

Estimación de potencias en cargas no lineales residenciales por medio de modelos equivalentes de  
Norton

Víctor Alfonso Angarita Ardila y Moisés Ruiz Ayala

Trabajo de Grado para optar al título de Ingeniero Electricista

Director

César Antonio Duarte Gualdrón

PhD. In Electrical and Computer Engineering

Codirector

Jeisson David Bello Peña

Ingeniero Electricista

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas

Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones

Bucaramanga

2021

### **Agradecimientos**

Primero quiero agradecer a Dios por brindarme fortaleza, sabiduría y salud en los momentos de dificultad y así poder continuar y culminar una de mis metas, agradezco también a mis padres Moisés Ruiz y Flor María Ayala que sin su apoyo incondicional, tanto moral como económico durante toda mi vida estudiantil, no sería posible estar donde estoy sin ellos, por lo que les dedico este logro y les expreso mi admiración y cariño.

Agradezco a las personas que estuvieron ahí en los momentos difíciles y que gracias a su cariño y apoyo pude retomar fuerzas y seguir adelante, este logro también es de ustedes.

Agradezco al PhD César Antonio Duarte y al MSc. Jeisson David Bello, por dedicar su tiempo, experiencia y conocimientos en este proyecto, además de a los profesores que durante mi estancia en la universidad me transmitieron su conocimiento y el deseo por ejercer esta profesión, personas honorables que fueron la guía en esta etapa de mi vida.

Agradezco a la Universidad Industrial de Santander y a toda la comunidad universitaria que me ayudaron a formar un carácter crítico ante los acontecimientos sociales y de interés público, nos debemos a la comunidad y a tratar de hacer este país más grande.

Por ultimo quiero agradecer a mi gran amigo y compañero de proyecto Víctor Alfonso Angarita, que sin sus conocimientos y sus capacidades este proyecto no habría llegado a su culminación, gracias por su amistad y por esas horas de ocio frente a una consola de Xbox, en este camino universitario las cosas siempre pudieron ser peor, pero no faltaron los momentos de relajación con nuestros amigos, puede que nos pasáramos mucho en eso, la verdad es que al menos

se disfruto el camino, bien dicen que en un viaje no importa mucho el destino, importa mas el recorrido, gracias viticor por la siguiente frase "usted relájese"éxitos en su camino amigo.

*Moisés Ruiz Ayala*

Agradezco principalmente a mis padres por su apoyo incondicional en todos los aspectos posibles de mi vida. Sin ellos seguramente no estaría donde estoy y no habría logrado muchas cosas de las que hoy gozo.

Agradezco a mi hermano y mis hermanas por estar siempre allí en cada momento, bueno y malo, sabiendo que puedo contar con ellos ante cualquier situación.

Agradezco a las personas que me rodearon durante este proceso, amigos y profesionales, cada uno brindando un aporte importante para acrecentar mi ser.

Agradezco a la Universidad Industrial de Santander por permitirme adquirir el conocimiento que hoy poseo y abrirme una infinidad de posibilidades para el desarrollo personal y profesional.

Para finalizar, quiero agradecer infinitamente la compañía y el trabajo de mi gran amigo y colega Moisés Ruiz Ayala. Reconociendo y recordando cada momento transcurrido en este camino y valorar, ante todas las cosas, su presencia y colaboración.

*Víctor Alfonso Angarita Ardila*

## Tabla de Contenido

<b>Introducción</b>	<b>14</b>
<b>1. Objetivos</b>	<b>18</b>
<b>2. Modelo Equivalente de Norton y Estimación de Potencias basadas en el Estándar IEEE 1459</b>	<b>19</b>
2.1. Modelo Equivalente de Norton	19
2.2. Estándar IEEE 1459	22
2.3. Propagación de error	27
<b>3. Cargas Seleccionadas y Escenarios de Prueba</b>	<b>31</b>
3.1. Selección de cargas	31
3.1.1. Carga 1 en estudio: Smartphone	31
3.1.2. Carga 2 en estudio: Lámpara LED	32
3.1.3. Carga 3 en estudio: Televisor	32
3.2. Adquisición de señales	33
3.2.1. Almacenamiento de señales	33
3.2.2. Montaje para adquisición de señales	36
3.2.2.1. Descripción de los elementos del montaje para la adquisición de señales	37

ESTIMACIÓN DE POTENCIAS EN CARGAS NO LINEALES RESIDENCIALES	6
3.2.2.2. 1. Fuente de alimentación CHROMA	37
3.2.2.3. 2. Tarjetas de adquisición de datos National Instruments	38
3.2.2.4. 3. Pinzas Fluke-i30s	40
3.2.2.5. 4. Módulo de acople	40
3.2.2.6. 5. Software LabVIEW, National Instruments	42
3.2.2.7. 6. Cargas de estudio	42
3.3. Selección y distribución de los grupos de medidas	42
3.4. Escenarios de prueba para el MEN	53
3.5. Acondicionamiento de señales	56
<b>4. Análisis y resultados obtenidos</b>	<b>57</b>
4.1. Cálculo de errores en la corriente RMS no fundamental $I_h$	57
4.2. Potencias según el Estándar IEEE 1459 en las cargas de estudio	60
<b>5. Recomendaciones</b>	<b>65</b>
<b>6. Trabajo futuro</b>	<b>66</b>
<b>7. Conclusiones</b>	<b>67</b>
<b>Referencias Bibliográficas</b>	<b>70</b>
<b>Apéndices</b>	<b>74</b>

### Lista de Figuras

Figura 1.	Circuito equivalente de Norton	19
Figura 2.	Descomposición de potencia	26
Figura 3.	Esquema general de las señales de tensión utilizadas para la toma de datos.	34
Figura 4.	Interfaz principal de la aplicación de almacenamiento de señales.	35
Figura 5.	Interfaz smartphone de la aplicación de almacenamiento de señales.	36
Figura 6.	Interfaz smartphone de la aplicación de almacenamiento de señales estandarizadas.	36
Figura 7.	Montaje para la adquisición de señales.	37
Figura 8.	Fuente CHROMA 61701	38
Figura 9.	Tarjetas de National Instruments	39
Figura 10.	Pinza Fluke-i30s	40
Figura 11.	Pinza Fluke-i30s	41
Figura 12.	Interfaz gráfica LabVIEW	42
Figura 13.	Cargas de estudio	43
Figura 14.	Grupos de medida, 1-4	44
Figura 15.	Grupos de medida, 5-8	45
Figura 16.	Grupos de medida, 9-10	45
Figura 17.	Grupos de medida, 11-14	47

Figura 18.	Grupos de medida, 15-18	48
Figura 19.	Grupos de medida, 19-20	48
Figura 20.	Grupo de medida, 21	49
Figura 21.	Grupo de medida, 22 hasta 28	50
Figura 22.	Grupo de medida, 29-30	51
Figura 23.	Grupo de medida, 31	52
Figura 24.	Grupo de medida, 32	53
Figura 25.	Grupo de medida, 33	54
Figura 26.	Grupo de medidas para evaluar	55
Figura 27.	Histograma de los percentiles 25, 50 y 75, para el Smartphone	57
Figura 28.	Histograma de los percentiles 25, 50 y 75, para la Lámpara LED 15W	58
Figura 29.	Histograma de los percentiles 25, 50 y 75, para el Televisor	58
Figura 30.	Descomposición de potencia	61

**Lista de Tablas**

Tabla 1.	Potencia para un sistema monofásico con formas de onda no sinusoidales	26
Tabla 2.	Potencia para un sistema monofásico con formas de onda no sinusoidales (* Potencias con error = 0)	30
Tabla 3.	Contenido armónico de las señales tipo Flat-Top y Pointed-Top.	34
Tabla 4.	Especificaciones técnicas de la fuente CHROMA 61701	39
Tabla 5.	Especificaciones de las tarjeta de adquisición de señales National Instruments	40
Tabla 6.	Especificaciones de la pinza Fuker-i30s	41
Tabla 7.	Grupos del primer intervalo del histograma para el percentil 75	59
Tabla 8.	Percentiles de porcentajes de error en la corriente RMS para el Smartphone	59
Tabla 9.	Percentiles de porcentajes de error en la corriente RMS para la Lampara LED	60
Tabla 10.	Percentiles de porcentajes de error en la corriente RMS para el Televisión	60
Tabla 11.	Potencia para un sistema monofásico con formas de onda no sinusoidales	61
Tabla 12.	Percentiles de porcentajes de error de potencias IEEE-1459 para el Smartphone (Parte 1)	61
Tabla 13.	Percentiles de porcentajes de error de potencias IEEE-1459 para el Smartphone (Parte 2)	62

Tabla 14.	Percentiles de porcentajes de error de potencias IEEE-1459 para la lampara LED de 15 [W]	63
Tabla 15.	Percentiles de porcentajes de error de potencias IEEE-1459 para el Televisor	64
Tabla 16.	Descripción de los grupos de medida (Parte 1)	74
Tabla 17.	Descripción de los grupos de medida (Parte 2)	75
Tabla 18.	Errores relativos porcentuales en la corriente RMS no fundamental para el Smartphone	76
Tabla 19.	Distribución de grupos según los percentiles. Smartphone	77
Tabla 20.	Errores relativos porcentuales en la corriente RMS no fundamental para la lampara LED 15 W	78
Tabla 21.	Distribución de grupos según los percentiles. Lampara LED 15W	79
Tabla 22.	Errores relativos porcentuales en la corriente RMS no fundamental para el Televisor	80
Tabla 23.	Distribución de grupos según los percentiles. Televisor	81

**Lista de Apéndices**

	<b>pág.</b>
Apéndice A. Tablas de los grupos de medida	74

## Resumen

**Título:** ESTIMACIÓN DE POTENCIAS EN CARGAS NO LINEALES RESIDENCIALES POR MEDIO DE MODELOS EQUIVALENTES DE NORTON \*

**Autores:** Víctor Alfonso Angarita Ardila y Moisés Ruiz Ayala \*\*

**Palabras Clave:** Modelo equivalente de Norton, IEEE Std 1459, calidad de energía eléctrica, cargas no lineales, componente armónica, distorsión armónica, potencia activa, potencia reactiva, potencia aparente, modelo de carga no lineal.

**Descripción:** En este trabajo se realiza la evaluación del error al calcular la potencia utilizando Modelo Equivalente de Norton (MEN) para representar cargas no lineales. Para esto, se toman datos de tensión y corriente en laboratorio (señales muestreadas) de tres cargas de uso común en el sector residencial, estas cargas son del tipo no lineales e invariantes en el tiempo, las cuales serán el insumo para la estimación del MEN, esto se consigue tomando las muestras de las cargas en diferentes puntos de operación definidos para la señal de entrada de tensión. Una vez obtenidas las señales de tensión y corriente medidas a partir de los puntos de operación, se arman varios grupos de señales (señales en el dominio de la frecuencia) para generar un MEN e identificar qué zona del espacio muestral tiene mayor impacto en la potencia consumida, por tanto el MEN se plantean varios escenarios de evaluación, donde, con base en los modelos estimados, se calculan las corrientes no fundamentales (resultado propio del MEN), buscando las que presenten un porcentaje mínimo de error en su magnitud, finalmente se evalúa la potencia consumida de las diferentes cargas y la evaluación de la potencia se realiza para un sistema monofásico con formas de onda no sinusoidales a partir de lo definido en el estándar IEEE 1459.

---

\* Trabajo de Grado para optar por el título de ingeniero electricista

\*\* Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas. Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y Telecomunicaciones. Director: Dr. César Antonio Duarte Gualdrón, Codirector: Ing. Jeisson David Bello Peña

### Abstract

**Title:** ESTIMATION OF POWER IN NON-LINEAR RESIDENTIAL LOADS BY NORTON EQUIVALENT MODELS \*

**Author:** Víctor Alfonso Angarita Ardila and Moisés Ruiz Ayala \*\*

**Keywords:** Norton, IEEE Std 1459, quality, energy, power, loads, voltage, current, harmonics, fundamental, distortion, active power, reactive, apparent, non-linear load model.

**Description:** In this work, the evaluation of the error when calculating the power is performed using the Norton Equivalent Model (NEM) to represent non-linear loads. For this, voltage and current data are taken in the laboratory (sampled signals) from three loads commonly used in the residential sector, these loads are of the non-linear type and invariant in time, which will be the input for the estimation of the NEM. This is achieved by sampling the loads at different operating points defined for the voltage input signal. Once the voltage and current signals measured from the operating points have been obtained, several groups of signals are assembled (signals in the frequency domain) to generate a NEM and identify which area of the sample space has the greatest impact on power consumed, therefore the NEM are proposed several evaluation scenarios, where, based on the estimated models, the non-fundamental currents are calculated (result of the NEM itself), looking for those that present a minimum percentage of error in their magnitude, finally the it evaluates the power consumed from the different loads and the evaluation of the power is carried out for a single-phase system with non-sinusoidal waveforms based on what is defined in the IEEE 1459 standard.

---

\* Thesis to qualify for the title of electrical engineers

\*\* Physic-mechanical Engineering Faculty. Electrical, Electronics and Telecommunications Engineering School. Director: Dr. César Antonio Duarte Gualdrón, Codirector: Ing. Jeisson David Bello Peña

## Introducción

Actualmente las redes residenciales de energía eléctrica alimentan, principalmente, elementos electrónicos que son cargas del tipo no lineal e invariante en el tiempo, las cuales distorsionan la señal de corriente eléctrica, debido a que, al ser alimentadas con una señal de tensión sinusoidal, la corriente consumida por estas presenta cambios en la forma de onda, es así que este tipo de cargas no lineales, realizan conmutaciones en su operación normal distorsionando las señales de corriente que circulan por la red, afectando la calidad de energía eléctrica para los usuarios Carvajal et al. (2014).

Las cargas no lineales utilizadas masivamente en redes de distribución generan incrementos de la distorsión armónica en algunos sistemas eléctricos, por ejemplo, a causa del mundial de fútbol FIFA 2010, el uso de televisores durante la transmisión de los partidos aumentó, lo cual afectó algunas redes eléctricas distorsionando la corriente Ribeiro et al. (2011). Las distorsiones eléctricas pueden afectar la red de distribución y generar problemas que afectan la vida útil del transformador. Esto se ve reflejado en el rendimiento y la calidad de transformación lo cual puede representar interrupciones del servicio y aumentos de pérdidas en potencia Ruggero Ríos and Sánchez Quintana (2014).

Por lo anterior, trabajos como Watson et al. (2009); Thunberg and Soder (1999); Abdelkader et al. (2001) y Yong et al. (2010) analizan el impacto de estas cargas sobre la red eléctrica,

utilizando modelos matemáticos que permiten realizar simulaciones con el fin de determinar la potencia consumida por las cargas y determinar el porcentaje de distorsión generado por ellas.

El presente proyecto de grado tiene como objetivo principal comparar las estimaciones de potencias dadas por el estándar IEEE 1459, en cargas no lineales e invariantes en el tiempo de tipo residencial, empleando los valores obtenidos a través de Modelos Equivalentes de Norton (MEN) y medidas de las señales de tensión y corriente adquiridas en laboratorio. Para ello, se utiliza uno de los MEN, en la estimación de corrientes distorsionadas, propuesto por A.B. Nassif, J. Yong, W. Xu en Nassif et al. (2010), con estas corrientes se estiman las potencias del estándar IEEE 1459 en las cargas residenciales no lineales e invariantes en el tiempo seleccionadas, para lo cual se asignan diversos escenarios en los cuales se va a evaluar el comportamiento de las cargas, con el fin de identificar los escenarios que tienen mayor impacto en el consumo de potencia.

Para lograr este análisis, se desarrollan los siguientes objetivos específicos: Seleccionar las cargas no lineales e invariantes en el tiempo que serán objeto de estudio; asignar diversos escenarios de evaluación para la obtención de las medidas de las señales de tensión y corriente; escoger conjuntos de medidas para representar la carga buscando el menor porcentaje de error empleando MEN; determinar la propagación del error presente en los MEN al realizar estimaciones de potencia.

Ahora bien, para la ejecución de este trabajo de grado, se estima la potencia de 3 cargas

residenciales del tipo no lineal e invariante en el tiempo, utilizando el MEN propuesto en Nassif et al. (2010)

El cálculo del MEN requiere de tener los datos de la señal de entrada de tensión y su respuesta en corriente, para que así el modelo responda a condiciones que simulan la condición real de operación (señales de tensión distorsionadas), por lo que se hace uso de la fuente de alimentación Chroma, disponible en el Laboratorio de Uso Racional de la Energía y Energías Renovables (AT 205) ubicado en el campus central de la Universidad Industrial de Santander UIS.

Estos datos de tensión y corriente se obtienen en el laboratorio a partir de tarjetas de adquisición de datos. Es importante resaltar que cada carga es analizada individualmente teniendo su propio MEN.

Las pruebas que se realizaron a cada carga consisten, inicialmente, en distorsionar la señal de tensión manteniendo la componente fundamental y agregando de manera individual cada componente armónica, desde el armónico 3 hasta el 15 variando magnitud y fase (barrido principal), además, distorsionar la señal de tensión siguiendo parámetros de señales de tensión estandarizadas UN (2015); IEE (2014) para medir su respuesta en corriente. Teniendo estos datos, se procede a seleccionar los diferentes grupos de medidas que darán paso al cálculo del MEN. Ya realizada esta parte, se definen los escenarios de prueba y se evalúa el MEN. Una vez obtenidos los resultados del MEN se calcula la potencia utilizando el estándar IEEE 1459 para cada carga, en cada escenario

de prueba, con el fin de comparar los resultados del laboratorio y los que se consiguen con el MEN.

