

# ESTUDIO DE CALIDAD DE POTENCIA PARA LUMINARIAS DEL SISTEMA DE SEMAFORIZACIÓN DE BOGOTÁ, COLOMBIA

Carlos Andrés Parra-Martínez<sup>1</sup>, Hugo Alejandro Serrato-Vanegas<sup>1</sup>,  
José Ignacio Rodríguez-Molano<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Estudiante

<sup>2</sup> Doctorado (c) en Ingeniería Informática. Profesor. Correo electrónico: [jirodriguez@udistrital.edu.co](mailto:jirodriguez@udistrital.edu.co)  
Departamento de Ingeniería Industrial, Facultad de Ingeniería, Universidad Distrital  
Francisco José de Caldas, Bogotá, Colombia

---

Recibido: 4 de febrero del 2016      Aprobado: 23 de mayo del 2016

---

**Cómo citar este artículo:** C. Parra-Martínez, H. A. Serrato-Vanegas, J. I. Rodríguez-Molano, "Estudio de calidad de potencia para luminarias del sistema de semaforización de Bogotá, Colombia", *Ingeniería Solidaria*, vol. 12, no. 20, pp. 61-82, oct. 2016. doi: <http://dx.doi.org/10.16925/in.v19i20.1416>

---

**Resumen.** *Introducción:* el presente artículo es un estudio de caso del proyecto titulado "Calidad de energía orientado a los valores de armónicos en las luminarias utilizadas en las intersecciones semaforizadas en la ciudad de Bogotá D. C.". Este proyecto se desarrolló durante el 2015 en la Universidad Distrital Francisco José de Caldas. *Metodología:* se realizaron mediciones encaminadas a las distorsiones armónicas y el factor de potencia en las luminarias de Bogotá tipo LED, incandescente y halógena, para contrastar con los niveles recomendados de THD para cada tipo en la IEC 61000-3-2. Se utilizó para el análisis un medidor digital modelo EVERFINE PF9811. *Resultados:* se determinaron presencias importantes de distorsión armónica y afectación a la red con las nuevas luminarias tipo LED, lo cual denota una baja en la calidad de energía con la cual opera el equipo de control. *Conclusiones:* se evidencian retos técnicos para la puesta en marcha de las intersecciones, por cuenta de las perturbaciones electromagnéticas que afectan a la red eléctrica por parte de las nuevas tecnologías de iluminación; por ello, deben mitigarse o erradicarse los efectos dañinos de las perturbaciones electromagnéticas en la red eléctrica. Se concluye y recomienda la observación de los valores base existentes en este artículo y nuevas investigaciones.

**Palabras clave:** Bogotá, calidad de potencia, distorsión armónica, factor de potencia, semaforización.



## QUALITY REVIEW OF POWER FOR LIGHTING SYSTEM OF SIGNALING INSTALLATIONS IN BOGOTA, COLOMBIA

**Abstract.** *Introduction:* This article is a case study of the project “Energy quality directed to harmonic values in the lighting systems used in traffic light intersections of the city of Bogota, D. C.”. The project was conducted during the year 2015 by the Universidad Distrital Francisco Jose de Caldas. *Methodology:* The measurements were directed to harmonic distortions and power factors in the lighting systems -type LED in Bogota, incandescent and halogen, to contrast with the recommended THD levels for every type in IEC 61000-3-2. A digital meter, model EVERFINE PF9811, was used in the analysis. *Results:* Significant harmonic distortion and encumbrance of the grid were determined when using the new LED lighting system, which renders a significant drop in energy quality with which the control equipment operates. *Discussion:* Technical challenges are evidenced for the start-up of intersections due to electromagnetic disturbances that affect the electric grid caused by new lighting technologies. Because of that, the electromagnetic disturbances in the electric grid must be mitigated or eradicated. The conclusion and recommendation of the case study is the observation of existent base values in this article and in new research.

**Keywords:** Bogota, power quality, harmonic distortion, power factor, signaling installations.

## ESTUDO DE QUALIDADE DE POTÊNCIA PARA ILUMINARIAS DO SISTEMA DE SEMÁFOROS DE BOGOTÁ, COLÔMBIA

**Sinopse.** *Introdução:* este presente artigo é um estudo de caso do projeto titulado “Qualidade de energia orientado aos valores de harmônicos nas luminárias utilizadas nas interseções semaforicas na cidade de Bogotá D.C.”. Este projeto foi desenvolvido durante o ano 2015 na Universidad Distrital Francisco José de Caldas. *Metodologia:* realizaram-se medições encaminhadas às distorções harmônicas e o fator de potência nas luminárias de Bogotá tipo LED, incandescente e halógena, para contrastar com os níveis recomendados de THD para cada tipo na IEC 61000-3-2. Utilizou-se para a análise um medidor digital modelo EVERFINE PF9811. *Resultados:* determinaram-se importantes presenças de distorção harmônica e afetação à rede com novas luminárias tipo LED, indicando uma diminuição na qualidade da energia com a qual opera o equipamento de controle. *Conclusões:* evidenciam-se desafios técnicos para a implementação das interseções, por conta das perturbações eletromagnéticas que afetam à rede por parte das novas tecnologias de iluminação; por isso, os efeitos negativos das perturbações eletromagnéticas na rede elétrica devem ser mitigados ou erradicados. Conclui-se e recomenda-se a observação dos valores base existentes neste artigo e novas investigações.

**Palavras chave:** qualidade de potência, distorção harmônica, fator de potência, sistemas de semáforos, Bogotá.

## 1. Introducción

Desde los extramuros hasta desembocar al pleno centro histórico, ante los adoquines de la Plaza de Bolívar, es un hecho cumplido que Bogotá (Colombia) desbordó cualquier proyección de crecimiento y expansión. Entre menos aciertos y un poco más de desaciertos, desde 1968 el Departamento Administrativo de Planeación (DAP; antes Departamento de Urbanismo: primera entidad encargada de planear Bogotá), se ha querido legislar y proyectar todo lo relacionado con el desarrollo de la capital [1].

Desde entonces, el DAP sufrió diferentes reformas en su estructura orgánica y administrativa y sus funciones. En el mismo tenor, para 2006 se creó el sector de planeación y dentro de este se transformó el departamento por la actual Secretaría Distrital de Planeación. Por medio de esta secretaria se articulan las políticas públicas de la ciudad en sus dimensiones territorial (física y crecimiento urbano), sectorial (social, económico y ambiental) y de gasto (inversión), con la participación de distintos actores, en la búsqueda de un desarrollo integral, organizado, equitativo y sostenido que beneficie a todos los habitantes del Distrito [2].

Sin embargo, los planes de ordenamiento territorial, las políticas, planes y programas relacionados con los sistemas generales de servicios públicos y movilidad para la ciudad, a la fecha, han remado contra la corriente de la corrupción, el conflicto civil y la sectorización política que los adopta como banderas electorales por cada cuatrienio. No hace falta ir tan lejos en la historia para notar que la movilidad y todas las propuestas conexas han sido factor especial, sino potencial, en la intención de voto en las recientes elecciones (celebradas en el 2015) de autoridades locales; entiéndase Alcaldía y corporaciones plurinominales (Consejo y juntas administradoras locales).

Bogotá está cerca de tener diez millones de habitantes y convertirse en una megaciudad. Al tiempo con su población, crecen también las necesidades de transporte público [3] y tópicos como la implementación del Sistema Integrado de Transporte (SITP), las nuevas rutas troncales exclusivas de buses del Sistema tipo Bus troncal (BTR), la construcción o no de un metro y el trazado de vías en perpetua planeación como la avenida Longitudinal de Occidente (ALO), pasan a las

primeras páginas de la agenda distrital, por nombrar los más relevantes.

Para contextualizar, el actual trazado de la ALO se encuentra en debate, ya que para algunos haría desaparecer los humedales de Capellanía, Jaboque, y la Conejera [4]; el metro, elevado o subterráneo, es aún una irrealidad. Por su parte, el SITP afronta un preocupante estancamiento producto de la crisis de Coobús y Egobús, a cargo del 40 % de las rutas de la ciudad [5]; finalmente, TransMilenio, otrora cabeza visible de bajos costos y operatividad, con sus 9 portales, 137 estaciones y 2,4 millones de pasajeros transportados a diario [6], ha superado sus límites.

Estas dinámicas de movilidad han llevado al progresivo aumento del parque automotor, que de acuerdo con las cifras del Registro Único Nacional de Tránsito (RUNT), para 2016, está por los 12 millones de unidades [7]; de allí el fenómeno de “cuello de botella” en el transporte, en el cual a mayor número de automotores versus bajas tasas de inversión en infraestructura vial (malla vial), mayor congestión vehicular generada por defecto.

