>
<b>Flat-top</b>	<b>5</b>	3,46	-0,22	5,06	2,24	0,28
	<b>3</b>	-0,22	-0,44	-1,02	-3,83	1,13
	<b>1</b>	3,33	0,30	1,55	-3,92	0,70
	<b>0</b>	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	<b>-1</b>	-1,89	-23,10	1,16	-5,83	-22,10
	<b>-3</b>	-3,31	-72,89	-2,56	-3,75	-23,09
	<b>-5</b>	-1,78	-22,56	-2,40	-6,87	-22,05

Tabla 49. Sensibilidad de Irms lum 11 a la lum 15

	<b>Tensión</b>	<b>Lum11 [Irms%]</b>	<b>Lum12 [Irms%]</b>	<b>Lum13 [Irms%]</b>	<b>Lum14 [Irms%]</b>	<b>Lum15 [Irms%]</b>
<b>Flat-top</b>	<b>5</b>	4,18	2,08	-1,09	-3,58	0,08
	<b>3</b>	3,20	0,60	-3,10	-1,49	-0,75
	<b>1</b>	1,80	0,24	-1,55	-0,73	-0,09
	<b>0</b>	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	<b>-1</b>	-10,42	-4,30	-2,82	-27,76	-21,66
	<b>-3</b>	-17,24	-3,34	-1,89	-23,49	-19,97
	<b>-5</b>	-15,12	-4,65	-1,75	-27,03	-20,72

Sensibilidad de corriente ha barrido en tensión con señal de alimentación Pointed-Top, y distancia a 0 mts del punto de acople común, en las Tabla 50 a Tabla 51 se muestra la variación que tiene la corriente para las distintas regulaciones y luminarias, con su respectiva desviación estándar. En las Tabla 52 a Tabla 53 muestran la sensibilidad que presenta la corriente de carga al variar el porcentaje de regulación para cada luminaria teniendo como referencia 0%.

Tabla 54. Variación de Irms para las lum 1 a la lum 5

	Tensión	Lum1 [Irms%]	Lum2 [Irms%]	Lum3 [Irms%]	Lum4 [Irms%]	Lum5 [Irms%]
<b>Pointed-top</b>	5	183,76	219,60	148,31	177,61	170,90
	3	180,02	211,50	147,75	175,06	170,32
	1	185,03	216,33	148,36	178,16	174,70
	0	175,83	214,49	145,97	178,52	172,34
	-1	182,63	212,76	148,83	182,50	170,42
	-3	185,75	204,69	148,11	183,48	172,81
	-5	177,14	202,76	142,34	182,85	172,25
<b>Desviaciones</b>		3,88	6,08	2,29	3,21	1,56

Tabla 55. Variación de Irms para las lum 6 a la lum 10

	Tensión	Lum6 [Irms%]	Lum7 [Irms%]	Lum8 [Irms%]	Lum9 [Irms%]	Lum10 [Irms%]
<b>Pointed-top</b>	5	169,76	172,98	165,91	192,04	154,63
	3	169,12	171,00	167,37	190,64	153,51
	1	165,24	172,19	165,00	189,14	157,24
	0	167,39	170,53	166,78	188,26	154,51
	-1	164,34	171,77	166,00	186,57	156,81
	-3	164,61	171,66	165,62	184,78	161,18
	-5	162,99	171,34	161,41	184,50	163,92
<b>Desviaciones</b>		2,58	0,80	1,94	2,87	3,84

Tabla 56. Variación de Irms para las lum 11 a la lum 15

	Tensión	Lum11 [Irms%]	Lum12 [Irms%]	Lum13 [Irms%]	Lum14 [Irms%]	Lum15 [Irms%]
<b>Pointed-top</b>	5	153,15	176,25	183,52	191,71	179,28
	3	152,49	176,15	178,66	191,59	177,91
	1	159,49	174,45	182,26	190,80	180,40
	0	155,73	170,40	177,72	189,26	182,15
	-1	153,33	169,70	179,16	191,34	178,27
	-3	154,51	171,95	179,04	186,74	178,67
	-5	160,74	170,90	182,33	182,32	174,56
<b>Desviaciones</b>		3,26	2,76	2,26	3,47	2,35