## 1. Objetivos

### Objetivo general

Comparar las estimaciones de potencias dadas por el estándar IEEE 1459, en cargas no lineales e invariantes en el tiempo de tipo residencial, empleando los valores obtenidos a través de Modelos Equivalentes de Norton y medidas de las señales de tensión y corriente adquiridas en laboratorio.

### Objetivos específicos

Seleccionar las cargas no lineales e invariantes en el tiempo que serán objeto de estudio.

Asignar diversos escenarios de evaluación para la obtención de las medidas de las señales de tensión y corriente.

Escoger conjuntos de medidas para representar la carga buscando el menor porcentaje de error empleando el Modelo Equivalente de Norton (MEN).

Determinar la propagación del error presente en los MEN al realizar estimaciones de potencia.

## 2. Modelo Equivalente de Norton y Estimación de Potencias basadas en el Estándar IEEE

### 1459

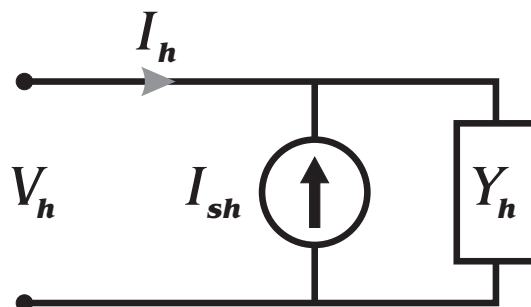
En este capítulo se encuentra una descripción sobre el modelo a usar y cómo se va a implementar en el caso de estudio de este trabajo, adicional a esto contiene una breve explicación sobre las estimaciones de potencias de las que trata el estándar IEEE 1459.

#### 2.1. Modelo Equivalente de Norton

Este proyecto se centra en el Modelo Equivalente de Norton (MEN) propuesto por A.B. Nassif, J. Yong, W. Xu en Nassif et al. (2010). Allí se propone un modelo en el dominio de frecuencia fundamentado en mediciones, para electrodomésticos con base en electrónica de potencia.

El modelo se utiliza para estudiar el comportamiento de las componentes armónicas, por lo tanto la componente fundamental no aparece explícitamente en las ecuaciones a utilizar. En la Figura 1 se puede ver el circuito equivalente de Norton descrito en Nassif et al. (2010).

Figura 1. Circuito equivalente de Norton



A partir del modelo propuesto en Nassif et al. (2010), se tiene:

$$[\dot{I}_h] = [\dot{I}_{sh}] + [Y] * [\dot{V}_h] \quad (1)$$

Donde:

- $\dot{I}_h$  componentes de frecuencia en la señal de corriente. <sup>1</sup>
- $\dot{I}_{sh}$  fuente de inyección de corriente constante. <sup>1 2</sup>
- Y matriz de admitancia equivalente para las componentes de frecuencia.
- $\dot{V}_h$  componentes de frecuencia en la señal de tensión. <sup>1</sup>

Expresando de forma matricial la ecuación (1) se tiene lo siguiente:

$$\begin{bmatrix} \dot{I}_3 \\ \dot{I}_5 \\ \dot{I}_7 \\ \vdots \\ \dot{I}_m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{I}_{S3} \\ \dot{I}_{S5} \\ \dot{I}_{S7} \\ \vdots \\ \dot{I}_{Sm} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} Y_{33} & Y_{35} & \cdots & Y_{3n} \\ Y_{53} & Y_{55} & \cdots & Y_{5n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ Y_{m3} & Y_{m5} & \cdots & Y_{mn} \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} \dot{V}_3 \\ \dot{V}_5 \\ \dot{V}_7 \\ \vdots \\ \dot{V}_n \end{bmatrix} \quad (2)$$

---

<sup>1</sup> Los puntos que están sobre las componentes armónicas de corriente y tensión representan que los valores que se están tomando pertenecen al conjunto de números complejos.

<sup>2</sup>  $\dot{I}_{sh}$  representa la relación entre la tensión fundamental y las corrientes armónicas.

Finalmente, se obtiene una expresión (3) que no contiene la componente fundamental, esto es porque para realizar el MEN en cargas no lineales propuesto por A.B. Nassif, J. Yong, W. Xu en Nassif et al. (2010), solamente requiere de las componentes armónicas.

$$\begin{bmatrix} \dot{I}_{sh} & Y_{h,h} \end{bmatrix} = \underbrace{\dot{I}_h}_{1,r} \underbrace{\begin{bmatrix} 1 & \dot{V}_h \end{bmatrix}}_{r,2} \left( \underbrace{\begin{bmatrix} 1 \\ \dot{V}_h \end{bmatrix}}_{2,r} \underbrace{\begin{bmatrix} 1 & \dot{V}_h \end{bmatrix}}_{r,2} \right)^{-1} \quad (3)$$

Donde,  $\mathbf{r}$  representa el número de medidas realizadas.

Para resolver la ecuación (3), es necesario tener en cuenta el anexo 10.1 del documento Nassif et al. (2010), que expresa lo siguiente

$$\begin{aligned} [V_{h,r} V_{r,h}^T]^{-1} &= V D^{-1} U^T, \text{ Donde } D^{-1} \\ &= \text{diag} \left( \frac{1}{\sigma_1}, \frac{1}{\sigma_2}, \dots, \frac{1}{\sigma_n} \right) \end{aligned} \quad (4)$$

Si la matriz está mal condicionada se utiliza la descomposición de valores singulares ( $\sigma_n$ ) que son los valores singulares de la matriz ( $D$ ), para obtener una aproximación de la inversa, como se muestra a continuación:

$$[V_{h,r} V_{r,h}^T]^{-1} = U D V^T \simeq V D_0^{-1} U^T \quad (5)$$

$$D_0 = \begin{cases} \frac{1}{\sigma_i}, & \text{if } \sigma_i > \varepsilon (\varepsilon \text{ valores cercanos a cero}) \\ 0, & \text{resto} \end{cases} \quad (6)$$

## 2.2. Estándar IEEE 1459

El estándar IEEE 1459 es una herramienta que permite determinar a partir del producto de voltajes y corrientes instantáneas una expresión general de potencia, con el fin de diseñar filtros activos y detectar las fuentes de distorsión armónica, entre otras aplicaciones Muñoz et al. (2012). El estándar IEEE 1459 define que en condiciones de estado estable la tensión y corriente instantánea tiene dos componentes diferentes, una de estas se denomina componente fundamental del sistema de potencia  $v_1$  e  $i_1$  en las ecuaciones (7) y (8), respectivamente, y las componentes restantes se denominan componentes armónicas  $v_h$  e  $i_h$ , como se observa en las ecuaciones (9) y (10) respectivamente. Sabiendo que  $i = i_1 + i_h$  y  $v = v_1 + v_h$ .

$$v_1 = \sqrt{2}V_1 \text{sen}(\omega t - \alpha_1) \quad (7)$$

$$i_1 = \sqrt{2}I_1 \text{sen}(\omega t - \beta_1) \quad (8)$$

$$v_h = V_0 + \sqrt{2} \sum_{h \neq 1} V_h \text{sen}(h\omega t - \alpha_h) \quad (9)$$

$$i_h = I_0 + \sqrt{2} \sum_{h \neq 1} I_h \sin(h\omega t - \beta_h) \quad (10)$$

Al determinar los valores eficaces cuadrados de las ecuaciones (7), (8), (9) y (10), se obtiene lo siguiente:

$$|V|^2 = \frac{1}{kT} \int_{\tau}^{\tau+kT} v^2 dt = |V_1|^2 + |V_H|^2 \quad (11)$$

$$|I|^2 = \frac{1}{kT} \int_{\tau}^{\tau+kT} i^2 dt = |I_1|^2 + |I_H|^2 \quad (12)$$

$$|V_H|^2 = |V_0|^2 + \sum_{h \neq 1} V_h^2 = |V|^2 - |V_1|^2 \quad (13)$$

$$|I_H|^2 = I_0^2 + \sum_{h \neq 1} |I_h|^2 = |I|^2 - |I_1|^2 \quad (14)$$

Según el estándar IEEE 1459, en un sistema de corriente alterna (CA), cualquier componente detectada de corriente continua (CC), debe incluirse en  $V_H$  e  $I_H$ , según corresponda, tal y como se observa en las ecuaciones (13) y (14), esto debido a que las componentes de continua no corresponden a la componente fundamental del sistema con el que se esté trabajando Muñoz et al. (2012), Suárez (2010).

Teniendo en cuenta las expresiones de tensión y corriente de las ecuaciones (11) y (12), la potencia aparente o de dimensionamiento al cuadrado para un sistema de potencia está determinada por la siguiente expresión

$$S^2 = (VI)^2 = V^2I^2$$

$$S^2 = (V_1^2 + V_H^2) (I_1^2 + I_H^2)$$

$$S^2 = (V_1I_1)^2 + (V_1I_H)^2 + (V_HI_1)^2 + (V_HI_H)^2$$

reordenando los términos, finalmente se tiene que

$$S^2 = S_1^2 + S_N^2 \tag{15}$$

La ecuación (15) esta dada en términos de  $S_1$  y  $S_N$ , donde  $S_N$  representa la potencia aparente no fundamental generada por las distorsiones armónicas de las señales de tensión y corriente como se observa en la ecuación (16), por otra parte  $S_1$  representa la potencia aparente fundamental, es decir la producida por las componentes fundamentales de las señales de tensión y corriente del sistema según la ecuación (17)

$$S_N^2 = (V_1I_H)^2 + (V_HI_1)^2 + (V_HI_H)^2$$

$$S_N^2 = D_I^2 + D_V^2 + S_H^2 \quad (16)$$

$$S_1 = V_1 I_1 \quad (17)$$

por otra parte, la potencia activa promedio  $P$ , es el valor medio de  $p(t)$  y su expresión se ve en la ecuación (18)

$$P = \frac{1}{kT} \int_{\tau}^{\tau+kT} p(t) dt = P_1 + P_H \quad (18)$$

La potencia activa armónica esta dada por

$$P_H = \sum_{h \neq 1}^{\infty} V_h I_h \cos(\theta_h) = P - P_1 \quad (19)$$

ahora, la potencia aparente armónica residual  $D_H^2$  es el término de la potencia armónica aparente que contiene a todos los productos resultantes entre los distintos elementos que faltan por incluir en las ecuaciones antes mencionadas, está definida como:

$$D_H^2 = S_H^2 - P_H^2 \quad (20)$$

finalmente, es posible representar las potencias del estándar IEEE 1459 en un diagrama de



### 2.3. Propagación de error

El Modelo Equivalente de Norton (MEN) requiere de realizar mediciones de señales de tensión y corriente en las cargas para ser generado, estas mediciones poseen errores debido a los instrumentos de medida utilizados, como son las pinzas Fluke y las tarjetas de adquisición de datos National Instruments (estos errores se pueden conocer con las especificaciones técnicas de cada instrumento de medida). El error propio de cada medida proviene directamente de las señales muestreadas de tensión y corriente tomadas a través de las tarjetas de adquisición de datos National Instruments, estas señales en el dominio del tiempo son tratadas para el desarrollo del modelo y transformadas al dominio de la frecuencia, sin embargo, no se calcula la propagación del error a causa de la transición del dominio del tiempo al dominio de la frecuencia debido a que los valores de magnitud y fase obtenidos de las señales medidas serán considerados valores reales, entonces, los errores que se van a propagar son las corrientes no fundamentales de las señales a evaluar que son resultados del Modelo Equivalente de Norton (MEN) Nassif et al. (2010) de acuerdo con la ecuación (1). Para el cálculo de potencia implementando el estándar IEEE 1459, se hace uso de diversas ecuaciones que están en función de la tensión y la corriente (parámetros en el dominio de la frecuencia), haciendo necesario determinar la propagación del error proveniente de estas señales.

La ecuación (21) muestra la forma general para el cálculo de la propagación del error Ardila

(2007).

$$\Delta V = \sqrt{\left(\frac{\partial V}{\partial x}\right)^2 \Delta x^2 + \left(\frac{\partial V}{\partial y}\right)^2 \Delta y^2 + \left(\frac{\partial V}{\partial z}\right)^2 \Delta z^2 + \dots} \quad (21)$$

Donde:

- $V$  es la función matemática.
- $x, y, z$  son variables.
- $\Delta V$  representa la propagación del error de la función.

Para evaluar el modelo de potencia es necesario realizar los cálculos descritos en el estándar IEEE 1459 con las señales medidas (valores en el dominio de la frecuencia de las señales medidas) y las señales estimadas (valores en el dominio de la frecuencia de las señales calculadas con el MEN). Ahora bien, observando la ecuación (1) se pueden calcular las componentes armónicas de corriente  $I_h$  a partir de las componentes armónicas de tensión  $V_h$  (excluyendo las componentes fundamentales de corriente y tensión), esto indica que la fuente de error se centra en  $I_h$  y que los errores de  $V_h, V_1$  e  $I_1$  son "0" en este caso. Es importante aclarar que  $I_h$  es un vector que contiene las componentes armónicas de corriente (representación fasorial) y que su valor RMS se calcula con la ecuación (22).

$$|I_h| = \sqrt{I_3^2 + I_5^2 + I_7^2 + I_9^2 + I_{11}^2 + I_{13}^2 + I_{15}^2} \quad (22)$$

Para el cálculo de la propagación del error a causa de las magnitudes de las componentes armónicas de corriente en el valor RMS de  $I_h$  se aplica la ecuación (21), obteniendo:

$$\Delta|I_h| = \sqrt{\left(\frac{\partial|I_h|}{\partial I_3}\right)^2 \Delta I_3^2 + \left(\frac{\partial|I_h|}{\partial I_5}\right)^2 \Delta I_5^2 + \left(\frac{\partial|I_h|}{\partial I_7}\right)^2 \Delta I_7^2 + \dots} \quad (23)$$

Reemplazando se obtiene:

$$\Delta|I_h| = \sqrt{\frac{I_3^2 \Delta I_3^2 + I_5^2 \Delta I_5^2 + \dots + I_{15}^2 \Delta I_{15}^2}{I_3^2 + I_5^2 + I_7^2 + I_9^2 + I_{11}^2 + I_{13}^2 + I_{15}^2}} \quad (24)$$

Ahora bien, como se ha mencionado con anterioridad los errores correspondientes a los valores de tensión y la componente fundamental de corriente son "0", como se muestra a continuación:

$$\Delta V_1 = \Delta V_3 = \dots = \Delta V_{15} = \Delta \theta_{v1} = \Delta \theta_{v3} \dots = \Delta \theta_{v15} = \Delta I_1 = \Delta \theta_{i1} = 0 \quad (25)$$

La propagación de error de las ecuaciones que están en función únicamente de estos parámetros tienen error "0", esto se puede verificar utilizando la ecuación (21) para cada una de ellas. En la tabla 2 se resaltan las potencias que tienen error "0" debido a que su cálculo no depende de  $I_h$ .

Tabla 2

*Potencia para un sistema monofásico con formas de onda no sinusoidales (\* Potencias con error = 0)*

Cantidad o indicador	Combinado	Fundamental	No fundamental
Aparente	$S$ (VA)	$S_1^*$ (VA)	$S_N, S_h$ (VA)
Activa	$P$ (W)	$P_1^*$ (W)	$P_H$ (W)
No Activa	$N$ (VAr)	$Q_1^*$ (VAr)	$D_I, D_V^*, D_H$ (VAr)

### 3. Cargas Seleccionadas y Escenarios de Prueba

Este trabajo de investigación utilizó tres cargas residenciales del tipo no lineal e invariante en el tiempo, las cuales fueron puestas a prueba en diversos escenarios de operación con el fin de obtener un modelo equivalente de Norton (MEN) propuesto en Nassif et al. (2010) para cada carga. El MEN fue puesto a prueba en distintos puntos de operación y con la ayuda del estándar IEEE 1459 Suárez (2010) se calculó la potencia. Este capítulo describe la selección de las cargas a usar y los escenarios de prueba.

#### 3.1. Selección de cargas

Las cargas usadas son de tipo residencial, no lineal e invariante en el tiempo, ya que en las redes de distribución de energía eléctrica los efectos de distorsiones en las señales de tensión y corriente se deben al uso masivo de estos equipos eléctricos y electrónicos. Sumado a lo anterior, se tendrá en cuenta que sean cargas de alta demanda y de fácil adquisición.

**3.1.1. Carga 1 en estudio: Smartphone.** En los últimos diez años el uso de teléfonos móviles ha venido en aumento, este incremento se ve reflejado tanto en la población joven como en la adulta que a medida que pasa el tiempo ven la necesidad de utilizar estas nuevas herramientas tecnológicas, bien sea por motivos laborales, académicos o personales. El uso de estos dispositivos va en crecimiento ya que permite realizar búsquedas rápidas por internet, además de brindar la posibilidad para establecer comunicación de forma ágil, efectiva y en el menor tiempo posible, por

este motivo es un tipo de carga con una alta demanda como se puede interpretar en Portilla and Saussure (2016), Dar (2016), Van Weezel and Benavides (2009), Ruiz-Palmero et al. (2016). Por lo anterior, fue seleccionado como carga para este proyecto de grado un Smartphone.