Entonces, la construcción de vías que no causen afectación al medio ambiente; la urgente realidad del metro con recursos públicos o privados; y la implementación en su cabalidad de un sistema integrado de transporte son todas soluciones necesarias *so pena* de un alto impacto presupuestal. No obstante, la infraestructura ambientalmente sostenible, el aumento del parque automotor, y la pluralidad en medios de transporte no son los únicos factores a intervenir si lo que se busca es mejorar la movilidad en el distrito capital, la cual le cuesta 0,5 % del Producto Interno Bruto (PIB) [8].

Tras las soluciones descritas se encuentra, marcado por un panorama de rezago, el sistema de semaforización de la capital<sup>1</sup>; el cual, como era de esperar, también es un problema muy real en la movilidad. Para entender su atraso, hace cerca de un lustro, en el 2008, la red semaforica tenía más de treinta años y no permitía programar los tiempos de los semáforos de acuerdo con el flujo vehicular [9]. Paulatinamente y con el propósito de mejorar la movilidad de los vehículos en las horas pico y reducir el tiempo de

1 El sistema de semaforización es un componente fundamental para el control del tránsito de la ciudad, que permite el uso ordenado y seguro del espacio disponible para la circulación de vehículos y peatones, con el fin de garantizar el tránsito de estos de manera controlada [12].

espera de conductores y peatones en los semáforos, la Secretaría de Tránsito de Bogotá ha venido instalado una red semaforica inteligente [10] y ha llevado a cabo el recambio tecnológico de las luminarias y correspondientes bombillas —parte fundamental del cuerpo semaforico—<sup>2</sup> de las de tipo incandescente u otras, a las de tipo *Light-Emitting Diode* (LED).

Lo anterior no es una tarea fácil, ya que actualmente en Bogotá existen cerca de 1.400 intersecciones semaforizadas, reguladas por diferentes tipos de equipos de control de tráfico, intersecciones que a través de los años han venido trayendo un sin número de cambios en tecnologías, las cuales pretenden el mejoramiento del inmueble tecnológico instalado en la ciudad [11]. El objetivo de la modernización es lograr un sistema inteligente de tráfico (SIT), con equipos fiables en su funcionamiento, capaces de otorgar un *performance* mejorado, anudado a una mayor vida útil (luminarias LED), sin sacrificio alguno de sus funciones.

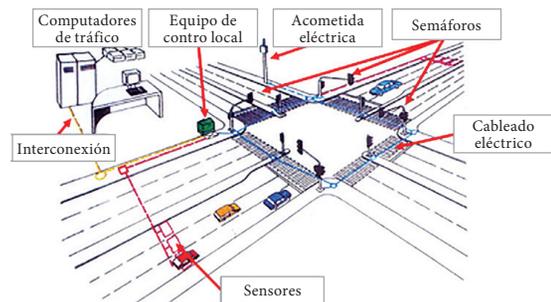
Es por ello que, fuera de las múltiples ventajas que ofrece el recambio tecnológico, si el proceso de modernización llega a darse en su totalidad, como se espera, otros serán los retos técnicos y operativos para la puesta en marcha de un SIT, más cuando se masifican los equipos basados en electrónica de potencia. Cabe recordar que estos equipos, con los crecientes desarrollos tecnológicos en las últimas décadas, han llevado al uso de cargas basadas en electrónica, susceptibles a perturbaciones electromagnéticas. En la figura 1 se registran las perturbaciones electromagnéticas más frecuentes en la onda de tensión en una red eléctrica, como distorsión armónica, fluctuaciones rápidas de tensión (*Flicker*), transitorios, *Sags*, *Swells* entre otros [14].

## 2. Por qué un estudio de calidad de potencia en el sistema de semaforización de Bogotá

La aseveración (nuevos retos técnicos y operativos) se hace desde la perspectiva del suministro

2 Los semáforos son dispositivos de señalización mediante los cuales se regula la circulación de vehículos, bicicletas y peatones en vías, asignando el derecho de paso o prelación de vehículos y peatones secuencialmente, por las indicaciones de luces de color rojo, amarillo y verde, operadas por una unidad electrónica de control [13].

eléctrico del operador de red, en el marco de la estructura básica de una intersección semaforizada. Como bien puede verse en la radiografía del sistema de intersección registrada en la figura 1, no son únicos sino varios los sensores y equipos de control, tanto locales como de tráfico, los que interactúan en la señalización de paso (semáforo). Estos equipos comúnmente usan conversores de potencia, cargas esencialmente no lineales, y se combina a ello la llegada de la tecnología LED a las luminarias de tránsito que, aunque más eficientes, traen consigo (“introducen”) perturbaciones a la red eléctrica. Esto equivale a un aumento en los costos de operación, incremento de interconexiones, un sistema susceptible a las fallas, reducción de la vida útil de equipos y operación errática de estos, entre otras tantas repercusiones (ver distorsión armónica) [15].



**Figura 1.** Estructura básica de una típica doble intersección semaforizada

Fuente: [16]

Estas preocupaciones deben tenerse siempre en cuenta, más cuando en el sistema de semaforización los equipos trabajan durante todo el transcurso del año (24/7) y cualquier perturbación que cause la parada no planificada de estos, averías o apagones, repercutirá directamente en el bienestar de la movilidad. Además, y no menos importante, generar una onda de tensión de forma senoidal, de amplitud y frecuencia lo más constante posible o dentro de un rango de regulación tolerable por las cargas, define el diseño de las cargas, dispositivos de transmisión, protección, distribución, control, aislamientos; en esencia, establece niveles de referencia de diseño [17].

Por las razones expuestas anteriormente, deben mitigarse o erradicarse (en lo posible) los

efectos dañinos de las perturbaciones electromagnéticas en la red eléctrica, si lo que se espera es un mayor factor de potencia, con estabilidad de tensión, menores pérdidas en la red, ausencia de problemas de resonancia o de amplificación de las perturbaciones eléctricas.

Una red eléctrica “limpia” impone una carga mucho menor sobre los equipos y aumenta la duración de estos, lo que se traduce en menores costes de mantenimiento y de sustitución de equipos deteriorados [18, 19]. Así, para obtener una red eléctrica “limpia” en el sistema de semaforización en Bogotá, se deben primero caracterizar las perturbaciones electromagnéticas con las que al día de hoy trabaja el sistema; para ello, un primer paso es efectuar un estudio de calidad de energía o de potencia (PQ, por sus siglas en inglés), aplicado a las luminarias, bombillas, equipos y artefactos que forman parte y componen la red eléctrica del sistema de semaforización; teniendo entonces el acervo documental para tomar las medidas preventivas y correctivas a las que haya a lugar.

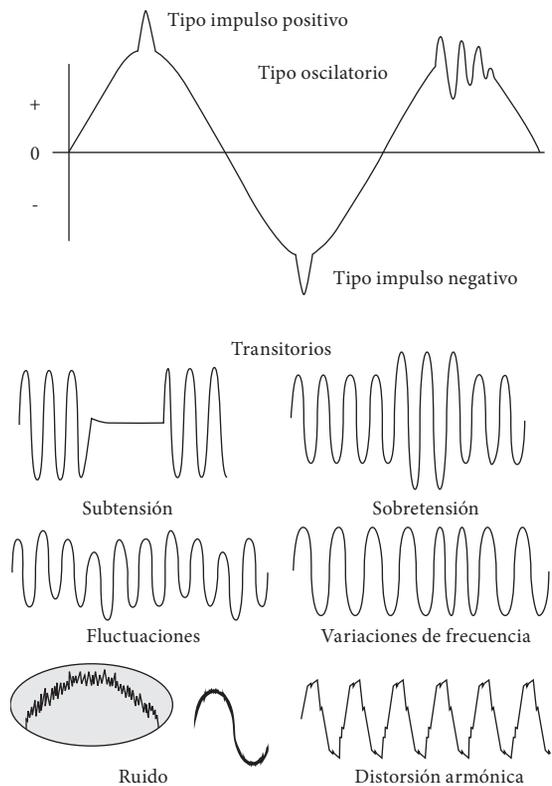
### 3. Perturbaciones electromagnéticas presentes en la red eléctrica de semaforización

Contextualizando, para Ramírez y Cano [20] la calidad del servicio de energía eléctrica es un término de amplio espectro relacionado con la continuidad del servicio y la calidad de la onda de tensión. La continuidad del servicio es lo que tradicionalmente se ha denominado confiabilidad, y tiene que ver con el número, tiempo de duración y usuarios afectados en promedio por interrupciones por año<sup>3</sup>. Por su parte, la calidad de tensión, o de la onda de tensión, es un término empleado para describir la cantidad de disturbios o variaciones de tensión, particularmente armónicos, transitorios, fluctuaciones de tensión y factor de potencia [15] (figura 2).