Tabla 57. Sensibilidad de Irms lum 1 a la lum 5

	Tensión	Lum1 [Irms%]	Lum2 [Irms%]	Lum3 [Irms%]	Lum4 [Irms%]	Lum5 [Irms%]
<b>Pointed-top</b>	<b>5</b>	7,93	5,11	2,33	-0,91	-1,45
	<b>3</b>	4,19	-2,99	1,78	-3,46	-2,02
	<b>1</b>	9,20	1,84	2,39	-0,36	2,35
	<b>0</b>	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	<b>-1</b>	6,80	-1,73	2,85	3,98	-1,92
	<b>-3</b>	9,92	-9,80	2,14	4,96	0,46
	<b>-5</b>	1,31	-11,73	-3,63	4,33	-0,10

Tabla 58. Sensibilidad de Irms lum 6 a la lum 10

	Tensión	Lum6 [Irms%]	Lum7 [Irms%]	Lum8 [Irms%]	Lum9 [Irms%]	Lum10 [Irms%]
<b>Pointed-top</b>	<b>5</b>	2,37	2,45	-0,86	3,78	0,12
	<b>3</b>	1,73	0,47	0,59	2,38	-1,00
	<b>1</b>	-2,15	1,66	-1,77	0,88	2,73
	<b>0</b>	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	<b>-1</b>	-3,05	1,24	-0,78	-1,69	2,30
	<b>-3</b>	-2,78	1,13	-1,15	-3,48	6,67
	<b>-5</b>	-4,40	0,81	-5,36	-3,76	9,41

Tabla 59. Sensibilidad de Irms lum 11 a la lum 15

	Tensión	Lum11 [Irms%]	Lum12 [Irms%]	Lum13 [Irms%]	Lum14 [Irms%]	Lum15 [Irms%]
<b>Pointed-top</b>	<b>5</b>	-2,58	5,85	5,80	2,45	-2,88
	<b>3</b>	-3,24	5,75	0,94	2,33	-4,24
	<b>1</b>	3,76	4,05	4,54	1,55	-1,75
	<b>0</b>	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	<b>-1</b>	-2,40	-0,70	1,44	2,08	-3,88
	<b>-3</b>	-1,22	1,55	1,33	-2,52	-3,48
	<b>-5</b>	5,01	0,50	4,62	-6,93	-7,60

## ANEXO E: VARIACIÓN THDI PARA LAS SEÑALES DE ALIMENTACIÓN FLAT-TOP Y POINTED-TOP.

En las Tabla 60 y Tabla 61 se presentan los resultados obtenidos para la distorsión armónica de corriente para cada luminaria realizando un barrido en distancia del circuito ramal y manteniendo el porcentaje de regulación de 0%, con señal de alimentación Flat-top. También se presenta la desviación estándar de las medidas donde se presenta una variación de distorsión bastante notoria, y esto se debe a que la THDI a una distancia de 2,4 [m] se aleja de las demás medidas provocando esta variación, la impedancia del circuito ramal y las componentes internas de cada luminaria puede ser el causante de este fenómeno.