**3.1.2. Carga 2 en estudio: Lámpara LED.** La iluminación artificial representa aproximadamente el 21 % de consumo en los sistemas eléctricos del mundo Ogunjuyigbe et al. (2017), con el fin de reducir el mismo, las nuevas tecnologías han llevado al mundo a una era de iluminación LED buscando mayor eficiencia energética y económica en comparación con sus predecesoras las lámparas incandescentes y fluorescentes, las cuales tienen un mayor impacto ambiental en el proceso de fabricación y menor vida útil Ogunjuyigbe et al. (2017), Hernández Moreno (2015), en consecuencia, se seleccionó una lámpara LED de 15 W.

**3.1.3. Carga 3 en estudio: Televisor.** El televisor desde su invención hasta estos tiempos ha sido uno de los artículos principales del hogar, el cual, hace unos años era una de las mayores fuentes de información y entretenimiento, sin embargo, en la última década el aumento de dispositivos móviles ha dejado rezagado el uso de este elemento, aun así, artículos de prensa como Din (2016), Din (2019) muestran que en Colombia es uno de los electrodomésticos más vendidos del país, además que en la actualidad contamos con mejores recursos para controlar el tipo de contenido que se consume por medio de estos dispositivos Madrid and Marcos (2013), esto permite que la televisión se adapte a los gustos individuales de los usuarios al ser de fácil acceso, por lo anterior el Televisor es una de las cargas usadas en este proyecto de investigación, concretamente

un Televisor LED de 21 Pulgadas.

### **3.2. Adquisición de señales**

La adquisición de señales para generar el modelo equivalente de Norton (MEN) de cada carga se obtiene realizando una serie de pruebas que consisten en distorsionar la señal de tensión manteniendo la componente fundamental y agregando individualmente cada componente armónica, iniciando con un porcentaje del 1% hasta el 10% en magnitud para cada armónico, adicional a esto en cada porcentaje de magnitud se realizara un barrido de 360° en los ángulos de fase, con separaciones de 5, obteniendo así 72 medidas por cada porcentaje de armónico, con lo cual si son 10% tendremos entonces 720 medidas por armónico, este proyecto toma como base la norma IEC 61000-4-30 la cual estandariza y define los métodos de medición para optimizar los resultados en los parámetros de calidad de potencia, con lo cual se optó por considerar los 7 primeros armónicos, pues las componentes armónicas de orden superior tienen corrientes de bajo impacto, por lo anterior, en total se cuenta con 5040 medidas por cada carga, como se muestra en la Figura 3. Finalmente, se cuenta también con 6 puntos de operación de la red eléctrica de distribución local, 100 señales que cumplen el estándar UN50160 UN (2015), 100 que cumplen el estándar IEEE 519 del 2014 IEE (2014), la flat-top, la pointed-top (ver Tabla 3) y la señal sinusoidal pura en tensión.

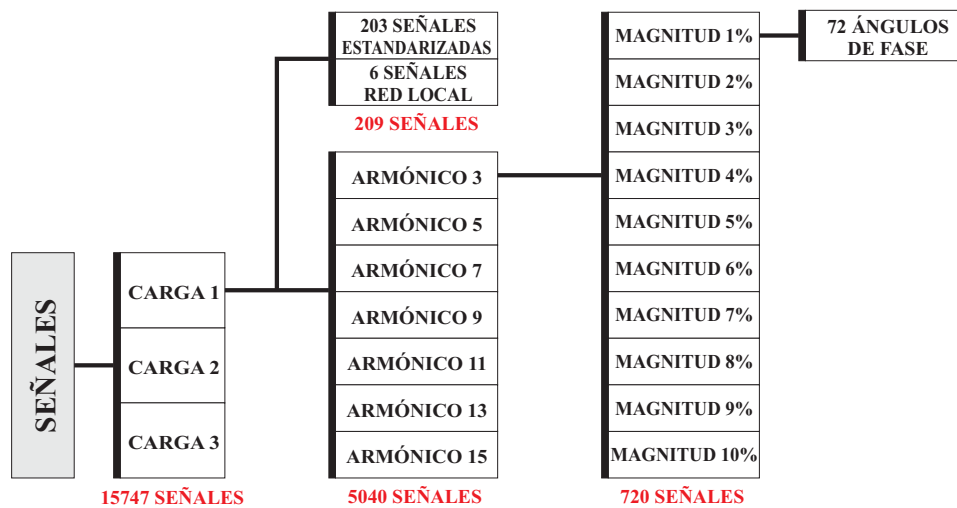
**3.2.1. Almacenamiento de señales.** Las señales adquiridas en su totalidad son 15747 por las 3 cargas, en vista de que se cuenta con una cantidad de datos considerable que pueden ser utilizados en la academia y en futuros proyectos de grado, se toma la decisión de crear

Tabla 3

Contenido armónico de las señales tipo Flat-Top y Pointed-Top.

Armónico	Sinusoidal	Flat-Top	Pointed-Top
Magnitud [V]	1	120	116,61
	3	-	2,77
	5	-	1,93
	7	-	1,04
Fase [°]	1	0	0
	3	-	0
	5	-	180
	7	-	0

Figura 3. Esquema general de las señales de tensión utilizadas para la toma de datos.



una aplicación en JAVA, que permite consultar y almacenar las señales de manera parcial o total de acuerdo a la necesidad. La aplicación es desarrollada utilizando NetBeans IDE 8.2 y se podrá encontrar en el servidor local de la Universidad Industrial de Santander. El aplicativo está organizado de tal forma que las señales se encuentran clasificadas por cargas y separadas en dos conjuntos de señales, el primer conjunto está compuesto por el barrido principal de 5040 señales por car-

ga presentado en la Figura 3, el segundo conjunto está compuesto por las señales estandarizadas UN50160 y la IEEE 519 del 2014.

- En la Figura 4, se puede observar la interfaz principal de la aplicación en JAVA, en ella se puede seleccionar una carga de la cual se quieren cargar los datos.

Figura 4. Interfaz principal de la aplicación de almacenamiento de señales.



- En la Figura 5, se puede observar la interfaz propia del smartphone, seleccionando para almacenar una señal del barrido principal.
- En la Figura 6, se puede observar la interfaz propia del smartphone, seleccionando para almacenar las señales estandarizadas UN50160 o IEEE 519 del 2014.

Figura 5. Interfaz smartphone de la aplicación de almacenamiento de señales.



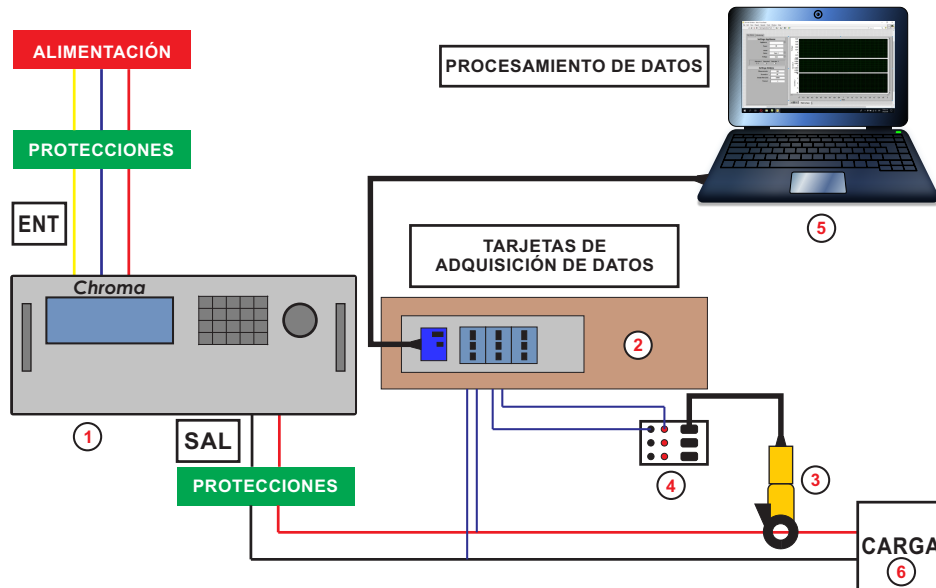
Figura 6. Interfaz smartphone de la aplicación de almacenamiento de señales estandarizadas.



**3.2.2. Montaje para adquisición de señales.** En el laboratorio de Uso Racional de la Energía y Energías Renovables (AT-205) ubicado en el campus central de la Universidad Industrial de Santander UIS, se realizó el montaje de la Figura 7 para la medición de las señales de

tensión y corriente en las cargas de estudio.

Figura 7. Montaje para la adquisición de señales.



■ Componentes del montaje, Figura 7:

- |                                  |                     |
|----------------------------------|---------------------|
| 1) Fuente de alimentación Chroma | 4) Modulo de acople |
| 2) Tarjetas National Instruments | 5) Software LabVIEW |
| 3) Pinza Fluke-i30s              | 6) Carga a estudiar |

**3.2.2.1. Descripción de los elementos del montaje para la adquisición de señales.**

Los elementos que componen el montaje para la adquisición de señales serán descritos a continuación:

**3.2.2.2. 1. Fuente de alimentación CHROMA.** La fuente de alimentación usada es una CHROMA 61701 (ver Figura 8), se caracteriza por tener una salida trifásica con 5 hilos (3

Fases, 1 Neutro, 1 Tierra), al ser una fuente programable, le permite al usuario obtener diversas señales distorsionadas de tensión en la salida de la fuente, esta programación se puede realizar en el panel de la misma o por medio de una interfaz con el software Softpanel instalado en un PC. Esta fuente está fabricada con las medidas de protección necesarias para cualquier tipo de falla que se pueda presentar, tales como: sobre-tensiones, sobre-corrientes, altas temperaturas, entre otros. Las especificaciones de la fuente se puede observar en la Tabla 4.

Figura 8. Fuente CHROMA 61701



**3.2.2.3. 2. Tarjetas de adquisición de datos National Instruments.** Durante la adquisición de señales se utilizaron dos tarjetas de National Instruments, las cuales son NI 9239 usada para medir de forma indirecta la corriente consumidas por la carga y la NI 9225 usada para medir directamente la tensión suministrada a la carga (ver Figura 9). Las especificaciones de las tarjetas se pueden ver en la Tabla 5

Tabla 4

*Especificaciones técnicas de la fuente CHROMA 61701*

<b>AC OUTPUT RATING</b>		<b>POTENCIA</b>
Máxima potencia		1500 VA
Potencia por fase		500 VA
<b>TENSIÓN</b>		
Rango		150 V/300 V
Tensión de salida	0-150 V, 0-300 V, 0-140 V, 0-240 V	>1000 Hz
Exactitud		0.2% + 0.2% F.S
Resolución		0.1 V
2*Distorsión		0.3% 50/60 Hz 1.5% 15-1.2 kHz
<b>CORRIENTE MÁXIMA POR FASE</b>		
Valor r.m.s		4 A/2 A
Valor pico		24 A/12 A
<b>FRECUENCIA</b>		
Rango		DC, 15-1.2 kHz
Exactitud		0.15 %
<b>FASE</b>		
Rango		0 360°
Resolución		0.3°
Exactitud		<0.8° 50/60 Hz

Figura 9. Tarjetas de National Instruments



Tabla 5

*Especificaciones de las tarjeta de adquisición de señales National Instruments*

<b>Tarjetas National Instruments</b>		
	<b>NI 9239</b>	<b>NI 9225</b>
Number of channels	4 canales de entrada analógica	3 canales de entrada analógica
Resolución ADC	24 bits	24 bits
Tipo de ADC	Delta-Sigma (con prefiltrado analógico)	Delta-Sigma (con prefiltrado analógico)
Modo de muestreo	Simultáneo	Simultáneo
<b>Internal master timebase (<math>f_M</math>)</b>		
Frecuencia	12.8 MHz	12.8 MHz
Exactitud	±100 ppm max	±100 ppm max
<b>Data rate range (<math>f_S</math>) using internal master timebase</b>		
Mínimo	1.613 kS/s	1.613 kS/s
Máximo	50 kS/s	50 kS/s
<b>Data rate range (<math>f_S</math>) using external master timebase</b>		
Mínimo	390.625 S/s	390.625 S/s
Máximo	51.2 kS/s	51.36 kS/s

#### 3.2.2.4. 3. *Pinzas Fluke-i30s.* La pinza amperimétrica Fluke-i30s (ver Figura 10)

es utilizada para medir la señal de corriente que alimenta la carga, esta señal es convertida en tensión y enviada a la tarjeta de National Instruments NI-9239.

Figura 10. Pinza Fluke-i30s



#### 3.2.2.5. 4. *Módulo de acople.* El módulo de acople permite conectar la salida de las

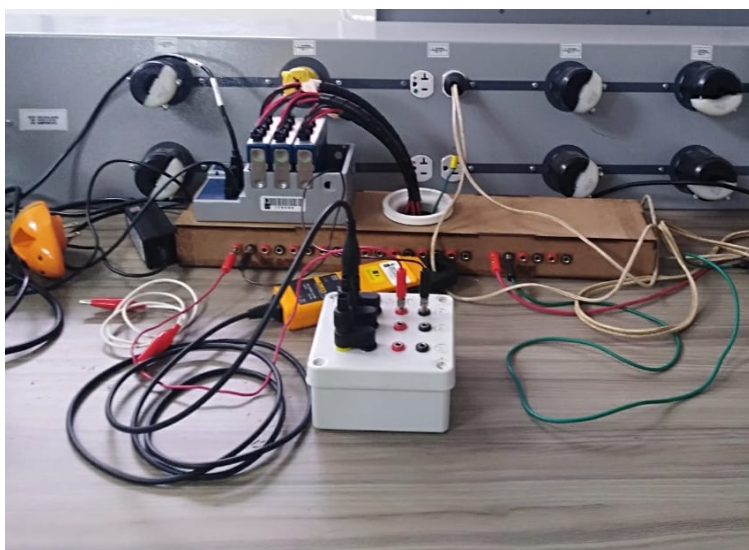
pinzas Fluke-i30s con la tarjeta de National Instruments (ver Figura 11). Haciendo una conversión

Tabla 6  
Especificaciones de la pinza Fuker-i30s

Especificaciones eléctricas	
Rango de corriente	20 A CA rms o CC
Rango de medida	≤ 30 A
Sensibilidad de salida	100 mV/A
Precisión (a +25 °C)	± 1 % de lectura ± 2 mA
Resolución	± 1 mA
Impedancia de carga	> 100 kΩ
Sensibilidad de la posición del conductor	± 1 % respecto a lectura central
Rango de frecuencias	CC a 100 kHz (- 0,5 dB)
Cambio de fase por debajo de 1 kHz	< 2 grados
Coefficiente térmico	± 0,01 % de lectura/°C
Alimentación eléctrica	9 V alcalina, MN1604/PP3, 30 horas
Tensión de servicio	300 V CA rms o CC

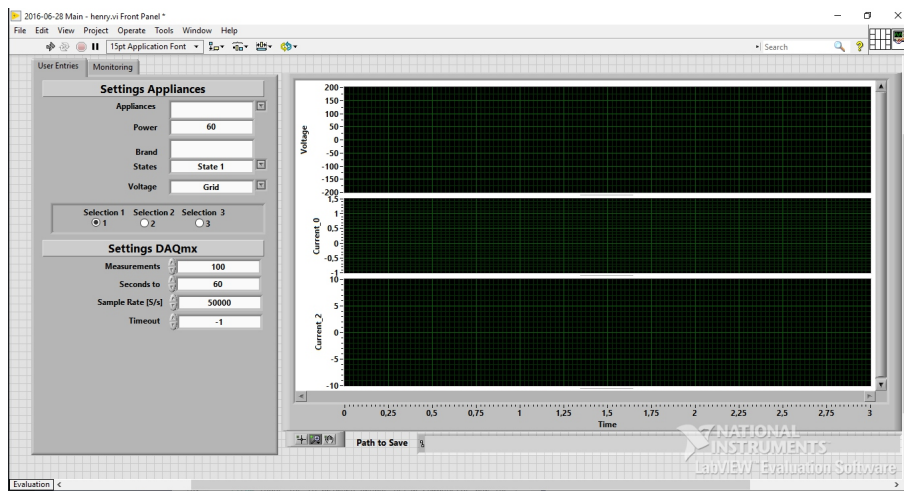
de la salida coaxial de la pinza en una salida tipo pin para la conexión respectiva con la tarjeta NI-9239.