La tensión que se suministra a una carga (luminarias y equipos de control) está caracterizada por

3 Una interrupción es una pérdida completa de tensión durante un intervalo, dependiendo del tiempo que duren las interrupciones, estas se clasifican en: instantáneas (0.5 - 30 ciclos), momentáneas (30 ciclos - 2 segundos), temporales (2 segundos - 2 minutos) y de largo tiempo (mayores a 2 minutos) [21].

la frecuencia, magnitud, forma de onda, desbalance y continuidad de la onda de tensión. La calidad del suministro puede definirse en términos de las desviaciones de estos parámetros de sus valores ideales (referencia) y máximos de desviación en términos que puedan alcanzar sin que se afecte el funcionamiento de los equipos eléctricos. Lo anterior equivale a la definición de la Comisión Reguladora de Energía y Gas (CREG) 080, que dictamina que la calidad de potencia se relaciona con las desviaciones de los valores especificados para variables de tensión y la forma de las ondas de tensión y corriente [23]. Aunque para el caso del sistema de semaforización de la capital la continuidad es un aspecto fundamental en su operación, el profundo reordenamiento de las perturbaciones electromagnéticas y las interrupciones, producto de la revolución de la electrónica, y la construcción de equipos, los cuales exhiben una característica altamente no lineal (luminarias y equipos de control), hacen que las características de la onda de tensión sean relevantes.



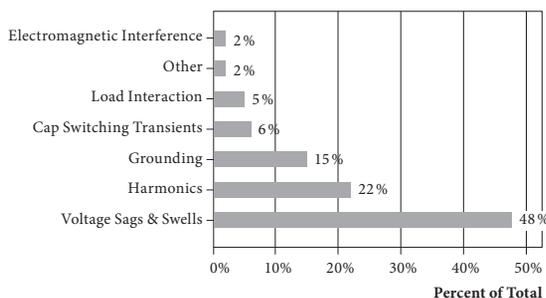
**Figura 2.** Tipo de perturbaciones electromagnéticas más frecuentes en la onda de tensión en una red eléctrica

Fuente: [22]

Tradicionalmente, la calidad de energía no es un aspecto unilateral, está estrechamente relacionado con el tipo de equipos del usuario y la forma como este los opera. No es así para el sistema de semaforización de Bogotá, puesto que el usuario (peatón, ciclista o automotor) no opera ni selecciona los equipos que usufructa, siendo responsabilidad de su correcto funcionamiento, mantenimiento y demás el operador de red y la Secretaría de Movilidad, en cuanto a la interconexión eléctrica y a los equipos de semaforización (control e iluminación), respectivamente.

En este escenario, como cualquier medida que se tome para mejorar la calidad en el servicio de electricidad tiene un costo inherente, se debe procurar un equilibrio entre los equipos por emplear, su desempeño y la calidad del suministro, sabiendo que a mejor calidad de energía por parte del operador de red, mayor será el costo del kilovatio hora (Kwh), y a su vez menores los costos asociados a los equipos [24].

Sobre estos últimos corresponde aclarar que desde la masificación de la electrónica de potencia conviven en un ambiente sometido a un constante recambio tecnológico, no así con las mismas redes eléctricas supliendo sus necesidades de electrificación [19]. Este hecho da pie a las mediciones de las perturbaciones electromagnéticas que “inyectan” a la red los equipos puestos recientemente en servicio para el sistema de semaforización. Por su impacto en los costos de calidad de potencia, se debe tener en cuenta, fuera de las interrupciones, el valor total de distorsión armónica, *Total Harmonic Distortion* (THD) y el factor de potencia, es decir, el comportamiento de la carga en la red. Las causas fundamentales que afectan los costos en una solución de calidad de energía se registran en la figura 3.



**Figura 3.** Causas fundamentales que afectan los costos en una solución de calidad de energía

Fuente: [25]

### 3.1 Distorsión armónica

La distorsión armónica es un fenómeno indeleble a cualquier red eléctrica. El concepto de análisis armónico viene del teorema matemático desarrollado por el francés *Jean Baptiste Joseph Fourier*; en este se describe que toda función periódica puede ser representada por una serie infinita de funciones seno y coseno, múltiplos de la frecuencia fundamental, las cuales son llamadas series de Fourier [26]. Un sistema de potencia ideal contiene solo el armónico fundamental a su frecuencia nominal, sea 50Hz (subcontinente hindú, Europa, etc.) o 60 Hz (Estados Unidos, Canadá, la gran mayoría de regiones de centro y sur América); sin embargo, un sistema de potencia ideal no es una realidad, y se usa exclusivamente en la teoría.

Los armónicos se generan principalmente de cargas no lineales, como transformadores, motores eléctricos, generadores, hornos de arco, arco soldadores, convertidores DC, inversores, fuentes de televisión y de alimentación de modo conmutado, lámparas de descarga de alta presión, fluorescentes, diodos emisores de luz, ordenadores portátiles, cargadores de teléfonos móviles, otros productos electrónicos y cargas similares de equipos electrónicos [27, 28].

Como se dijo, la idea básica de las series de Fourier es que toda función periódica puede ser expresada como una suma trigonométrica de senos y cosenos del mismo periodo T, así que para la onda de corriente presente en un sistema eléctrico (función sinusoidal) puede obtenerse la expansión de Fourier a partir de la ecuación 1.

$$i(t) = a_n \sin \omega t + b_n \cos \omega t \quad (1)$$

Con coeficientes que se muestran en las ecuaciones 2 y 3.

$$a_n = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} i(t) \sin(n\omega t) d(\omega t) \quad (2)$$

$$b_n = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} i(t) \cos(n\omega t) d(\omega t) \quad (3)$$

Y magnitud de la corriente en *Root Mean Square* (RMS), para la forma amplitud-fase de la serie de Fourier igual a la raíz cuadrada de la suma de los coeficientes al cuadro (ecuación 4).

$$I_{RMS} = \sqrt{a_n^2 + b_n^2} \tag{4}$$

Donde, al hacer uso de la ecuación 4, la distorsión armónica de corriente, en RMS, se puede obtener mediante el promedio geométrico de los armónicos no fundamentales según la ecuación 5.

$$I_{H-RMS} = \sqrt{I_{2RMS}^2 + I_{3RMS}^2 + \dots + I_{nRMS}^2} \tag{5}$$

Con dicha corriente de distorsión armónica, se deduce el factor de distorsión armónica para la onda de corriente,  $HDF_I$  (ecuación 6).

$$HDF_I = \frac{I_{H-RMS}}{I_{IRMS}} \tag{6}$$

Al sustituir la ecuación 5 en 6 y escribir de forma porcentual, se obtiene la tasa de distorsión armónica total que se muestra en la ecuación 7.

$$\%THD_I = \frac{\sqrt{I_{2RMS}^2 + \dots + I_{nRMS}^2}}{I} \times 100 \tag{7}$$

Similar lógica se sigue para hallar el total de la distorsión armónica en la onda de tensión, mostrada en la ecuación 8.

$$v(t) = a_n \sin \omega t + b_n \cos \omega t \tag{8}$$

Con coeficientes que se muestran en las ecuaciones 9 y 10.

$$a_n = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} v(t) \sin(n\omega t) d(\omega t) \tag{9}$$

$$b_n = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} v(t) \cos(n\omega t) d(\omega t) \tag{10}$$

Donde:

$$V_{RMS} = \sqrt{a_n^2 + b_n^2} \tag{11}$$

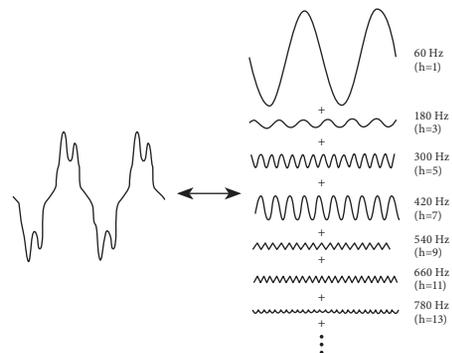
Y,

$$V_{H-RMS} = \sqrt{V_{2RMS}^2 + V_{3RMS}^2 + \dots + V_{nRMS}^2} \tag{12}$$

Igualmente, con la ecuación 11 y el componente fundamental de tensión ( $V_{1RMS}$ ), se obtiene el total de distorsión armónica para la onda de tensión, mostrado en la ecuación 13.

$$\%THD_V = \frac{\sqrt{V_{2RMS}^2 + \dots + V_{nRMS}^2}}{V_{1RMS}} \times 100 \tag{13}$$

Es de resaltar que las ondas distorsionadas de tensión o corriente presentes en un circuito eléctrico no es un grupo de ondas seno de diferentes frecuencias; de allí que, para las ecuaciones 2, 3, 9 y 10,  $n$  sea un entero, y por cada valor que tome dicha variable se tendrá un componente sinusoidal de onda periódica (armónica) a una frecuencia múltiplo entero de la frecuencia fundamental. Para una frecuencia natural de 60 Hz, se tendría la onda distorsionada, como se observa en la figura 4, la cual registra un ejemplo de descomposición en diferentes frecuencias de una onda distorsionada a una frecuencia fundamental de 60 Hz.