Tabla 62. Variación de THDI para las lum 1 a la lum 7

	Distancia	Lum1	Lum2	Lum3	Lum4	Lum5	Lum6	Lum7
Flat-top	0	111,76	124,56	102,36	115,07	101,43	84,70	104,47
	2,4	155,04	179,67	145,70	161,14	140,02	90,34	144,98
	7	115,39	118,43	104,36	115,72	101,63	85,63	103,55
	20	112,11	123,01	103,18	114,95	101,10	84,80	104,69
	40	111,41	112,03	103,29	115,39	101,70	84,12	103,58
	<b>desviación</b>	19,02	27,34	18,97	20,51	17,24	2,53	18,30

Tabla 63. Variación de THDI para las lum 8 a la lum 15

	Distancia	Lum8	Lum9	Lum10	Lum11	Lum12	Lum13	Lum14	Lum15
Flat-top	0	96,31	105,50	97,47	113,14	112,07	89,98	117,00	113,78
	2,4	115,39	103,68	132,07	161,62	96,79	85,75	164,47	159,54
	7	96,55	104,78	94,09	110,34	117,24	90,89	118,97	114,27
	20	95,06	104,68	95,28	110,64	116,22	90,16	118,58	113,73
	40	95,42	105,67	94,96	110,67	116,08	89,92	119,76	113,94
	<b>desviación</b>	8,77	0,79	16,43	22,58	8,55	2,04	20,55	20,40

En las Tabla 64 y Tabla 65 se presenta los resultados obtenidos para la distorsión armónica de corriente para cada luminaria realizando un barrido en distancia del circuito ramal y manteniendo el porcentaje de regulación de 0%, con señal de alimentación Pointed-Top. También se presenta la desviación estándar de las medidas donde se presenta una variación de distorsión bastante notoria, y esto se debe a que la THDI a una distancia de 2,4 [m] se aleja de las demás medidas provocando esta variación, la impedancia del circuito ramal y las componentes internas de cada luminaria puede ser el causante de este fenómeno.

Tabla 66. Variación de THDI para las lum 1 a la lum 7

	<b>Distancia</b>	<b>Lum1</b>	<b>Lum2</b>	<b>Lum3</b>	<b>Lum4</b>	<b>Lum5</b>	<b>Lum6</b>	<b>Lum7</b>
<b>pointed-T</b>	0	122,68	141,57	119,89	136,30	101,87	78,94	118,71
	2,4	161,00	206,08	168,38	189,02	138,15	98,17	166,10
	7	116,30	141,01	119,16	134,57	100,47	80,07	119,03
	20	116,64	140,73	124,31	138,82	104,22	80,76	120,30
	40	115,03	140,30	118,30	134,66	101,17	79,22	116,84
	<b>desviación</b>	19,60	29,15	21,58	23,74	16,26	8,27	21,23

Tabla 67. Variación de THDI para las lum 8 a la lum 15

<b>distancia</b>	<b>Lum8</b>	<b>Lum9</b>	<b>Lum10</b>	<b>Lum11</b>	<b>Lum12</b>	<b>Lum13</b>	<b>Lum14</b>	<b>Lum15</b>
0	93,32	103,08	109,40	133,05	133,54	99,74	137,30	130,81
2,4	134,67	103,69	143,86	178,37	93,63	79,64	192,38	182,63
7	93,51	103,44	103,59	127,47	134,55	99,06	139,24	130,59
20	94,22	103,54	104,93	129,80	134,67	98,56	139,62	136,23
40	91,27	103,48	102,81	133,47	133,52	99,53	137,42	131,95
<b>desviación</b>	18,63	0,23	17,48	21,35	18,09	8,77	24,17	22,58

En las Tabla 68 y Tabla 69 se presentan los resultados obtenidos para la distorsión armónica de corriente para cada luminaria realizando un barrido en tensión y manteniendo la distancia constante a 0 mts con señal de alimentación flat-top. También se presenta la desviación estándar donde se puede apreciar que la

variación es bastante significativa, debido a que la THDI es mucho mayor cuando se alimenta con un porcentaje de regulación negativa en comparación con los resultados obtenidos para porcentajes positivos, siendo un tópico para futuras investigación para así determinar a ciencia cierta cómo afecta realmente la regulación de tensión de la red en el espectro de las luminarias con estudios más específicos.