Figura 11. Pinza Fluke-i30s



**3.2.2.6. 5. Software LabVIEW, National Instruments.** Es un software con interfaz gráfica, que permite almacenar, visualizar y manipular datos emitidos por las tarjetas de National Instruments. para este proyecto el software fue una herramienta usada con el fin de transformar los datos emitidos por las tarjetas NI 9239 y NI 9225 a documentos en el formato .mat (Archivos de MATLAB). ver Figura 12

Figura 12. Interfaz gráfica LabVIEW

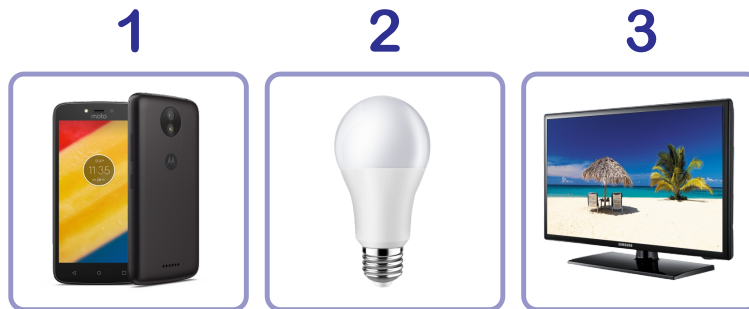


**3.2.2.7. 6. Cargas de estudio.** En este proyecto se utilizaron tres diferentes cargas de estudio, un smartphone, una lámpara LED y un televisor. Las características de estas ya fueron enunciadas en la sección 2.1 de este documento. ver Figura 13

### 3.3. Selección y distribución de los grupos de medidas

En este punto, este trabajo de grado cuenta con el barrido en las señales de tensión que se realizó para la toma de datos en cada carga, como se presentó en la sección 2.2, se obtiene 5040

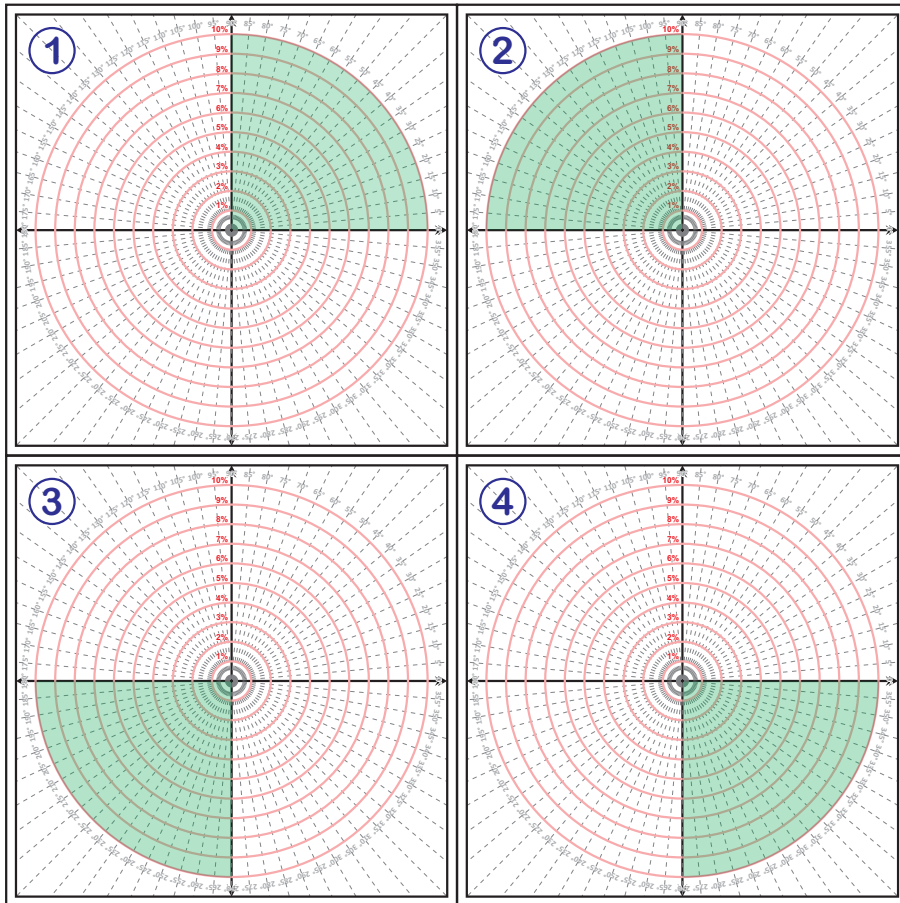
Figura 13. Cargas de estudio



diferentes medidas. Esta cantidad de medidas es dividida en 33 grupos diferentes con el fin de analizar el desempeño del MEN de diferentes zonas de operación, sus características se describen a continuación:

- Los primeros 10 grupos de medidas están compuestos cada uno con 49 señales de tensión y corriente conformado por 7 medidas en cada componente armónica. Los parámetros que se tomaron en cuenta para hacer la selección de estos grupos son los siguientes:
  - Los grupos están compuestos por los 7 primeros armónicos impares y cada armónico tiene el mismo porcentaje de magnitud y ángulo de fase.
  - Los primeros 4 grupos se construyen a partir de los 4 cuadrantes, donde el ángulo de fase es seleccionado aleatoriamente, limitando los ángulos a cada uno de los cuadrante correspondiente y el porcentaje en magnitud de cada componente armónica varia entre el 1 % y el 10%. en la figura 14 se pueden ver las zonas sombreadas de donde se sacaran las medidas de los primeros 4 grupos.
  - Los 4 siguientes grupos de datos mantienen constante el porcentaje en magnitud de cada componente armónica, variando el ángulo de fase entre 0° y 360°. en la figura 15

Figura 14. Grupos de medida, 1-4



se pueden ver las zonas sombreadas de donde se sacaron las medidas de los grupos 5, 6, 7 y 8.

- Los siguientes 2 grupos están compuestos por medidas aleatorias, en los cuales el porcentaje de magnitud y ángulo de fase varían para cada componente armónica. en la figura 16 se pueden ver las zonas sombreadas de donde se sacaron las medidas de los grupos 9 y 10.
- Los siguientes 10 grupos de medidas están formados cada uno por 63 señales de tensión y

Figura 15. Grupos de medida, 5-8

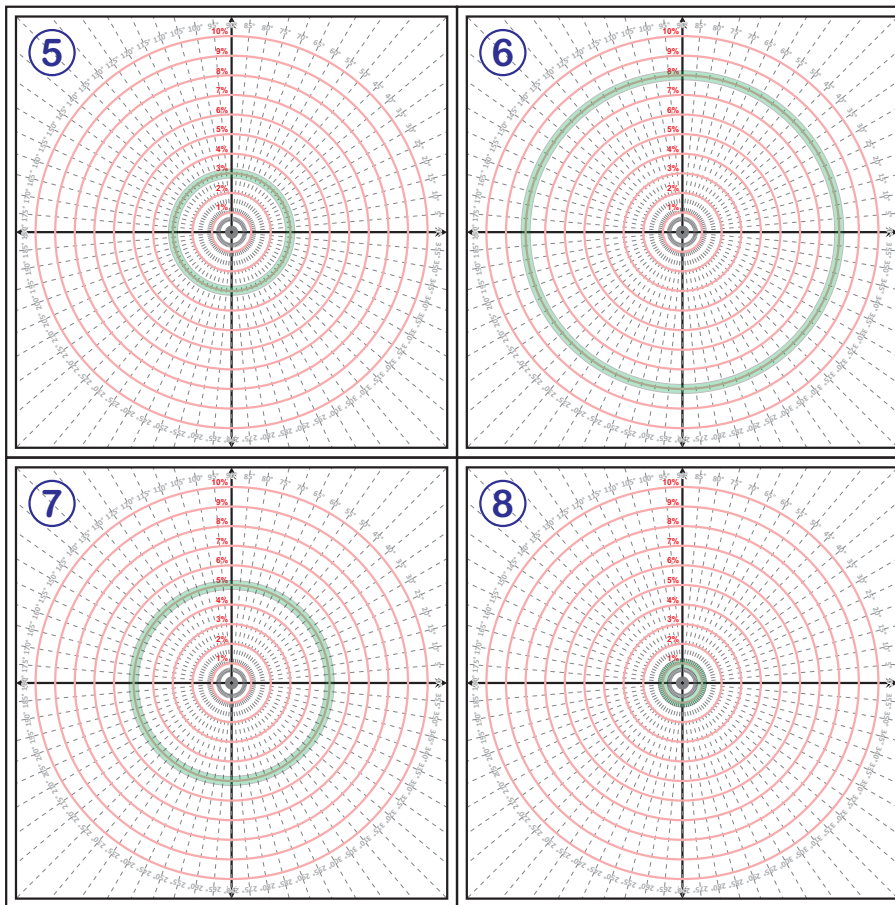
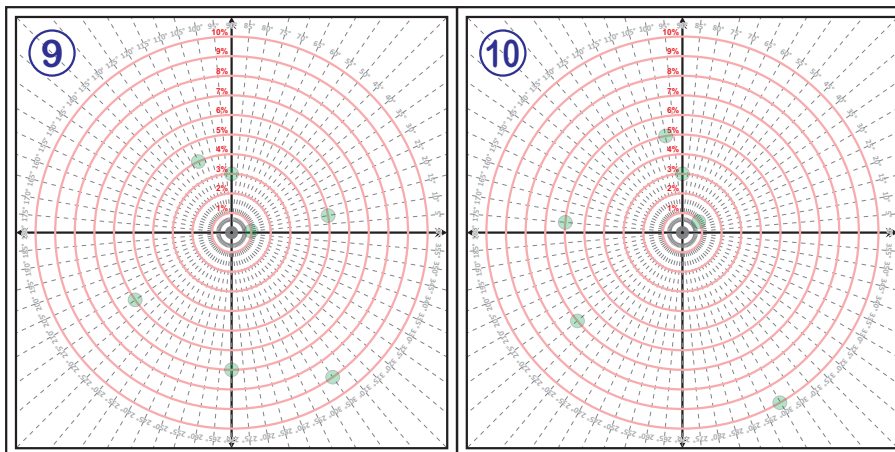


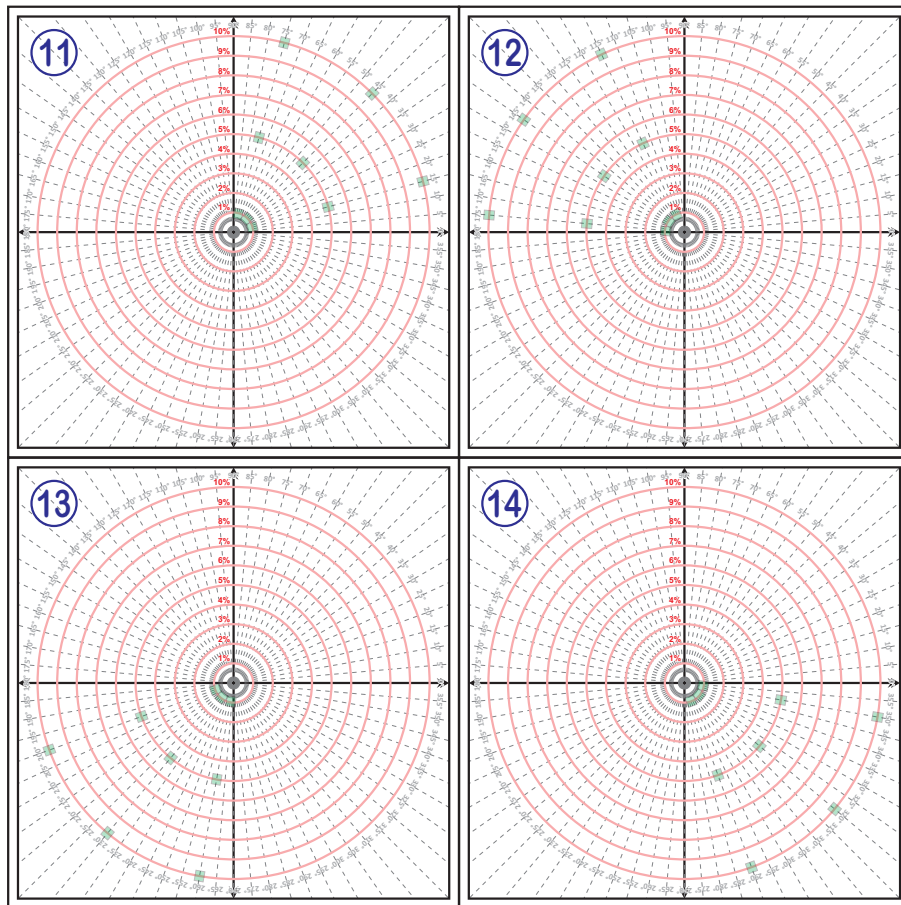
Figura 16. Grupos de medida, 9-10



corriente, distribuidas de tal forma que cuentan con 9 medidas por cada componente armónica. Los parámetros que se tomaron en cuenta para hacer la selección de estos datos son los siguientes:

- En estos grupos, cada uno está compuesto por los 7 primeros armónicos impares y cada armónico tiene el mismo porcentaje de magnitud y ángulo de fase.
- Los primeros 4 grupos se construyen a partir de los 4 cuadrantes, donde el ángulo de fase es seleccionado aleatoriamente, limitando los ángulos a cada uno de los cuadrantes correspondiente y el porcentaje en magnitud de cada componente armónica varía entre el 1% y el 10%. En la figura 17 se pueden ver las zonas sombreadas de donde se sacaron las medidas de los grupos 11, 12, 13 y 14.
- Los 4 siguientes grupos de datos mantienen constante el porcentaje en magnitud de cada medida para las componentes armónicas, variando el ángulo de fase en pasos de 40° para cada medida seleccionada. En la figura 18 se pueden ver las zonas sombreadas de donde se sacaron las medidas de los grupos 15, 16, 17 y 18.
- Los últimos 2 grupos están compuestos por medidas aleatorias en los cuales el porcentaje de magnitud es aleatorio y el ángulo de fase varía en 50° para cada medida. En la figura 18 se pueden ver las zonas sombreadas de donde se sacaron las medidas de los grupos 19-20.

Figura 17. Grupos de medida, 11-14



- El grupo 21 de medidas esta formado con 15 señales por armónico, para cada armónico hay un porcentaje distinto en magnitud y los ángulos de fase correspondientes a cada señal están espaciados en  $25^\circ$  cada uno. En la figura 20 se pueden ver la zona sombreada de donde se sacaron las medidas del grupo 21.
- A partir del grupo 22 y hasta el 28, la composición de los grupos de medidas esta formada