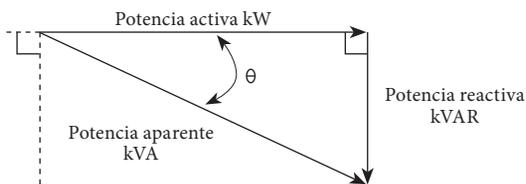
**Figura 4.** Ejemplo de descomposición en diferentes frecuencias de una onda distorsionada a una frecuencia fundamental de 60 Hz

Fuente: [14]

El interés en medir el THD radica en que los sistemas de alimentación, incluidos los de la semaforización, son sensibles a las cargas no lineales y puede presentarse una serie de efectos indeseados, entre ellos el sobrecalentamiento y daño de conductores eléctricos, la falla prematura de transformadores, la distorsión de la tensión de línea en alimentadores y circuitos ramales alimentados desde fuentes de alta impedancia (generadores, transformadores y reguladores de alta impedancia, alimentadores primarios, etc.), el disparo indeseado de interruptores y relés, sobrecalentamiento y falla de bancos de capacitores para corrección del factor de potencia, inducción de ruido en las líneas (por acople magnético o electromagnético entre circuitos de potencia eléctrica y de comunicaciones), errores en equipos de medida, entre otros [20].

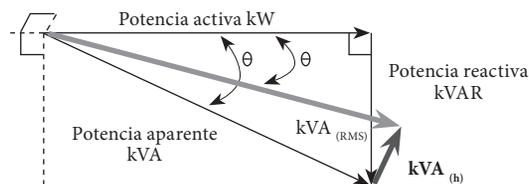
### 3.2 Factor de potencia

En virtud del impacto negativo de los armónicos en la corrección del factor de potencia, se da un espacio aparte de este punto en un sistema eléctrico. Aquí se sabe que el factor de potencia es la relación adimensional de desfase o desplazamiento “ $\cos \theta$ ” entre la tensión y la corriente a la frecuencia fundamental o, lo que es lo mismo, de la potencia activa (kW) con respecto a la potencia aparente (kVA) del sistema o la carga [29]. En la figura 5a se registra la representación del triángulo de potencia sin distorsión armónica.



**Figura 5a.** Representación del triángulo de potencia sin distorsión armónica

Fuente: [14]



**Figura 5b.** Representación del triángulo de potencia bajo distorsión armónica

Fuente: [14]

La potencia aparente está definida según la ecuación 15, con potencia activa,  $P$ , potencia reactiva,  $Q$ , y potencia aparente,  $S$ .

$$S = P + jQ = VI^* \quad (15)$$

Si se usa la identidad de Euler en la ecuación 15, se tiene que la potencia activa es el factor de la magnitud de la potencia aparente,  $|S|$ , por el coseno del ángulo de desfase o desplazamiento,  $\theta$ ; como se muestra en la ecuación 16.

$$S = |S| \cdot \cos\theta + j|S| \cdot \sin\theta \quad (16)$$

O, la ecuación equivalente (15), que explica el ángulo de desfase entre la tensión y la corriente,  $\theta_v - \theta_i$ , a la frecuencia fundamental, 50 Hz o 60 Hz según corresponda.

$$S = VI \cos(\theta_v - \theta_i) + jVI \sin(\theta_v - \theta_i) \quad (17)$$

De las ecuaciones 16 y 17 se infiere la ecuación 18 del factor de potencia,  $fp$ , que para efectos ideales debe ser lo más cercano a la unidad, nunca mayor:

$$fp = \cos(\theta_v - \theta_i) = \cos\theta = \frac{P}{|S|} = \frac{P}{V \cdot I} \quad (18)$$

No obstante la incesante búsqueda en los sistemas eléctricos de la condición ideal de factor de potencia unitaria, en la práctica no es posible alcanzarla dado el contenido armónico presente en la red, con lo cual se tendría un factor de potencia real, que como podría esperarse, es menor que el factor de potencia ideal. En la figura 5b se registra la representación del triángulo de potencia bajo distorsión armónica (ecuación 19).

$$fp' = \cos\theta' = \frac{P'}{|S|} < fp = \cos\theta = \frac{P}{|S|} = \frac{P}{V \cdot I} \quad (19)$$

Con algunos rudimentos matemáticos es posible asociar el factor de potencia al THD, tanto de tensión como de corriente, según se muestra en la ecuación 20.

$$\text{factor de potencia real} = fp' = \cos\theta' = \frac{P'}{|S|} = \frac{P'}{V \cdot I'} \quad (20)$$

$$= \frac{P}{V_{IRMS} I_{IRMS} \sqrt{1 + (THD_V/100)^2} \sqrt{1 + (THD_I/100)^2}}$$

Con la ecuación 20 se establece la importancia de mantener absoluto control sobre los armónicos en la red eléctrica de semaforización, más cuando, por regla general, los equipos de uso final en el sistema de semaforización (luminarias de paso y equipos de control) requieren energía eléctrica a una tensión y potencia activa específica.

### 4. Metodología

El interés particular de este documento en las luminarias de paso vehicular o peatonal se desarrolla conforme al recambio tecnológico y la entrada de nuevas intersecciones al sistema de semaforización; estas requieren mantenimiento correctivo y preventivo, tanto en las redes eléctricas, como en los semáforos que alimenta.

Así se desprende que las luminarias en recambio y las ya presentes en el sistema deban conservar la perspectiva del marco regulatorio de la calidad de potencia, sin perjuicio de su finalidad: señales luminosas de regulación del tránsito vehicular o peatonal.

En otras palabras, se deben efectuar las medidas de distorsión armónica en la onda de tensión ( $THD_V$ ) y en la onda de corriente ( $THD_I$ ), como también del factor de potencia ( $fp$  o  $FP$ ) de las distintas luminarias, o mejor, de los tipos de estas presentes en el sistema de semaforización. Para llevarlas a cabo se tendrán en cuenta las recomendaciones prácticas y los requerimientos para el control de armónicos en los sistemas de potencia eléctrica, norma IEC 61000-3-2.

En este rigor, las mediciones de armónicos de corriente y tensión (factor de potencia implícito) son esenciales para la distribución confiable de energía eléctrica. Las siguientes son algunas de las razones que ponen en relieve la importancia de las mediciones: monitoreo de los valores existentes de armónicos confrontado a los niveles recomendados o admisibles; diagnóstico y solución de problemas de situaciones en las que el rendimiento del equipo es inaceptable para la utilidad o para el usuario; la observación de los niveles de base existentes y el seguimiento de las tendencias en el tiempo

de la tensión y los armónicos de corriente (diarios, estacionales, patrones mensuales); la medición para la verificación de los estudios de simulación que incluyen flujo de carga armónico; medición de corrientes armónicas y tensiones armónicas con su respectivo ángulo de fase [30].



Vista anterior Vista posterior  
(a) Luminaria tipo LED pleno SIMSA



Vista anterior Vista posterior  
(b) Luminaria tipo LED flecha de giro SoBright



Vista anterior Vista posterior  
(c) Luminaria tipo LED paso peatonal SoBright



(d) Luminaria tipo halógeno módulo verde

**Figura 6.** Luminarias de uso actual en el sistema de semaforización. Cortesía Empresa de Teléfonos de Bogotá (ETB)<sup>4</sup>

Fuente: elaboración propia

4 Ver caracterización de las luminarias en los resultados.

Por lo anterior, el monitoreo de los valores existentes de armónicos en las luminarias de semaforización se confronta a los niveles recomendados de THD y factor de potencia ante la IEC 61000-3-2. En la figura 6 se registran las luminarias de uso actual en el sistema de semaforización.