Tabla 70. Variación de THDI para las lum 1 a la lum 7

Flat-top	Tensión	Lum1	Lum2	Lum3	Lum4	Lum5	Lum6	Lum7
	5	115,01	121,20	105,58	117,64	104,74	85,93	106,24
	3	113,20	121,83	103,05	116,44	102,39	87,50	105,08
	1	112,06	121,33	102,77	115,15	101,54	84,90	103,60
	0	111,76	124,56	102,36	115,07	101,43	84,70	104,47
	-1	111,80	123,18	146,03	163,47	141,47	84,79	145,80
	-3	155,15	238,41	145,32	160,24	138,45	84,15	144,75
	-5	154,55	197,04	141,40	159,26	137,12	81,83	141,65

Tabla 71. Variación de THDI para las lum 8 a la lum 15

Tensión	Lum8	Lum9	Lum10	Lum11	Lum12	Lum13	Lum14	Lum15
5	97,20	105,77	98,82	114,05	116,73	93,73	119,56	115,46
3	98,50	103,83	98,40	113,41	117,36	91,37	118,74	116,09
1	95,67	104,33	97,05	113,35	115,21	91,58	117,62	113,92
0	96,31	105,50	97,47	113,14	112,07	89,98	117,00	113,78
-1	94,46	102,89	137,74	158,31	119,87	89,29	169,77	160,03
-3	94,09	100,64	135,13	158,18	113,88	88,27	165,89	160,11
-5	93,33	102,15	131,81	155,96	114,47	86,80	165,58	157,03

En la Tabla 72 a Tabla 73 se presenta los resultados obtenidos para la distorsión armónica de corriente para cada luminaria realizando un barrido en tensión y manteniendo la distancia constante a 0 [m] con señal de alimentación Pointed-Top. También se presenta la desviación estándar donde se puede apreciar que la variación no es mayor a 4,7388 siendo el peor caso encontrado para la luminaria

10, se puede concluir que para las luminarias en estudio la distorsión la THDI se ve afecta un valor muy mínimo, siendo un tópicos para futuras investigación para así determinar a ciencia cierta cómo afecta realmente la regulación de tensión de la red en el espectro de las luminarias con estudios más específicos

Tabla 74. Variación de THDI para las lum 1 a la lum 7

pointed-top	Tensión	Lum1	Lum2	Lum3	Lum4	Lum5	Lum6	Lum7
	5	123,54	143,72	123,73	140,28	108,51	83,22	122,39
	3	122,61	139,86	122,96	141,62	107,47	81,25	122,25
	1	117,39	142,15	120,30	137,41	102,35	81,50	119,81
	0	122,68	141,57	119,89	136,30	101,87	78,94	118,71
	-1	116,40	141,43	118,64	134,26	102,88	80,44	118,35
	-3	112,66	137,80	117,64	132,06	99,16	76,58	116,33
	-5	117,15	138,69	118,11	130,06	95,58	77,43	113,53
	desviación	3,88	1,75	1,94	4,11	3,97	2,05	2,99

Tabla 75. Variación de THDI para las lum 7 a la lum 15

pointed-top	Tensión	Lum8	Lum9	Lum10	Lum11	Lum12	Lum13	Lum14	Lum15
	5	97,78	105,48	113,96	139,36	137,46	100,82	140,94	137,48
	3	95,63	103,84	112,94	137,58	135,65	102,44	139,90	136,28
	1	94,26	103,71	109,67	132,48	137,16	99,28	137,68	132,70
	0	93,32	103,08	109,40	133,05	133,54	99,74	137,30	130,81
	-1	92,91	102,33	107,75	134,42	133,13	98,78	136,16	132,08
	-3	90,35	101,51	104,23	131,45	132,64	97,71	134,98	130,08
	-5	91,07	101,06	99,50	125,60	133,11	94,34	136,03	128,57
	desviación	1,97	1,15	4,74	3,96	1,79	2,66	1,71	2,66