Figura 18. Grupos de medida, 15-18

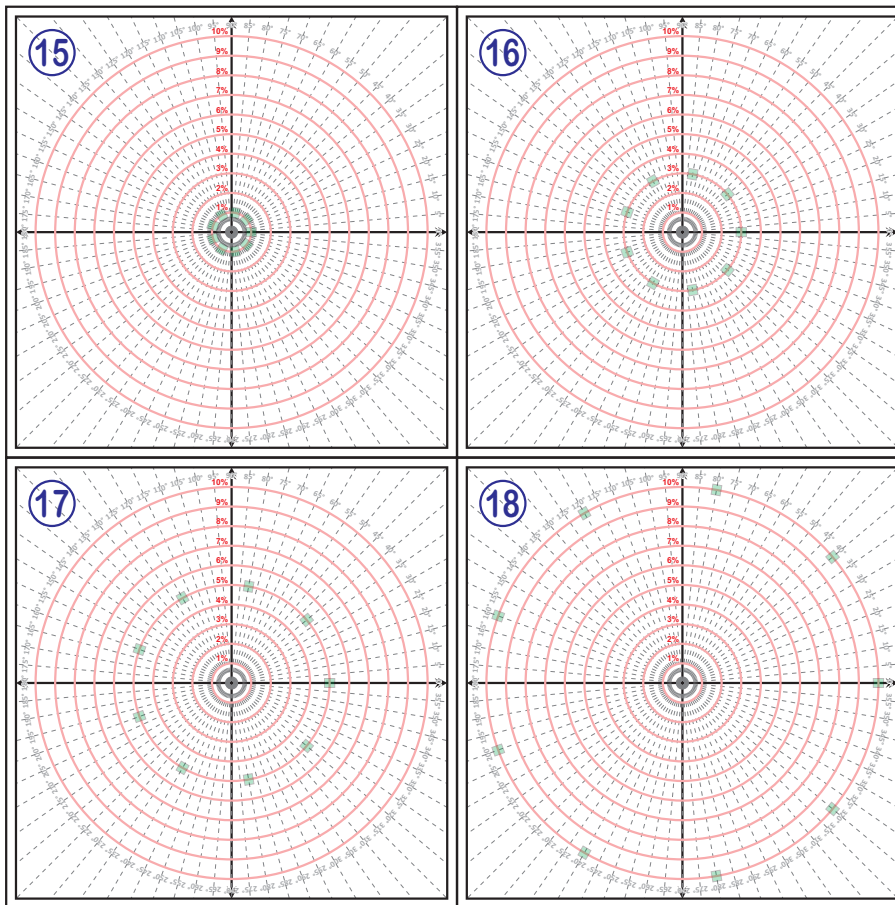


Figura 19. Grupos de medida, 19-20

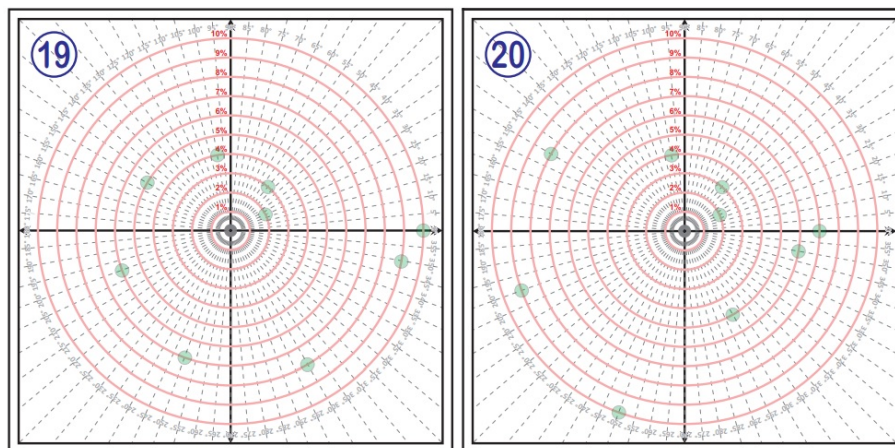
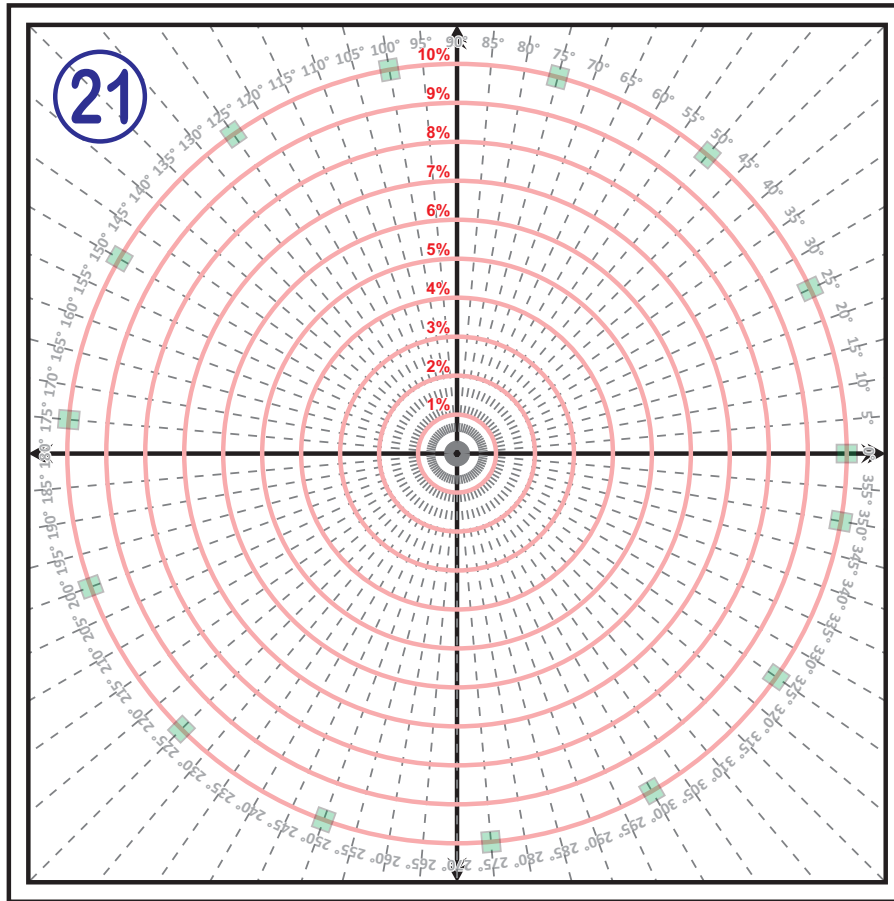
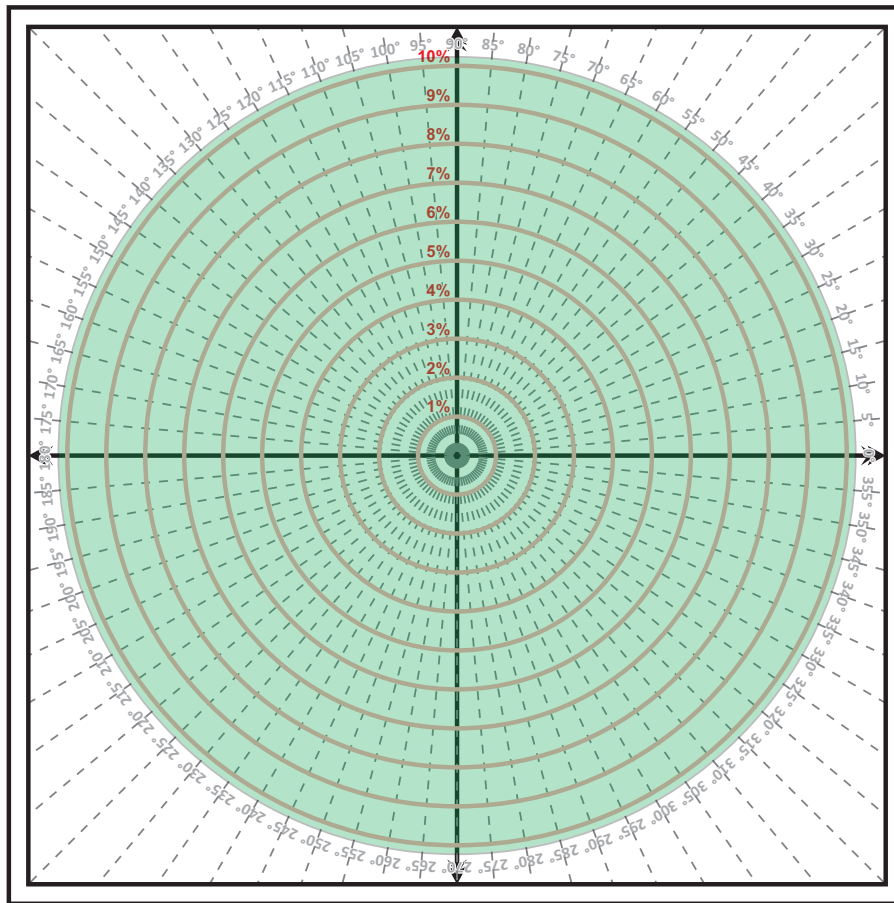


Figura 20. Grupo de medida, 21



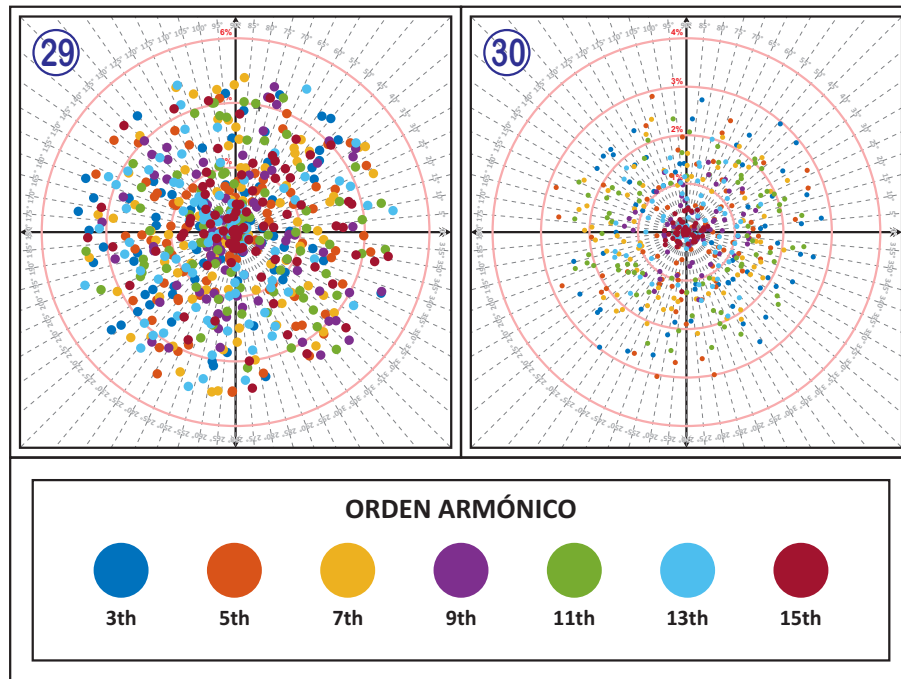
por la totalidad de medidas en cada componente armónica, esto quiere decir, que el grupo 22 corresponde a la totalidad de señales del tercer armónico, el grupo 23 a la totalidad de señales del quinto armónico y así hasta llegar al grupo 28 con la componente armónica decimoquinta. En la figura 21 se pueden ver la zona sombreada de donde se sacaron las medidas de los grupos 22 hasta el 28, como se puede observar, todo el plano esta sombreado y es precisamente por las características especiales de estos 7 grupos de medida.

Figura 21. Grupo de medida, 22 hasta 28



- El grupo 29 y 30 de medidas está compuesto por las señales estandarizadas de la UN 50160 UN (2015) y la IEEE Std 519-2014 IEE (2014) respectivamente. En la figura 22 se pueden ver la zona sombreada de donde se sacaron las medidas de los grupos 29 y 30.
- El grupo 31 de medidas está compuesto con 16 señales por armónico, para cada componente hay un porcentaje distinto en magnitud y los ángulos de fase correspondientes a cada una de las 16 señales que componen este grupo están distribuidos en el primer y tercer cuadrante.

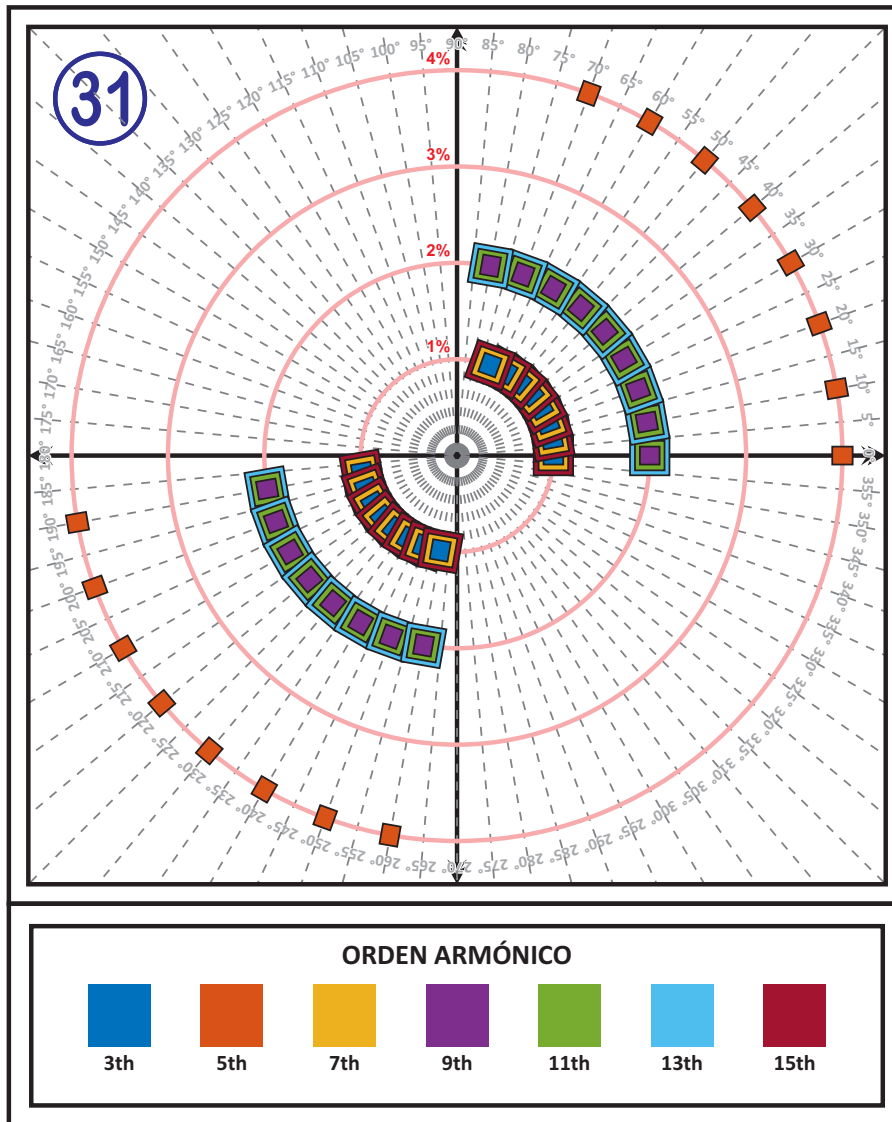
Figura 22. Grupo de medida, 29-30



En la figura 23 se pueden ver la zona sombreada de donde se sacaron las medidas del grupo 31.

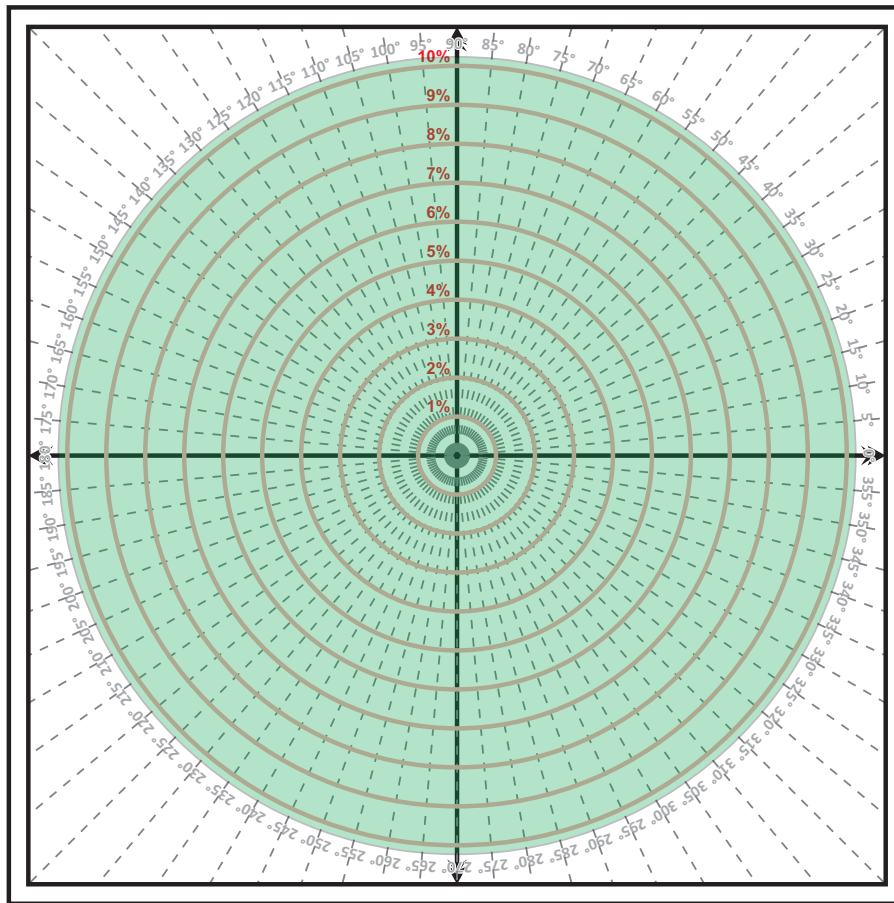
- El grupo 32 de medidas cuenta con la totalidad de señales tomadas, es decir con 5040 señales en cada carga. En la figura 24 se pueden observar todo el plano sombreado y es por la característica de este grupo.
- El grupo 33 de medidas cuenta con la totalidad de señales que tienen 4% en magnitud para las componentes armónicas, incluyendo todos los ángulos de fase medidos. En la figura 25 se pueden ver la zona sombreada de donde se sacaron las medidas del grupo 33.

Figura 23. Grupo de medida, 31



En la Tabla 16 del apéndice A, se puede ver un resumen con las características principales de cada grupo de medida.