Para cada una de las luminarias de la figura 6, LOAD o Lamp, se cuenta para las mediciones con un medidor digital modelo PF 9811 de la serie 9800, marca Everfine, con niveles de tolerancia THD de 0-20 %, factor de potencia de 0,9 a 1,0 y un error en la medida de  $\pm 5\%$ ; junto a una fuente de potencia convencional, Source, de 120 V en AC, la cual será, en las mediciones, caracterizada y consecuentemente tabulada. En las figuras 7a y 7b se registra el medidor digital de distorsión armónica PF9811 Everfine en vista anterior y posterior.

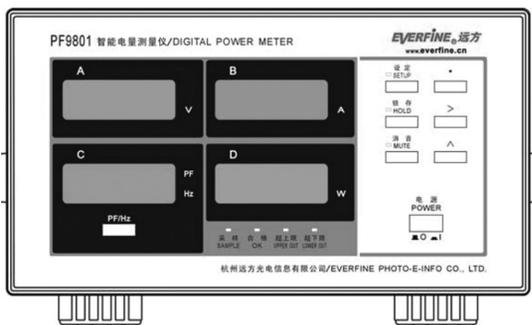


Figura 7a. Medidor digital de distorsión armónica PF9811 Everfine. Vista anterior  
Fuente: [31]

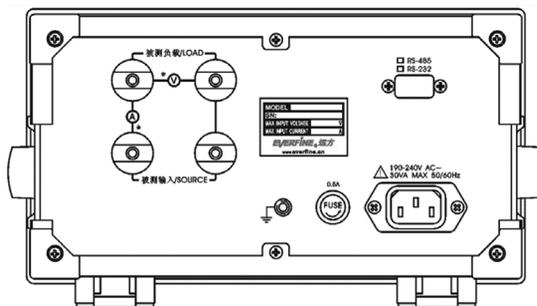


Figura 7b. Medidor digital de distorsión armónica PF9811 Everfine. Vista posterior  
Fuente: [31]

En virtud de los fundamentos teóricos vistos en las ecuaciones 7, 13, 19 y 20 para la obtención

del THD y el factor de potencia correspondiente, se requiere la medición de la potencia eléctrica consumida en el sistema por cualquiera de los métodos ampliamente reconocidos. De acuerdo con la figura 7c que registra la configuración del sistema del medidor digital de distorsión armónica PF9811 Everfine, el equipo de medición PF9811 Everfine hace uso del método del voltímetro y el amperímetro, por lo que al llevar a cabo la conexión de las luminarias y el equipo de medición (ver figura 7d), que registra la conexión de los equipos de medición del medidor digital de distorsión armónica PF9811 Everfine implícitamente, se medirá el THD y el factor de potencia por el método del voltímetro o transformador de potencia (PT por sus siglas en inglés) y el amperímetro o transformador de corriente (CT por sus siglas en inglés); mediante la interfaz RS-232-C se extraerá la información al PC.

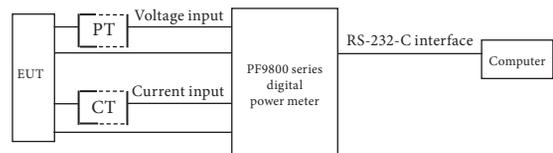


Figura 7c. Medidor digital de distorsión armónica PF9811 Everfine. Configuración del sistema  
Fuente: [31]

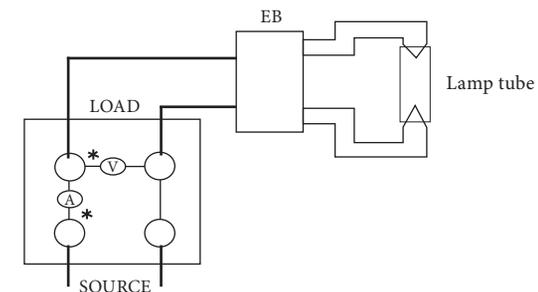


Figura 7d. Medidor digital de distorsión armónica PF9811 Everfine. Conexión de los equipos de medición  
Fuente: [31]

Por último, y con el fin de contar con un mayor número de elementos de contraste, se realizarán idénticas mediciones y similares procedimientos a las lámparas o bombillas representadas en la figura 8, que registra las lámparas de uso y venta particular.



**Figura 8.** Lámparas de uso particular

Fuente: elaboración propia

## 5. Resultados

Se realizaron las conexiones de la figura 7d, de la luminaria tipo LED pleno SIMSA, con un barrido de tensión de 80V a 130V. Allí se efectuaron diferentes tomas de medidas, ya que se realizaron pasos de dos voltios, iniciando por los 80V y finalizando con los 130 V con el equipo de medición PF9811 Everfine. Para esta luminaria se utilizó el modelo TRV-G08DR2R2, construido para una entrada o INPUT de 65-140 V en AC; a una frecuencia nominal de trabajo de 50 o 60 Hz y potencia de 14,5 Watts. En las tres primeras columnas de la tabla 1 se muestran los datos que caracterizan la red, es decir, la generación por parte de la red a la cual se conecta la luminaria, incluyendo la capacidad nominal de la luminaria. En la misma tabla 1,

**Tabla 1.** Caracterización de la red y medidas del factor de potencia, THD-V y THD-I para la luminaria tipo LED pleno SIMSA

Tensión por medir [v]	Tensión nominal [v]	Corriente nominal [A]	Capacidad nominal [w]	F. P.	THD-V [%]	THD-I [%]
80	80,5	0,162	13,09	0,999	2,3	6,0
82	82,3	0,159	13,12	0,998	2,3	6,2
84	84,3	0,156	13,14	0,998	2,3	6,1
86	86,3	0,152	13,17	0,998	2,2	6,2
88	88,2	0,150	13,21	0,998	2,5	6,2
90	90,2	0,147	13,25	0,998	2,4	6,3
92	92,0	0,144	13,28	0,998	2,4	6,1
94	94,4	0,141	13,33	0,998	2,4	6,2
96	96,1	0,139	13,37	0,998	2,4	6,2
98	98,5	0,136	13,44	0,998	2,4	6,2
100	100,2	0,134	13,48	0,998	2,3	6,1
102	102,2	0,132	13,53	0,998	2,2	6,2
104	104,1	0,130	13,59	0,998	2,4	6,1
106	106,3	0,128	13,66	0,998	2,4	6,2
108	108,2	0,127	13,73	0,998	2,4	6,0
110	110,1	0,125	13,80	0,998	2,4	5,9
112	112,1	0,123	13,86	0,998	2,4	6,0
114	114,1	0,122	13,93	0,997	2,4	6,0
116	116,4	0,120	14,01	0,997	2,4	6,0
118	118,0	0,119	14,08	0,997	2,4	6,3
120	120,0	0,118	14,16	0,997	2,4	6,0
122	122,3	0,116	14,25	0,997	2,5	5,9
124	124,3	0,115	14,35	0,997	2,5	5,9
126	126,2	0,114	14,44	0,997	2,6	6,1
128	128,1	0,113	14,53	0,997	2,6	6,0
130	130,3	0,112	14,64	0,996	2,5	6,0

Fuente: elaboración propia

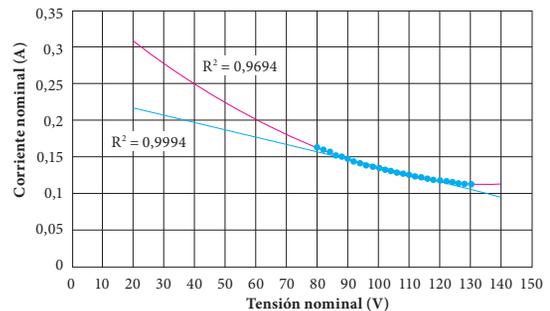
adicionalmente, se registran las mediciones realizadas para dicha luminaria<sup>5</sup>.

Antes del tratamiento de los datos, de acuerdo con la figura 9 que registra corriente nominal versus la tensión nominal para la luminaria tipo LED pleno SIMSA, se estableció la naturaleza de la carga, con los valores de tensión y corriente nominal; además, para buscar el movimiento de las medias en los valores de tensión y corriente, se agrega una línea de tendencia. Para una aproximación lineal de los datos de la dispersión (los valores de tensión y corriente medidos),  $R^2$  es igual a 0,9694; por su parte, para una aproximación polinómica de orden 2,  $R_2$  es igual a 0,9994. Cabe recordar que una línea de tendencia es más precisa cuando su valor  $R^2$  (número del 0 al 1 que revela qué proximidad de los valores calculados para la línea de tendencia se corresponde con sus datos reales) se encuentra en 1 o en su defecto, cerca de él; por lo que la relación entre los valores de corriente y tensión, la carga, para la luminaria LED pleno SIMSA es de tipo no lineal.

En las figuras 10a y 10b, que registran la distorsión armónica total de tensión versus tensión nominal, y la distorsión armónica total de corriente versus corriente nominal de la caracterización de la distorsión armónica para la luminaria tipo LED pleno SIMSA, se observó el comportamiento de la distorsión armónica, tanto de tensión como de corriente. Si se consideran las ecuaciones 7 y 13 en un caso ideal, la relación debería ser constante y lo más cercana a cero, entre la distorsión armónica correspondiente para la onda de tensión y la onda de corriente, según sea. Sin embargo, en la práctica no es así, dadas las condiciones teóricas ya expuestas.

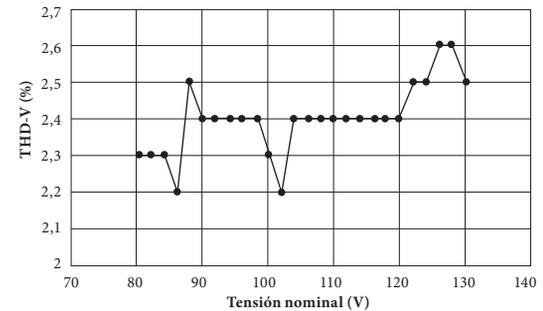
Por su parte, ambos valores en cada dispersión no superan el 10% del THD. De esto se infiere, al revisar, que no afectan individualmente (las luminarias) el factor de potencia de la carga (si en algo llega a afectar se debe en mayor medida al THD-I, de la figura 10c, donde se registra distorsión armónica total de tensión y corriente versus factor de potencia de la caracterización de la distorsión armónica para la luminaria tipo LED pleno SIMSA). De allí se desprende la consideración de que el primer componente armónico, de tensión y corriente, sea aproximadamente del 100% del valor RMS de la onda o, lo que es lo mismo, incipiente participación de los armónicos mayores a uno en la distorsión de la onda. Esto puede verse en la figura 10d que registra

los armónicos versus el porcentaje de la componente sinusoidal de onda de tensión y corriente de la caracterización de la distorsión armónica para la luminaria tipo LED pleno SIMSA. Claro, visto lo anterior sin considerar un número apreciable de ellas (luminarias) activas en forma simultánea a un mismo punto común de acoplamiento (PCC).



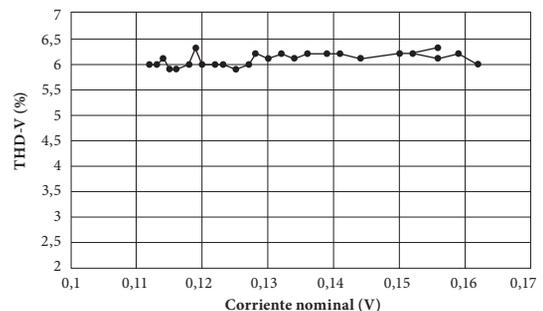
**Figura 9.** Relación de corriente nominal versus la tensión nominal para la luminaria tipo LED pleno SIMSA

Fuente: elaboración propia



**Figura 10a.** Distorsión armónica total de tensión versus tensión nominal de la caracterización de la distorsión armónica para la luminaria tipo LED pleno SIMSA

Fuente: elaboración propia



**Figura 10b.** Distorsión armónica total de corriente versus corriente nominal de la caracterización de la distorsión armónica para la luminaria tipo LED pleno SIMSA

Fuente: elaboración propia

5 Todos los valores de tensión, corriente y potencia en RMS.



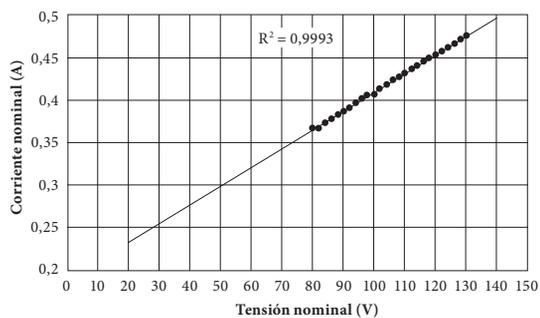
**Tabla 2.** Caracterización de la red y medidas del factor de potencia, THD-V y THD-I para la luminaria tipo LED flecha de giro SoBright

Tensión por medir [v]	Tensión nominal [v]	Corriente nominal [A]	Capacidad nominal [w]	F.P.	THD-V [%]	THD-I [%]
80	80,0	0,165	13,23	0,998	2,5	7,3
82	82,2	0,159	13,10	0,998	2,4	7,1
84	84,2	0,154	13,00	0,998	2,4	7,0
86	86,2	0,151	12,92	0,998	2,3	6,9
88	88,1	0,146	12,85	0,998	2,4	6,8
90	90,3	0,141	12,79	0,998	2,3	7,0
92	92,0	0,138	12,74	0,998	2,4	6,8
94	94,1	0,135	12,69	0,998	2,6	6,7
96	96,2	0,131	12,64	0,998	2,5	6,6
98	98,0	0,128	12,61	0,998	2,5	6,8
100	100,4	0,125	12,59	0,998	2,5	6,8
102	102,2	0,123	12,57	0,998	2,6	7,0
104	104,2	0,120	12,55	0,998	2,6	7,0
106	106,5	0,117	12,53	0,998	2,6	7,1
108	108,1	0,116	12,52	0,998	2,5	7,0
110	110,0	0,114	12,52	0,998	2,4	7,0
112	112,4	0,111	12,51	0,998	2,4	6,9
114	114,0	0,109	12,50	0,998	2,6	6,8
116	116,2	0,107	12,50	0,998	2,5	7,1
118	118,2	0,105	12,48	0,998	2,6	6,7
120	120,2	0,104	12,46	0,997	2,5	6,8
122	122,3	0,102	12,46	0,997	2,6	6,7
124	124,0	0,100	12,47	0,997	2,6	6,7
126	126,3	0,098	12,45	0,997	2,5	6,7
128	128,3	0,097	12,45	0,997	2,6	6,6
130	130,4	0,095	12,46	0,997	2,6	6,5

Fuente: elaboración propia

donde los porcentajes no superan el 3% de THD para las tensiones y corrientes nominales.

Tan poco es apreciable el aporte de los armónicos al factor de potencia. Con la aproximación de la clase de precisión del equipo de medición, se redondea a la unidad, como se evidencia en la figura 12c, en la que se registra la distorsión armónica total de corriente versus corriente nominal en la relación de corriente versus tensión para la luminaria tipo halógeno módulo verde, con valores promedio de distorsión armónica de 2,55 para THD-V, y 2,34 para THD-I.



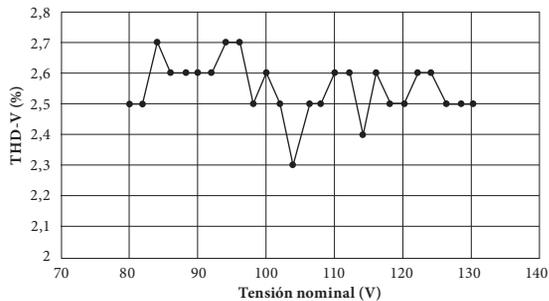
**Figura 11.** Relación de corriente nominal versus la tensión nominal para la luminaria tipo halógeno módulo verde

Fuente: elaboración propia

**Tabla 3.** Caracterización de la red y medidas del factor de potencia, THD-v y THD-i para la luminaria tipo LED paso peatonal SoBright