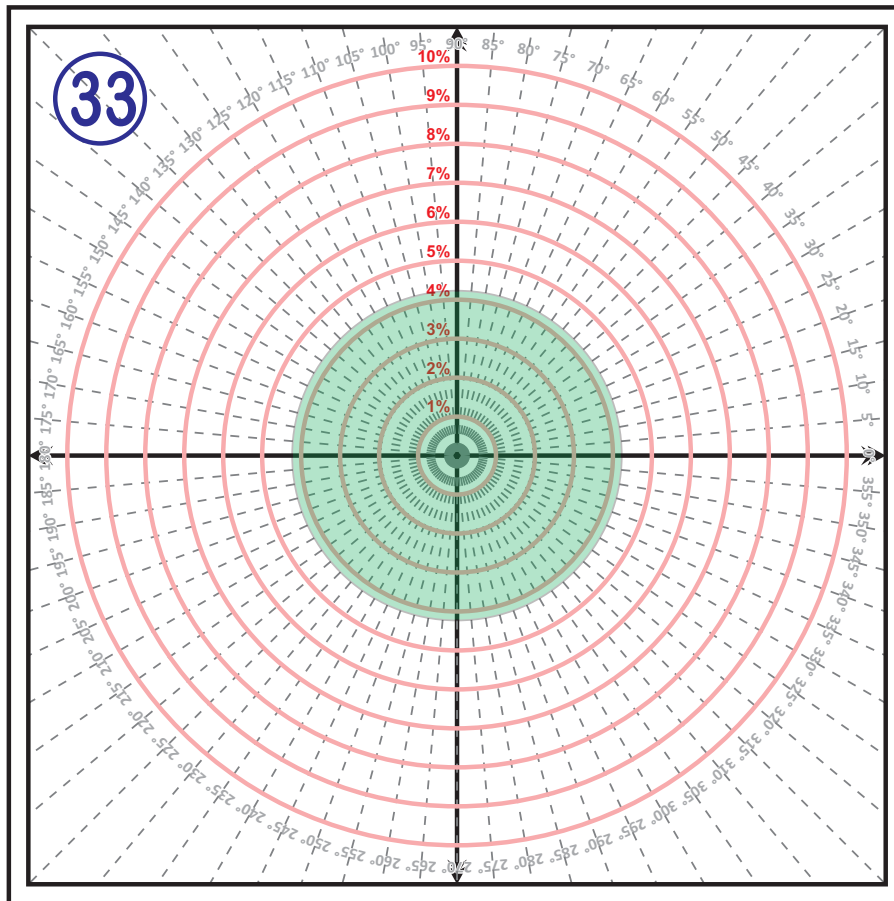
Figura 24. Grupo de medida, 32



### 3.4. Escenarios de prueba para el MEN

Una vez obtenido el Modelo Equivalente de Norton (MEN) para las carga en cada uno de los 33 grupos de medidas descritos en la sección 3.3, son evaluados en 209 puntos de operación diferentes, formados por los 6 puntos de operación de la red eléctrica de distribución local y las 203 señales que cumplen el estándar: UN50160, IEEE 519 del 2014, la flat-top, la pointed-top y la sinusoidal pura en tensión. Con los 33 MEN obtenidos a partir de los grupos de medidas, se calcula la corriente RMS no fundamental en los 209 puntos de operación, para determinar los erro-

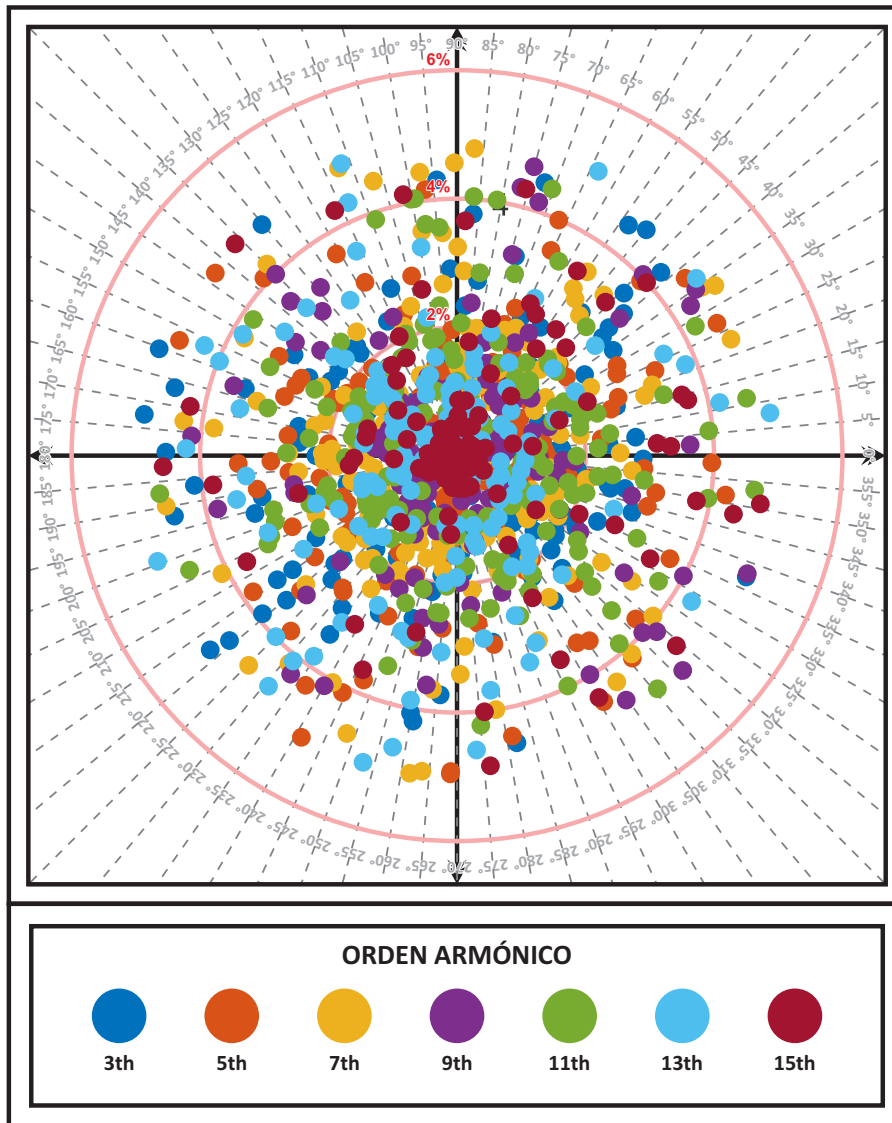
Figura 25. Grupo de medida, 33



res relativos porcentuales (Ver ecuación 26). Se realiza un análisis estadístico con el fin de reducir los grupos, filtrando los de menor error, para ello se seleccionan los que tengan menor porcentaje de error. Seguido de esto son determinados los siguientes parámetros: el error mínimo, máximo, el percentil 25, 50 y 75 de la corriente RMS no fundamental, finalmente con un histograma se seleccionan los grupos.

$$e = \frac{|V_{\text{Real}} - V_{\text{Aprox}}|}{V_{\text{Real}}} \times 100\% \quad (26)$$

Figura 26. Grupo de medidas para evaluar



### 3.5. Acondicionamiento de señales

Cada medida realizada está compuesta por dos vectores de datos en el tiempo correspondientes a las señales de tensión y corriente. Para la ejecución óptima del MEN es necesario tener en cuenta algunos detalles y modificaciones descritas a continuación:

- Cada señal muestreada de tensión y corriente debe transformarse al dominio de la frecuencia seleccionando únicamente las componentes armónicas impares hasta el quinceavo orden.
- Todas las señales deben tener el ángulo de fase de tensión fundamental en cero '0', manteniendo una referencia, para ello es necesario corregir los ángulos de fase de las componentes de tensión restantes y la totalidad de las componente de la señal de corriente.
- El cálculo del MEN se realiza con base a la sección 10.1 del artículo propuesto por A.B. Nassif, J. Yong, W. Xu en Nassif et al. (2010).
- Las tensiones y corrientes seleccionada para estimar el MEN, se deben normalizar a su valor nominal de tensión (120V) y de corriente (diferente para cada carga) de acuerdo a los descrito en Nassif et al. (2010).

#### 4. Análisis y resultados obtenidos

En este capítulo se calculan los errores relativos porcentuales en la corriente RMS no fundamental entre los valores medidos y los estimados con el modelo equivalente de Norton, los resultados de este procedimiento son la base para seleccionar los grupos de medida a los cuales se les aplica el estándar IEEE 1459 para calcular el error en las potencias.

##### 4.1. Cálculo de errores en la corriente RMS no fundamental $I_h$

Los errores relativos porcentuales en las corrientes RMS no fundamentales de las cargas 1, 2 y 3 se pueden ver en las tablas 18, 20, 22 del apéndice A, respectivamente, de las cuales se puede destacar que los errores de los grupos 22, 23, 24, 25, 26, 27 y 28, son excesivamente grandes, por lo cual no se tendrán en consideración para realizar el análisis de percentiles o histogramas.

Figura 27. Histograma de los percentiles 25, 50 y 75, para el Smartphone

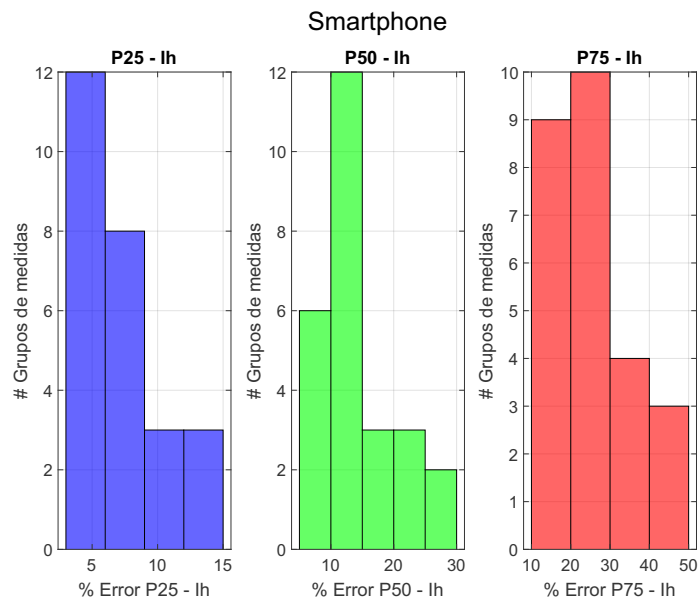


Figura 28. Histograma de los percentiles 25, 50 y 75, para la Lámpara LED 15W

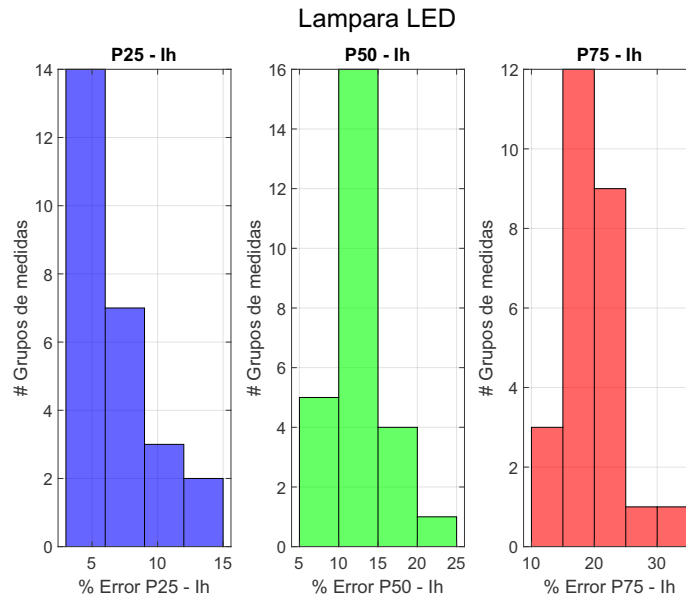
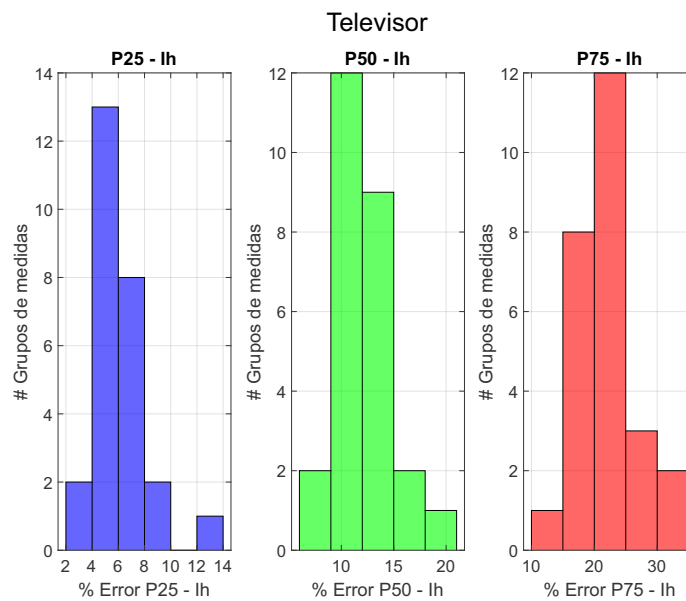


Figura 29. Histograma de los percentiles 25, 50 y 75, para el Televisor



En las figuras 27, 28, 29, se pueden observar los histogramas referentes a los percentiles 25, 50 y 75, de las cargas 1, 2 y 3, respectivamente. Dado que los percentiles brindan una medida

de posición con datos ordenados de menor a mayor, se va a considerar como favorable los grupos que pertenezcan al primer intervalo del percentil 75 en cada una de las cargas, el objetivo de esto es reducir la cantidad de grupos de medidas a las que mejor se ajusten los valores tomados y calculados en el laboratorio para la aplicación del estándar IEEE 1459, en este sentido en la Tabla 7 se pueden ver los grupos con menor porcentajes de error en la corriente RMS no fundamental.

Nota: El apéndice A, tiene las tablas 19, 21, 23, la cuales muestran la distribución de grupos por intervalos para cada histograma.

Tabla 7

*Grupos del primer intervalo del histograma para el percentil 75*

	<b>Grupos de medidas en el primer intervalo del histograma para el percentil 75</b>
<b>Carga 1, Smartphone</b>	<b>19, 32, 11, 14, 30, 4, 6, 33, 18</b>
<b>Carga 2, Lampara LED 15 W</b>	<b>4, 31, 1</b>
<b>Carga 3, Televisor</b>	<b>4</b>

Tabla 8

*Percentiles de porcentajes de error en la corriente RMS para el Smartphone*

<b>Grupo</b>	<b>Percentil 25</b>	<b>Percentil 50</b>	<b>Percentil 75</b>
<b>19</b>	4,5227	9,0840	15,1620
<b>32</b>	4,3547	8,9438	15,8611
<b>11</b>	4,5539	9,9937	15,9417
<b>14</b>	3,2112	8,1856	16,1386
<b>30</b>	3,7032	7,9646	16,5569
<b>4</b>	3,6910	9,2361	17,9172
<b>6</b>	4,6693	10,8296	19,6639
<b>33</b>	5,5778	11,5312	19,7501
<b>18</b>	7,3081	12,1494	19,9630

Tabla 9

*Percentiles de porcentajes de error en la corriente RMS para la Lampara LED*

<b>Grupo</b>	<b>Percentil 25</b>	<b>Percentil 50</b>	<b>Percentil 75</b>
<b>4</b>	4,4472	7,1001	13,0495
<b>31</b>	3,3853	7,7133	13,4429
<b>1</b>	5,0238	8,9515	14,2681

Tabla 10

*Percentiles de porcentajes de error en la corriente RMS para el Televisión*

<b>Grupo</b>	<b>Percentil 25</b>	<b>Percentil 50</b>	<b>Percentil 75</b>
<b>4</b>	3,8067	6,9500	12,1097

#### 4.2. Potencias según el Estándar IEEE 1459 en las cargas de estudio

El estándar IEEE 1459 está compuesto por las potencias descritas en la Tabla 11, esquemáticamente se puede ver en la Figura 30 la descomposición de la potencia aparente consumida por una carga. En este proyecto las potencias son estimadas para los grupos de medidas seleccionados de la Tabla 7 el análisis se centra únicamente en estos grupos ya que son los que están en el primer intervalo del percentil 75, cabe resaltar que el estándar IEEE-1459 calcula las siguientes potencias usando las componentes de tensión y la componente fundamental de corriente: Potencia aparente fundamental  $[S_1]$ , Potencia activa fundamental  $[P_1]$ , Potencia reactiva fundamental  $[Q_1]$ , Distorsión por tensión  $[D_v]$  y Factor de potencia fundamental, por tal motivo estas potencias no están en las tablas de los percentiles, pues su error porcentual es cero. Los resultados de los percentiles para cada carga se pueden ver a continuación:

Tabla 11

*Potencia para un sistema monofásico con formas de onda no sinusoidales*

Cantidad o indicador	Combinado	Fundamental	No fundamental
Aparente	$S$ (VA)	$S_1$ (VA)	$S_N, S_H$ (VA)
Activa	$P$ (W)	$P_1$ (W)	$P_H$ (W)
No Activa	$N$ (VAr)	$Q_1$ (VAr)	$D_I, D_V, D_H$ (VAr)

Figura 30. Descomposición de potencia

$$S^2 = S_1^2 + S_N^2$$

$$S_1^2 = P_1^2 + Q_1^2$$

$$S_N^2 = D_I^2 + D_V^2 + S_H^2$$

$$S_H^2 = P_H^2 + D_H^2$$

Tabla 12

*Percentiles de porcentajes de error de potencias IEEE-1459 para el Smartphone (Parte 1)*

Percentiles del estándar IEEE-1459 en el Smartphone							
Potencia aparente total [S]				Potencia activa total [W]			
Grupo	P25	P50	P75	Grupo	P25	P50	P75
19	2,9329	5,9570	10,6268	19	0,1445	0,3689	1,0055
32	2,7356	6,3958	10,7768	32	0,1524	0,4047	1,1046
11	3,1859	6,7955	10,9968	11	0,1677	0,5048	1,3434
14	2,1823	5,6062	11,5608	14	0,2180	0,4328	1,1387
30	2,5527	5,3289	10,1386	30	0,1591	0,3710	0,8366
4	2,6359	6,3143	12,1867	4	0,2889	0,5452	1,1887
6	3,1131	7,1079	13,0149	6	0,2420	0,5678	1,1992
33	3,7738	7,6841	13,7895	33	0,1699	0,3530	1,1861
18	4,8792	8,2797	12,6898	18	0,2031	0,4895	1,1286

Tabla 13

*Percentiles de porcentajes de error de potencias IEEE-1459 para el Smartphone (Parte 2)*

<b>Potencia aparente no fundamental [<math>S_N</math>]</b>				<b>Potencia no activa [<math>N</math>]</b>			
<b>Grupo</b>	<b>P25</b>	<b>P50</b>	<b>P75</b>	<b>Grupo</b>	<b>P25</b>	<b>P50</b>	<b>P75</b>
19	4,5195	9,0594	15,1545	19	4,4808	8,9583	14,9744
32	4,3485	8,9208	15,8199	32	4,3990	8,7626	15,4829
11	4,5517	9,9772	15,9278	11	4,5429	9,6053	16,2242
14	3,2049	8,1822	16,0956	14	2,9688	8,0371	15,9625
30	3,7019	7,9626	16,5278	30	3,6052	7,9133	16,0552
4	3,6887	9,2317	17,8776	4	3,4976	9,0597	17,3309
6	4,6667	10,8199	19,6522	6	4,6304	10,4869	19,3359
33	5,5684	11,5196	19,6955	33	5,5468	11,1894	19,4238
18	7,3018	12,1230	19,9573	18	7,4591	11,8057	19,2795