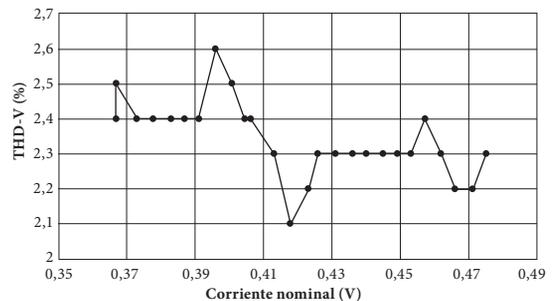
Tensión por medir [v]	Tensión nominal [v]	Corriente nominal [A]	Capacidad nominal [w]	F.P.	THD-v [%]	THD-I [%]
80	80,4	0,180	14,49	0,999	2,4	5,8
82	82,4	0,170	14,02	0,999	2,5	5,7
84	84,3	0,154	13,04	0,999	2,4	5,4
86	86,2	0,151	13,00	0,999	2,3	5,4
88	88,0	0,147	12,94	0,999	2,3	5,3
90	90,3	0,143	12,91	0,999	2,3	5,5
92	92,3	0,139	12,89	0,999	2,5	5,3
94	94,1	0,139	12,88	0,999	2,4	5,3
96	96,2	0,133	12,86	0,999	2,4	5,4
98	98,2	0,130	12,85	0,999	2,6	5,6
100	100,2	0,128	12,84	0,999	2,5	5,6
102	102,4	0,125	12,83	0,998	2,5	5,7
104	104,2	0,123	12,83	0,998	2,6	5,7
106	106,3	0,120	12,82	0,998	2,5	5,7
108	108,0	0,118	12,82	0,998	2,5	5,6
110	110,3	0,116	12,83	0,998	2,5	5,8
112	112,1	0,114	12,82	0,998	2,4	5,8
114	114,2	0,112	12,83	0,998	2,4	5,7
116	116,2	0,110	12,83	0,998	2,5	5,5
118	118,3	0,108	12,83	0,998	2,5	5,6
120	120,2	0,107	12,84	0,998	2,6	5,4
122	122,2	0,105	12,84	0,998	2,5	5,3
124	124,3	0,103	12,85	0,998	2,6	5,4
126	126,1	0,102	12,86	0,998	2,6	5,5
128	128,1	0,100	12,86	0,998	2,5	5,3
130	130,2	0,098	12,85	0,998	2,6	5,3

Fuente: elaboración propia



**Figura 12a.** Distorsión armónica total de tensión versus tensión nominal en la relación de corriente versus tensión para la luminaria tipo halógeno módulo verde

Fuente: elaboración propia



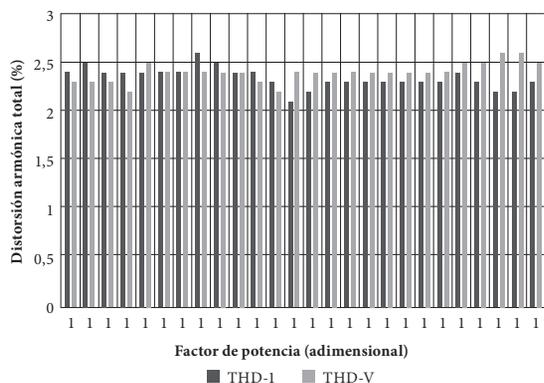
**Figura 12b.** Distorsión armónica total de corriente versus corriente nominal en la relación de corriente versus tensión para la luminaria tipo halógeno módulo verde

Fuente: elaboración propia

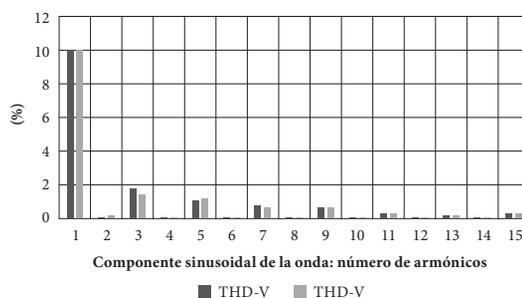
**Tabla 4.** Caracterización de la red y medidas del factor de potencia, THD-V y THD-I para la luminaria tipo halógeno módulo verde

Tensión por medir [v]	Tensión nominal [v]	Corriente nominal [A]	Capacidad nominal [w]	F.P.	THD-V [%]	THD-I [%]
80	80,2	0,367	29,46	1	2,5	2,4
82	82,0	0,367	30,17	1	2,5	2,5
84	84,1	0,373	31,40	1	2,7	2,4
86	86,1	0,378	35,58	1	2,6	2,4
88	88,3	0,383	33,87	1	2,6	2,4
90	90,1	0,387	34,94	1	2,6	2,4
92	92,0	0,391	36,05	1	2,6	2,4
94	94,1	0,396	37,30	1	2,7	2,6
96	96,2	0,401	38,63	1	2,7	2,5
98	98,1	0,405	39,82	1	2,5	2,4
100	100,1	0,406	41,03	1	2,6	2,4
102	102,1	0,413	42,23	1	2,5	2,3
104	104,0	0,418	43,49	1	2,3	2,1
106	106,3	0,423	45,03	1	2,5	2,2
108	108,0	0,426	46,13	1	2,5	2,3
110	110,1	0,431	47,55	1	2,6	2,3
112	112,2	0,436	48,92	1	2,6	2,3
114	114,1	0,440	50,31	1	2,4	2,3
116	116,2	0,445	51,75	1	2,6	2,3
118	118,1	0,449	53,07	1	2,5	2,3
120	120,3	0,453	54,62	1	2,5	2,3
122	122,2	0,457	55,95	1	2,6	2,4
124	124,1	0,462	57,40	1	2,6	2,3
126	126,3	0,466	58,92	1	2,5	2,2
128	128,5	0,471	60,67	1	2,5	2,2
130	130,2	0,475	61,88	1	2,5	2,3

Fuente: elaboración propia



**Figura 12c.** Distorsión armónica total de tensión y corriente versus factor de potencia en la relación de corriente versus tensión para la luminaria tipo halógeno módulo verde  
Fuente: elaboración propia

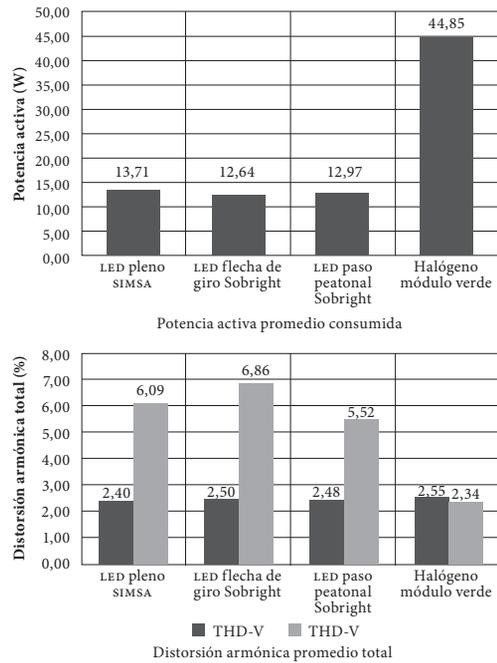


**Figura 12d.** Armónicos versus porcentaje del componente sinusoidal de onda de tensión y corriente en la relación de corriente versus tensión para la luminaria tipo halógeno módulo verde  
\* Los valores del primer armónico, tanto de tensión como de corriente, se multiplican por un factor de diez.  
Fuente: elaboración propia

En términos generales, el comportamiento de las luminarias tipo LED pleno SIMSA, flecha de giro y paso peatonal SoBright, tiene similares consumos de potencia (cerca de 13W), no sin mayor THD-I; comparado con el THD-V, predomina la participación del tercer armónico, de acuerdo con lo mostrado en la figura 13, que registra la potencia activa y distorsión armónica en las luminarias de uso actual en el sistema de semaforización.

No deja de ser notoria la capacidad nominal de cada luminaria, casi que cuadruplicando el consumo la luminaria tipo halógeno frente a sus similares de tipo LED. Se entiende así la necesidad del recambio tecnológico y sus problemas conexos (THD elevados cuando un número apreciable de ellas, luminarias LED, activan de forma simultánea a un mismo PCC).

Siguiendo las dinámicas de las luminarias de uso actual en el sistema de semaforización, para las bombillas de libre uso y venta, se efectúan las conexiones de la figura 7d, esta vez con un barrido de tensión de 80V a 120V con pasos de dos voltios, y se obtienen las mediciones para la primera bombilla, que se registran en la tabla 5.



**Figura 13.** Potencia activa y distorsión armónica en las luminarias de uso actual en el sistema de semaforización  
Fuente: elaboración propia

**Tabla 5.** Caracterización de la red y medidas del factor de potencia, THD-V y THD-I para la bombilla tipo LED flecha roja

Tensión por medir [v]	Tensión nominal [v]	Corriente nominal [A]	Capacidad nominal [w]	F. P.	THD-V [%]	THD-I [%]
80	80,2	0,179	14,23	0,988	2,7	12,4
82	82,2	0,175	14,28	0,987	2,6	13,1
84	84,5	0,171	14,27	0,986	2,7	13,7
86	86,1	0,168	14,26	0,985	2,6	14,3
88	88,2	0,164	14,27	0,984	2,9	14
90	90,2	0,16	14,28	0,983	2,7	14,5
92	92,2	0,157	14,3	0,982	2,5	15
94	94,1	0,154	14,3	0,981	2,6	15,5
96	96,1	0,151	14,28	0,98	2,7	15,6
98	98	0,148	14,27	0,979	2,4	15,6
100	100,3	0,145	14,27	0,978	2,5	16,1
102	102,4	0,142	14,25	0,976	2,4	16,3
104	104	0,14	14,24	0,975	2,6	16,5
106	106,1	0,137	14,23	0,974	2,6	17
108	108,2	0,135	14,22	0,972	2,6	17,5
110	110,1	0,132	14,22	0,971	2,4	16,1
112	112,5	0,13	14,2	0,969	2,6	16,2
114	114,3	0,128	14,2	0,968	2,7	16,2
116	116,1	0,126	14,2	0,966	2,5	16,1
118	118,3	0,124	14,19	0,964	2,7	16,5
120	120,2	0,122	14,19	0,963	2,7	16,6

Fuente: elaboración propia

El THD-I, en comparación con la luminaria tipo LED flecha de giro SoBright (caso más crítico), es cerca de tres veces su valor; de usarse esta, potenciaría los efectos indeseados de la contaminación armónica en la onda de corriente. Se entiende su no implementación en el sistema de semaforización debido al sobrepaso de los límites de THD, los cuales se explican en las conclusiones.