<b>Potencia aparente armónica [<math>S_h</math>]</b>				<b>Potencia no fundamental [<math>P_h</math>]</b>			
<b>Grupo</b>	<b>P25</b>	<b>P50</b>	<b>P75</b>	<b>Grupo</b>	<b>P25</b>	<b>P50</b>	<b>P75</b>
19	4,5227	9,0840	15,1620	19	10,3034	26,7593	48,0453
32	4,3547	8,9438	15,8611	32	10,1053	28,2927	52,0364
11	4,5539	9,9937	15,9417	11	11,1360	30,1936	85,4562
14	3,2112	8,1856	16,1386	14	15,5432	32,4401	56,4893
30	3,7032	7,9646	16,5569	30	9,3843	24,4403	49,3938
4	3,6910	9,2361	17,9172	4	17,7801	36,6242	70,0551
6	4,6693	10,8296	19,6639	6	17,1098	37,0771	60,9875
33	5,5778	11,5312	19,7501	33	12,9711	28,8697	55,6596
18	7,3081	12,1494	19,9630	18	10,8189	28,2032	61,8474

<b>Distorsión por corriente [<math>D_I</math>]</b>				<b>Distorsión armónica [<math>D_h</math>]</b>			
<b>Grupo</b>	<b>P25</b>	<b>P50</b>	<b>P75</b>	<b>Grupo</b>	<b>P25</b>	<b>P50</b>	<b>P75</b>
19	4,5227	9,0840	15,1620	19	4,1093	8,5366	14,6677
32	4,3547	8,9438	15,8611	32	3,7373	8,5697	16,6156
11	4,5539	9,9937	15,9417	11	5,2485	10,2116	18,7727
14	3,2112	8,1856	16,1386	14	3,2993	8,5738	17,5800
30	3,7032	7,9646	16,5569	30	3,8132	7,5191	16,1566
4	3,6910	9,2361	17,9172	4	4,2131	9,0906	19,5848
6	4,6693	10,8296	19,6639	6	4,1115	9,4604	19,6485
33	5,5778	11,5312	19,7501	33	5,8558	11,9673	22,2077
18	7,3081	12,1494	19,9630	18	7,2888	11,4818	18,7569

Tabla 14

*Percentiles de porcentajes de error de potencias IEEE-1459 para la lampara LED de 15 [W]*

Percentiles del estándar IEEE-1459 en la lampara 15 [W]							
Potencia aparente total [S]				Potencia activa total [W]			
Grupo	P25	P50	P75	Grupo	P25	P50	P75
4	2,6261	4,6725	8,2194	4	0,1555	0,3684	0,7540
31	2,2089	4,7985	8,2838	31	0,0864	0,2534	0,6099
1	3,0853	5,6537	8,9295	1	0,1298	0,3686	0,7280

Potencia aparente no fundamental [ $S_N$ ]				Potencia no activa [N]			
Grupo	P25	P50	P75	Grupo	P25	P50	P75
4	4,4447	7,0943	13,0229	4	3,9302	6,8514	12,3747
31	3,3826	7,7095	13,4181	31	3,2017	7,2702	12,4838
1	5,0207	8,9427	14,2647	1	4,5456	8,1718	13,3096

Potencia aparente armónica [ $S_h$ ]				Potencia no fundamental [ $P_h$ ]			
Grupo	P25	P50	P75	Grupo	P25	P50	P75
4	4,4472	7,1001	13,0495	4	13,6064	28,1264	69,0706
31	3,3853	7,7133	13,4429	31	7,2423	19,5804	48,7568
1	5,0238	8,9515	14,2681	1	12,3888	24,3285	64,0785

Distorsión por corriente [ $D_I$ ]				Distorsión armónica [ $D_h$ ]			
Grupo	P25	P50	P75	Grupo	P25	P50	P75
4	4,4472	7,1001	13,0495	4	4,7290	9,0416	14,4766
31	3,3853	7,7133	13,4429	31	3,6704	7,9478	15,8171
1	5,0238	8,9515	14,2681	1	5,2430	9,3378	16,2665

Tabla 15

*Percentiles de porcentajes de error de potencias IEEE-1459 para el Televisor*

Percentiles del estándar IEEE-1459 en el Televisor							
Potencia aparente total [ $S$ ]				Potencia activa total [ $W$ ]			
Grupo	P25	P50	P75	Grupo	P25	P50	P75
4	2,3700	4,8393	8,7274	4	0,2527	0,4819	1,1427
Potencia aparente no fundamental [ $S_N$ ]				Potencia no activa [ $N$ ]			
Grupo	P25	P50	P75	Grupo	P25	P50	P75
4	3,8007	6,9470	12,1015	4	3,4052	6,7175	11,9184
Potencia aparente armónica [ $S_h$ ]				Potencia no fundamental [ $P_h$ ]			
Grupo	P25	P50	P75	Grupo	P25	P50	P75
4	3,8067	6,9500	12,1097	4	16,3183	31,3519	58,2961
Distorsión por corriente [ $D_I$ ]				Distorsión armónica [ $D_h$ ]			
Grupo	P25	P50	P75	Grupo	P25	P50	P75
4	3,8067	6,9500	12,1097	4	3,1936	6,7735	12,5436

## 5. Recomendaciones

A pesar que se cuentan con 33 grupos de medidas, como se ve en la Tabla 16 del anexo 1, se considera que son muy pocos grupos, pues la base de datos cuenta con más de 5 mil señales de tensión y corriente en cada carga, sin embargo se seleccionaron únicamente estos grupos con la intención de cubrir los sectores más importantes y relevantes del espacio muestral, es por eso que se le dio un criterio diferente para cada uno tal como se ve en el Capítulo 2, aún así las señales que los integran son seleccionadas aleatoriamente bajo los parámetros dados en la Tabla 16, es mas, los grupos del 22 al 28 correspondientes a medidas tomadas en un único armónico, se omitieron del análisis de percentiles debido al aumento abrupto en los porcentajes de error.

## **6. Trabajo futuro**

Los resultados obtenidos y la cantidad de datos almacenados abren la posibilidad para que en futuros proyectos de investigación se enfoque en la optimización del modelo, encontrando la cantidad y las características adecuadas de medidas para generar el MEN con menor error posible.

## 7. Conclusiones

A continuación, se presentan las conclusiones y observaciones del estudio realizado.

- Se seleccionaron 3 cargas para el desarrollo de este proyecto de grado las cuales son: una Lámpara LED, un celular (Smartphone) y un Televisor. La selección se hizo teniendo en cuenta tres aspectos importantes: cargas no lineales e invariantes en el tiempo, cargas de uso residencial y de uso común en los hogares colombianos.
- Distorsionar la señal de tensión con una única componente armónica no es suficiente para ver el comportamiento real de la carga, pues en las redes eléctricas cada carga está sometida a diferentes componentes armónicas, con lo cual para hacer un análisis real del comportamiento de la carga y de las distorsiones que generan, es necesario alimentar las cargas con señales compuestas de diversos armónicos, ya que un solo armónico a la vez no brinda la información suficiente, esto se puede confirmar con los porcentajes de error vistos en las Tablas 18, 20, 22, del anexo 1, ya que como se observa los porcentajes de error aumentan abruptamente cuando se hace uso de los grupo del 22 al 28 correspondientes a medidas tomadas en un único armónico, por el contrario en los grupos donde existe la presencia de más de dos componentes armónicas los porcentajes de error disminuyen, como por ejemplo los grupos 29, 30, 32 y 33.

- Se asignaron 5243 escenarios de evaluación por carga para la obtención de las señales medidas de tensión y su respuesta en corriente. Resaltando que 5040 de estos escenarios corresponden al barrido principal y los 203 restantes corresponden a escenarios estandarizados descritos en el Capítulo 2.
  
- Se entrega una aplicación JAVA que tiene almacenada las señales de tensión y corriente medidas en el laboratorio, las cuales pueden ser utilizadas para posteriores trabajos.
  
- En total se escogieron 33 grupos de medidas, derivados de los 5243 escenarios de evaluación, para representar cada carga (ver Capítulo 2). Posteriormente, se seleccionaron los grupos que estuvieran en el intervalo con menor porcentaje de error al cálculo de la magnitud de la corriente no fundamental  $I_h$  utilizando el Modelo Equivalente de Norton (MEN) descrito en Nassif et al. (2010) y los valores medidos en laboratorio.
  
- El asignar distintos escenarios de evaluación permitió analizar el desempeño del MEN en diferentes zonas de operación, a pesar que en la recopilación de datos de las cargas se tomaron pasos de 5 grados sexagesimales y se aumentó el porcentaje de la magnitud en cada componente armónica que acompañaba la fundamental fue necesario usar las medidas estandarizadas de la IEEE 519-2014 y las UN 50160 para tener escenarios más parecidos a las señales emitidas en los sistemas de distribución.

- Se calcularon las potencias del estándar IEEE 1459 en los 209 puntos de operación para los 14 grupos con menor porcentaje de error en el percentil 75 de la magnitud de la corriente no fundamental  $I_h$ , 9 grupos para el smartphone, 3 para la lámpara LED y 1 para el televisor. Se calcula los porcentajes de error relativo para cada potencia del estándar IEEE 1459 en los puntos de operación descritos anteriormente, obteniendo la propagación del error a causa de la corriente  $I_h$  calculada con el MEN Nassif et al. (2010).
- Los histogramas creados a partir del percentil 75 muestran varios grupos de medidas en el primer intervalo, sin embargo existe un grupo que es común para las tres cargas, tal como se ve en las Tablas 7, el grupo común es el 4 cuyas características son 49 medidas seleccionadas en el cuarto cuadrante (Ver Tablas 16 del anexo 1)
- Al estudiar los resultados obtenidos por cada grupo en cada punto de operación evaluado, se tomó la decisión de hacer uso de los percentiles e histogramas en el cálculo de error relativo porcentual de la corriente RMS no fundamental  $|I_h|$ , pues los resultados entre un grupo de medidas y otro no difieren mucho, como se ve en las Tablas 18, 20 y 22, sin contar los grupos del 22 al 28 correspondientes a medidas tomadas en un único armónico.
- Los errores en la estimación de potencias según el estándar IEEE-1459 para las cargas de

estudio varían de acuerdo con el grupo de medidas que generó el MEN correspondiente, principalmente por la corriente no fundamental  $I_h$ , esto es porque el modelo equivalente de Norton da como respuesta la misma (ver Ecuación 1), sin embargo para cada potencia calculada no se cuenta con el mismo porcentaje de error, debido a que para el cálculo de cada potencia se cuenta con componentes de tensiones y corrientes, esto hace que el error se afecte, pues el error en potencia como se puede ver en las Tablas 12, 13, 14 y 15, aumenta o disminuye con respecto a los porcentajes de error de la corriente no fundamental  $I_h$  en cada carga y grupo de medidas.

Al comparar los resultados obtenidos se determina que los grupos con un porcentaje menor al 20% en el percentil 75 de la magnitud de corriente no fundamental  $I_h$ , se caracterizan porque el modelo equivalente de Norton está calculado con las señales de tensión formadas por las componentes armónicas con ángulos de fase ubicados en el primer y tercer cuadrantes y con porcentajes en magnitud menores al 4%.

### Referencias Bibliográficas

- (10/06/2016). Los televisores surcoreanos ya están en más del 50colombianos. *Revista Dinero, tecnología.*
- (12/14/2019). Estos son los aparatos que prefieren comprar los colombianos. *Revista Dinero, consumo.*
- (2014). IEEE recommended practice and requirements for harmonic control in electric power systems. *IEEE Std 519-2014 (Revision of IEEE Std 519-1992)*, pages 1–29.
- (2015). Características de la tensión suministrada por las redes generales de distribución.
- Abdelkader, S., Abdel-Rahman, M. H., and Osman, M. G. (2001). A norton equivalent model for nonlinear loads. pages 63–67.
- Ardila, Á. M. (2007). *Física experimental*. Universidad Nacional de Colombia.
- Carvajal, G. M., Plata, G. O., Picon, W. G., and Velasco, J. C. C. (2014). Investigation of phase shifting transformers in distribution systems for harmonics mitigation. pages 1–5.
- Dar, M. A. (2016). Role of smartphone in rural development: A case study of kashmir. In *2016 IEEE Technological Innovations in ICT for Agriculture and Rural Development (TIAR)*, pages 205–208. IEEE.

- Hernández Moreno, S. (2015). Análisis comparativo por ciclo de vida de tres tipos de luminarias empleadas en los interiores de edificios. *Nova scientia*, 7(14):538–559.
- Madrid, Z. and Marcos, M.-C. (2013). La televisión en un mundo conectado e interactivo: hacia una tv centrada en el espectador. *Enl@ ce: Revista Venezolana de Información, Tecnología y Conocimiento*, 10(3):95–113.
- Muñoz, N., Villada, F., and Cadavid, D. R. (2012). Analisis de los flujos de potencia de sistemas eléctricos y su interpretación física. *Información tecnológica*, 23(5):57–68.
- Nassif, A. B., Yong, J., and Xu, W. (2010). Measurement-based approach for constructing harmonic models of electronic home appliances. *Transmission Distribution IET Generation*, 4(3):363–375.
- Ogunjuyigbe, A., Ayodele, T., Idika, V., and Ojo, O. (2017). Effect of lamp technologies on the power quality of electrical distribution network. In *2017 IEEE PES PowerAfrica*, pages 159–163. IEEE.
- Portilla, F. and Saussure, C. (2016). El uso del smartphone como herramienta para la búsqueda de información en los estudiantes de pregrado de educación de una universidad de lima metropolitana. *Educación*, 25(49):29–44.
- Ribeiro, P. F., Leitão, J. J. A. L., Lira, M. M. S., Macedo, J. R., Grandi, A. L. Z., Testa, A., Langella, R., Cobben, J. F. G., and Browne, N. R. (2011). Harmonic distortion during the 2010 Fifa world cup. pages 1–8.

- Ruggero Ríos, B. and Sánchez Quintana, M. (2014). Incidences nonlinear load distribution transformer. *Revista Científica de la UCSA*, 1(1):33–51.
- Ruiz-Palmero, J., Sánchez-Rodríguez, J., and Trujillo-Torres, J. M. (2016). Utilización de internet y dependencia a teléfonos móviles en adolescentes. *Revista Latinoamericana de Ciencias Sociales, Niñez y Juventud*, 14(2):1357–1369.
- Suárez, J.A.; Di Mauro, G. A. D. A. C. (2010). IEEE standard definitions for the measurement of electric power quantities under sinusoidal, nonsinusoidal, balanced, or unbalanced conditions. *IEEE Std 1459-2010 (Revision of IEEE Std 1459-2000)-Redline*, pages 1–52.
- Thunberg, E. and Soder, L. (1999). A norton approach to distribution network modeling for harmonic studies. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 14(1):272–277.
- Van Weezel, A. and Benavides, C. (2009). Uso de teléfonos móviles por los jóvenes. *Cuadernos. info*, (25):5–14.
- Watson, N. R., Scott, T. L., and Hirsch, S. J. J. (2009). Implications for distribution networks of high penetration of compact fluorescent lamps. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 24(3):1521–1528.
- Yong, J., Chen, L., Nassif, A. B., and Xu, W. (2010). A frequency-domain harmonic model for compact fluorescent lamps. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 25(2):1182–1189.

## Apéndices

### Apéndice A. Tablas de los grupos de medida

Tabla 16

*Descripción de los grupos de medida (Parte 1)*

<b>Grupo de medida</b>	<b>Descripción general de los grupos</b>
<b>1</b>	7 medidas por Armónico con ángulo de fase menor a $90^\circ$
<b>2</b>	7 medidas por Armónico con ángulo de fase entre $90^\circ$ y $180^\circ$
<b>3</b>	7 medidas por Armónico con ángulo de fase entre $180^\circ$ y $270^\circ$
<b>4</b>	7 medidas por Armónico con ángulo de fase entre $270^\circ$ y $360^\circ$
<b>5</b>	7 medidas por Armónico con el 3 % en magnitud
<b>6</b>	7 medidas por Armónico con el 8 % magnitud
<b>7</b>	7 medidas por Armónico con el 5 % magnitud
<b>8</b>	7 medidas por Armónico con el 1 % magnitud
<b>9</b>	7 medidas por Armónico: Aleatorio-1
<b>10</b>	7 medidas por Armónico: Aleatorio-2
<b>11</b>	9 medidas por Armónico con ángulo de fase menor a $90^\circ$
<b>12</b>	9 medidas por Armónico con ángulo de fase entre $90^\circ$ y $180^\circ$
<b>13</b>	9 medidas por Armónico con ángulo de fase entre $180^\circ$ y $270^\circ$
<b>14</b>	9 medidas por Armónico con ángulo de fase entre $270^\circ$ y $360^\circ$
<b>15</b>	9 medidas por Armónico con el 1 % en magnitud

Tabla 17

*Descripción de los grupos de medida (Parte 2)*

<b>16</b>	9 medidas por Armónico con el 3 % magnitud
<b>17</b>	9 medidas por Armónico con el 5 % magnitud
<b>18</b>	9 medidas por Armónico con el 10 % magnitud
<b>19</b>	9 medidas por Armónico: Aleatorio-3
<b>20</b>	9 medidas por Armónico: Aleatorio-4
<b>21</b>	15 medidas por Armónico, Magnitud constante con ángulos de fase en el cuadrante I y III
<b>22</b>	Total medidas de la componente armónica 3
<b>23</b>	Total medidas de la componente armónica 5
<b>24</b>	Total medidas de la componente armónica 7
<b>25</b>	Total medidas de la componente armónica 9
<b>26</b>	Total medidas de la componente armónica 11
<b>27</b>	Total medidas de la componente armónica 13
<b>28</b>	Total medidas de la componente armónica 15
<b>29</b>	100 señales estandarizadas tipo UNE-EN 50160
<b>30</b>	100 señales estandarizadas tipo IEEE Std 519-2014
<b>31</b>	16 medidas por Armónico, con mayor componente en el armónico 5 y ángulos de fase en el cuadrante I y III
<b>32</b>	Totalidad de señales del barrido principal
<b>33</b>	Componentes armónicas con magnitudes desde el 1 % hasta el 4 % y todos los ángulos de fase

Tabla 18

*Errores relativos porcentuales en la corriente RMS no fundamental para el Smartphone*

<b>Errores relativos porcentuales de la carga 1, Smartphone</b>					
<b>Grupo</b>	<b>Min</b>	<b>Max</b>	<b>P25</b>	<b>P50</b>	<b>P75</b>
<b>1</b>	0,0411	75,9956	9,0599	16,6945	27,1966
<b>2</b>	0,0921	112,6915	6,4420	13,8860	25,7020
<b>3</b>	0,0064	119,9295	8,5618	20,5282	35,5468
<b>4</b>	0,0765	77,3567	3,6910	9,2361	17,9172
<b>5</b>	0,0113	158,1281	10,3643	21,4573	40,3487
<b>6</b>	0,1333	76,5835	4,6693	10,8296	19,6639
<b>7</b>	0,0148	125,0752	5,3618	13,7642	25,5517
<b>8</b>	0,7805	160,2185	12,6137	26,4639	46,2477
<b>9</b>	0,0583	111,5957	5,8716	11,9642	21,7958
<b>10</b>	0,0443	105,4728	6,1032	11,5666	21,4004
<b>11</b>	0,0827	66,5324	4,5539	9,9937	15,9417
<b>12</b>	0,1321	127,2142	7,4084	16,0798	27,7494
<b>13</b>	0,0376	110,9714	7,3371	14,9258	26,5971
<b>14</b>	0,0744	77,5955	3,2112	8,1856	16,1386
<b>15</b>	0,0540	174,9523	12,2512	26,3589	46,4147
<b>16</b>	0,1740	158,4630	9,3710	19,6821	38,5710
<b>17</b>	0,0090	126,5064	6,0518	14,1107	26,7348
<b>18</b>	0,0553	51,1538	7,3081	12,1494	19,9630
<b>19</b>	0,0400	91,7914	4,5227	9,0840	15,1620
<b>20</b>	0,1117	95,9219	5,5565	13,0786	21,2813
<b>21</b>	0,1142	132,4403	5,4713	13,9213	29,6055
<b>22</b>	15,3893	36641,3608	6318,2728	8985,8025	13364,7943
<b>23</b>	0,6747	18594,1496	4721,7281	6688,9944	9459,5714
<b>24</b>	12,4758	17628,1430	3977,2643	5723,5505	8512,7279
<b>25</b>	9,5438	14417,1897	3497,7306	5343,4897	7385,6853
<b>26</b>	7,7560	40798,6795	5801,8632	9477,3576	14933,0284
<b>27</b>	7,8848	14125,1400	3043,9282	4488,2598	6414,6634
<b>28</b>	40,8800	84110,8652	8618,1280	14379,8150	22047,4280
<b>29</b>	0,0358	152,2975	6,7849	13,6861	30,1779
<b>30</b>	0,0856	65,4575	3,7032	7,9646	16,5569
<b>31</b>	0,3200	141,6396	12,1793	20,7382	39,0130
<b>32</b>	0,0350	86,9474	4,3547	8,9438	15,8611
<b>33</b>	0,0028	96,2616	5,5778	11,5312	19,7501

Tabla 19

*Distribución de grupos según los percentiles. Smartphone*

<b>Grupo</b>	<b>Intervalos Percentil 25</b>	<b>% Error</b>	<b>Intervalos Percentil 50</b>	<b>% Error</b>	<b>Intervalos Percentil 75</b>	<b>% Error</b>	
<b>19</b>	<b>Intervalo 1 12 Grupos</b>	4,5227	<b>Intervalo 1 6 Grupos</b>	9,0840	<b>Intervalo 1 9 Grupos</b>	15,1620	
<b>32</b>		4,3547		8,9438		15,8611	
<b>11</b>		4,5539		9,9937		15,9417	
<b>14</b>		3,2112		8,1856		16,1386	
<b>30</b>		3,7032		7,9646		16,5569	
<b>4</b>		3,6910		9,2361		17,9172	
<b>6</b>		4,6693	<b>Intervalo 2 12 Grupos</b>	10,8296		19,6639	
<b>33</b>	5,5778	11,5312		19,7501			
<b>18</b>	7,3081	12,1494		19,9630			
<b>20</b>		5,5565		13,0786	<b>Intervalo 2 10 Grupos</b>	21,2813	
<b>10</b>	6,1032	11,5666	21,4004				
<b>9</b>	5,8716	11,9642	21,7958				
<b>7</b>	<b>Intervalo 2 8 Grupos</b>	5,3618		13,7642		25,5517	
<b>2</b>		6,4420	13,8860	25,7020			
<b>13</b>		7,3371	14,9258	26,5971			
<b>17</b>		6,0518	14,1107	26,7348			
<b>1</b>		9,0599	16,6945	27,1966			
<b>12</b>		7,4084	16,0798	27,7494			
<b>21</b>			5,4713	<b>Intervalo 3 3 Grupos</b>	13,9213		29,6055
<b>29</b>		6,7849	13,6861		30,1779		
<b>3</b>	<b>Intervalo 3 3 Grupos</b>	8,5618		20,5282		35,5468	
<b>16</b>		9,3710	<b>Intervalo 4 3 Grupos</b>	19,6821	38,5710		
<b>31</b>		12,1793		20,7382	39,0130		
<b>5</b>	<b>Intervalo 4 3 Grupos</b>	10,3643		21,4573	<b>Intervalo 4 3 Grupos</b>	40,3487	
<b>8</b>		12,6137	<b>Intervalo 5 2 Grupos</b>	26,4639		46,2477	
<b>15</b>		12,2512		26,3589		46,4147	

Tabla 20

*Errores relativos porcentuales en la corriente RMS no fundamental para la lampara LED 15 W*

<b>Grupo</b>	<b>Min</b>	<b>Max</b>	<b>P25</b>	<b>P50</b>	<b>P75</b>
<b>1</b>	0,0129	55,6571	5,0238	8,9515	14,2681
<b>2</b>	0,0100	63,3140	6,2548	10,9857	18,3854
<b>3</b>	0,0408	65,3540	4,8585	10,5550	16,5300
<b>4</b>	0,3593	39,7165	4,4472	7,1001	13,0495
<b>5</b>	0,1278	79,8316	4,3439	10,4710	17,2583
<b>6</b>	0,5660	51,4465	11,3042	18,3590	27,3641
<b>7</b>	0,1405	51,1252	5,7066	11,3147	19,4484
<b>8</b>	0,2104	96,6899	5,8087	10,6369	19,2336
<b>9</b>	0,2049	44,6620	7,4267	13,9412	21,7065
<b>10</b>	0,0123	48,4975	6,4869	14,4636	22,1488
<b>11</b>	0,5201	47,1487	5,7059	12,3501	17,4153
<b>12</b>	0,0966	65,7216	6,9385	11,8371	20,6439
<b>13</b>	0,0977	72,8559	5,3169	11,3785	19,2114
<b>14</b>	0,1829	51,3367	6,1141	11,7305	19,4778
<b>15</b>	0,0122	88,4947	5,0244	10,0507	17,5452
<b>16</b>	0,0078	72,4894	4,3331	9,3308	17,2656
<b>17</b>	0,1980	51,8580	5,3842	11,8981	20,0801
<b>18</b>	0,3275	53,1143	14,4706	22,8720	30,7810
<b>19</b>	0,2117	40,7259	10,4372	16,3162	23,4946
<b>20</b>	0,1825	45,7777	8,9377	16,3837	23,9184
<b>21</b>	0,1904	66,7923	8,2794	13,6219	20,7389
<b>22</b>	71,1392	13317,4076	2598,1493	3507,7394	5170,2301
<b>23</b>	53,4681	14188,0693	3256,3007	4587,3393	6059,1823
<b>24</b>	64,9416	12205,9003	2291,3740	3569,7031	5317,8364
<b>25</b>	62,8550	7910,5893	2355,7643	3198,9791	4534,8636
<b>26</b>	56,8721	8498,8215	2080,0156	2978,7715	4569,6668
<b>27</b>	62,8732	9804,4351	2157,4787	2836,4380	4065,7799
<b>28</b>	60,3303	9617,8243	2131,4439	3026,2458	4599,2971
<b>29</b>	0,1260	64,9325	5,5899	11,0182	17,2727
<b>30</b>	0,4550	42,5851	13,1961	18,2097	23,5583
<b>31</b>	0,0227	73,3443	3,3853	7,7133	13,4429
<b>32</b>	0,2925	45,3256	9,7721	14,8705	22,8392
<b>33</b>	0,1300	68,6644	4,6335	9,1446	16,4575

Tabla 21

*Distribución de grupos según los percentiles. Lámpara LED 15W*

Grupo	Intervalos Percentil 25	% Error	Intervalos Percentil 50	% Error	Intervalos Percentil 75	% Error	
4	<b>Intervalo 1 14 Grupos</b>	4,4472	<b>Intervalo 1 5 Grupos</b>	7,1001	<b>Intervalo 1 3 Grupos</b>	13,0495	
31		3,3853		7,7133		13,4429	
1		5,0238		8,9515		14,2681	
33		4,6335		9,1446	<b>Intervalo 2 12 Grupos</b>	16,4575	
3		4,8585		10,5550		16,5300	
5		4,3439	<b>Intervalo 2 16 Grupos</b>	10,4710		17,2583	
16		4,3331		9,3308	17,2656		
29		5,5899		11,0182	17,2727		
11		5,7059		12,3501	17,4153		
15		5,0244		10,0507	17,5452		
2		6,2548		10,9857	18,3854		
13		5,3169		11,3785	19,2114		
8		5,8087		10,6369	19,2336		
7		5,7066		11,3147	19,4484		
14	<b>Intervalo 2 7 Grupos</b>	6,1141			11,7305		19,4778
17			5,3842	11,8981	<b>Intervalo 3 9 Grupos</b>	20,0801	
12			6,9385	11,8371		20,6439	
21			8,2794	13,6219		20,7389	
9			7,4267	13,9412		21,7065	
10			6,4869	14,4636		22,1488	
32			9,7721	14,8705		22,8392	
19		<b>Intervalo 3 3 Grupos</b>	10,4372	<b>Intervalo 3 4 Grupos</b>		16,3162	
30	13,1961		18,2097			23,5583	
20	8,9377		16,3837		23,9184		
6	<b>Intervalo 4 2 Grupos</b>	11,3042		18,3590	<b>Intervalo 4 1 Grupo</b>	27,3641	
18		14,4706	<b>Intervalo 4 1 Grupo</b>	22,8720		<b>Intervalo 5 1 Grupo</b>	30,7810

Tabla 22

*Errores relativos porcentuales en la corriente RMS no fundamental para el Televisor*

<b>Grupo</b>	<b>Min</b>	<b>Max</b>	<b>P25</b>	<b>P50</b>	<b>P75</b>
<b>1</b>	0,0051	67,9837	3,0489	7,7073	15,3636
<b>2</b>	0,0275	111,7089	5,8790	14,5758	23,1565
<b>3</b>	0,0281	106,2433	5,6537	12,5550	23,8321
<b>4</b>	0,0732	63,4672	3,8067	6,9500	12,1097
<b>5</b>	0,0027	100,4177	6,1701	11,8559	24,2929
<b>6</b>	0,0145	48,5974	9,2702	15,9018	25,6813
<b>7</b>	0,2386	74,4938	5,1743	11,4891	20,2130
<b>8</b>	0,1279	119,6087	7,1507	15,2905	30,7200
<b>9</b>	0,0733	85,8485	5,3898	11,9822	18,0378
<b>10</b>	0,0257	81,9059	5,3123	11,1484	18,0885
<b>11</b>	0,0554	70,9640	4,6671	9,0355	16,5327
<b>12</b>	0,0544	122,4802	6,6992	14,9350	25,5602
<b>13</b>	0,0300	96,6416	5,7296	11,7432	21,7837
<b>14</b>	0,1127	75,1710	5,0939	10,4076	16,6803
<b>15</b>	0,0887	115,8576	7,4773	14,2291	30,6535
<b>16</b>	0,0192	95,6797	5,3841	10,8106	22,3687
<b>17</b>	0,0101	77,8661	4,7262	11,6977	20,6633
<b>18</b>	0,2385	49,5260	13,0603	20,2962	27,1298
<b>19</b>	0,3213	65,6835	7,0086	13,8739	18,4205
<b>20</b>	0,3211	65,3245	6,1759	12,8319	20,8465
<b>21</b>	0,0222	90,8060	6,5761	12,0607	19,9951
<b>22</b>	4,2495	11718,0947	2219,0609	3045,4914	4803,5250
<b>23</b>	0,7207	10966,8518	2545,2208	3612,4971	5641,8742
<b>24</b>	0,6881	9030,4684	1847,5228	2688,6504	3923,6842
<b>25</b>	2,3811	6884,9737	1920,7776	2798,3194	3733,2175
<b>26</b>	4,7640	6479,6011	1698,5109	2454,4541	3586,5182
<b>27</b>	4,0963	7036,4603	1455,8177	2202,5527	3167,4898
<b>28</b>	2,3376	8243,8156	1829,9272	2441,9129	3541,3590
<b>29</b>	0,1413	90,8067	4,6515	10,8260	20,1044
<b>30</b>	0,0010	43,3914	9,0259	14,2047	21,0850
<b>31</b>	0,0504	105,1724	4,2279	9,5377	21,6721
<b>32</b>	0,0252	54,1639	6,4654	12,3725	19,9436
<b>33</b>	0,2382	95,1800	5,1025	11,0236	22,6670

Tabla 23

*Distribución de grupos según los percentiles. Televisor*

Grupo	Intervalo Percentil 25	% Errores	Intervalo Percentil 50	% Errores	Intervalo Percentil 75	% Errores
<b>4</b>	<b>Intervalo 1 2 Grupos</b>	3,8067	<b>Intervalo 1 2 Grupos</b>	6,9500	<b>Intervalo 1 1 Grupo</b>	12,1097
<b>1</b>		3,0489		7,7073	<b>Intervalo 2 8 Grupos</b>	15,3636
<b>11</b>	<b>Intervalo 2 13 Grupos</b>	4,6671	<b>Intervalo 2 12 Grupos</b>	9,0355		16,5327
<b>14</b>		5,0939		10,4076		16,6803
<b>9</b>		5,3898		11,9822		18,0378
<b>10</b>		5,3123		11,1484		18,0885
<b>19</b>		7,0086		13,8739		18,4205
<b>32</b>		6,4654		12,3725		19,9436
<b>21</b>		6,5761		12,0607		19,9951
<b>29</b>		4,6515		10,8260	<b>Intervalo 3 12 Grupos</b>	20,1044
<b>7</b>		5,1743		11,4891		20,2130
<b>17</b>		4,7262		11,6977		20,6633
<b>20</b>		6,1759		12,8319		20,8465
<b>30</b>		9,0259		14,2047		21,0850
<b>31</b>		4,2279	<b>Intervalo 3 9 Grupos</b>	9,5377		21,6721
<b>13</b>	<b>Intervalo 3 8 Grupos</b>	5,7296		11,7432		21,7837
<b>16</b>		5,3841		10,8106		22,3687
<b>33</b>		5,1025		11,0236		22,6670
<b>2</b>		5,8790		14,5758		23,1565
<b>3</b>		5,6537		12,5550		23,8321
<b>5</b>		6,1701		11,8559		24,2929
<b>12</b>		6,6992		14,9350	<b>Intervalo 4 3 Grupos</b>	25,5602
<b>6</b>		9,2702		15,9018		25,6813
<b>18</b>	<b>Intervalo 4 2 Grupos</b>	13,0603	<b>Intervalo 4 2 Grupos</b>	20,2962		27,1298
<b>15</b>		7,4773		14,2291	<b>Intervalo 5 2 Grupos</b>	30,6535
<b>8</b>	<b>Intervalo 6 1 Grupo</b>	7,1507	<b>Intervalo 5 1 Grupo</b>	15,2905		30,7200