Asimismo, para la bombilla tipo LED verde Reflex, es más que notorio como el THD-I castiga el factor de potencia. En la tabla 6 se puede evidenciar claramente como el THD-I >> THD-V, por lo que, despreciando THD-V en la ecuación 20, se tendría la ecuación 21.

$$fp' = \cos\theta' = \frac{P}{V_{IRMS} I_{IRMS} \sqrt{1 + (THD_I/100)^2}} \quad (21)$$

Ante un THD-I superior al 80 %, es evidente la caída en el factor de potencia, lo que corrobora la ecuación 21 y su no implementación en el sistema de semaforización. Idéntico fenómeno ocurre para

la lámpara tipo fluorescente compacta Phillips, claramente la de menor performance de las luminarias y bombillas estudiadas.

La bombilla tipo halógena (reemplazo incandescente; tabla 7) tiene un bajo contenido de contaminación armónica; sin embargo, su potencia consumida en comparación con las de tipo LED se encuentra fuera de comparación, aunque cumple con su consumo de 70W de su manual de características (este estudio no comprueba su iluminancia).

La lámpara tipo fluorescente compacta Phillips, fabricada para un consumo promedio de 23W, factor de potencia de 0,55 a una tensión de 110-120 v, tiene una mención aparte, con sus valores elevados de THD-V y THD-I, afecta el factor de potencia y a su vez obliga a un mayor consumo de energía para cumplir sus requerimientos constructivos y de iluminancia; así toda su eficiencia energética es grado A (no confundir con la clasificación del equipo); esto confirma cómo las bombillas conocidas como ahorradoras introducen un alto contenido de contaminación armónica a la red (tabla 8).

**Tabla 6.** Caracterización de la red y medidas del factor de potencia, THD-V y THD-I para la bombilla tipo LED verde Reflex

Tensión por medir [v]	Tensión nominal [v]	Corriente nominal [A]	Capacidad nominal [w]	F. P.	THD-V [%]	THD-I [%]
80	80,0	0,14	7,44	0,663	4,0	80
82	82,3	0,138	7,65	0,669	4,1	82
84	84,4	0,135	7,67	0,672	4,1	84
86	86,2	0,134	7,44	0,666	4,1	86
88	88,1	0,130	7,70	0,668	4,0	88
90	90,4	0,127	7,72	0,668	4,1	90
92	92,1	0,125	7,72	0,667	4,0	92
94	94,4	0,123	7,74	0,664	3,9	94
96	96,3	0,122	7,76	0,66	3,9	96
98	98,1	0,120	7,79	0,659	4,0	98
100	100,4	0,118	7,78	0,656	3,9	100
102	102,0	0,116	7,79	0,653	3,9	102
104	104,3	0,110	7,40	0,64	3,8	104
106	106,3	0,113	7,55	0,626	3,7	106
108	108,0	0,110	7,62	0,64	3,7	108
110	110,2	0,108	7,65	0,638	3,6	110
112	112,5	0,107	7,65	0,634	3,6	112
114	114,0	0,105	7,71	0,64	3,8	114
116	116,0	0,103	7,72	0,643	3,6	116
118	118,4	0,101	7,73	0,641	3,6	118
120	120,4	0,102	7,75	0,629	3,5	120

Fuente: elaboración propia

**Tabla 7.** Caracterización de la red y medidas del factor de potencia, THD-v y THD-I para la bombilla tipo halógena (reemplazo incandescente) de 70W

Tensión por medir [v]	Tensión nominal [v]	Corriente nominal [A]	Capacidad nominal [w]	F. P.	THD-v [%]	THD-I [%]
80	80,3	0,498	40,04	1	2,7	2,5
82	82,3	0,501	41,25	1	2,6	2,4
84	84,2	0,507	42,75	1	2,6	2,4
86	86,1	0,513	44,23	1	2,7	2,5
88	88,0	0,519	45,78	1	2,7	2,6
90	90,3	0,527	47,64	1	2,6	2,4
92	92,1	0,532	49,08	1	2,5	2,3
94	94,3	0,539	50,91	1	2,8	2,5
96	96,2	0,545	52,49	1	2,8	2,5
98	98,4	0,551	54,29	1	2,5	2,3
100	100,2	0,557	55,84	1	2,7	2,6
102	102,4	0,562	57,65	1	2,5	2,1
104	104,0	0,567	59,03	1	2,5	2,3
106	106,1	0,573	60,91	1	2,5	2,2
108	108,3	0,579	62,75	1	2,5	2,3
110	110,2	0,585	64,48	1	2,6	2,5
112	112,0	0,59	66,19	1	2,6	2,4
114	114,2	0,596	68,14	1	2,6	2,4
116	116,3	0,602	70,20	1	2,7	2,5
118	118,4	0,608	72,07	1	2,8	2,5
120	120,1	0,613	73,69	1	2,5	2,2

Fuente: elaboración propia

**Tabla 8.** Caracterización de la red y medidas del factor de potencia, THD-v y THD-I para la lámpara tipo fluorescente compacta Phillips

Tensión por medir [v]	Tensión nominal [v]	Corriente nominal [A]	Capacidad nominal [w]	F. P.	THD-v [%]	THD-I [%]
80	80,3	0,299	14,63	0,609	80	80,3
82	81,9	0,301	15,29	0,619	82	81,9
84	84,2	0,296	15,35	0,615	84	84,2
86	86,2	0,291	15,57	0,619	86	86,2
88	88,1	0,291	15,67	0,61	88	88,1
90	90,1	0,288	15,9	0,611	90	90,1
92	91,9	0,288	16,48	0,612	92	91,9
94	94,2	0,287	16,82	0,618	94	94,2
96	96	0,286	17,6	0,623	96	96
98	98,1	0,287	17,49	0,621	98	98,1
100	100	0,283	17,93	0,633	100	100
102	102	0,285	18,22	0,626	102	102
104	104,2	0,285	18,58	0,625	104	104,2
106	106,1	0,285	18,86	0,622	106	106,1
108	108	0,285	19,27	0,625	108	108
110	110,1	0,284	19,61	0,626	110	110,1
112	112	0,283	19,99	0,629	112	112
114	114,1	0,282	20,49	0,636	114	114,1
116	116,1	0,283	20,9	0,635	116	116,1
118	118,2	0,282	21,37	0,639	118	118,2
120	120,4	0,284	21,79	0,637	120	120,4

Fuente: elaboración propia

## 6. Discusión

A raíz de los resultados obtenidos en el presente artículo, deben mitigarse o erradicarse, en lo posible, los efectos dañinos de las perturbaciones electromagnéticas en la red eléctrica, si lo que se espera es un mayor factor de potencia con estabilidad de tensión, menores pérdidas en la red, ausencia de problemas de resonancia o de amplificación de las perturbaciones eléctricas. Lo anterior equivale a una carga mucho menor sobre los equipos, aunada a una mayor duración de estos, con menores costes de mantenimiento y de sustitución de equipos deteriorados. Para ello se realizará un estudio más exhausto con un mayor alcance a nivel nacional, con la posibilidad de implementación de filtros adecuados.

## 7. Conclusiones

Las dinámicas de movilidad en Bogotá y el progresivo aumento del parque automotor, simultáneo al incremento de cruces semaforizados, obliga a prestar atención al sistema de semaforización, a su modernización y recambio tecnológico, que de ser eficiente la transición aportaría a mejorar indicadores de tráfico y gestión vehicular.

En este contexto habrá nuevos retos técnicos y operativos, fuera de las múltiples ventajas que ofrece el recambio tecnológico al incluir tecnología LED en las intersecciones semaforizadas y cambiarlas por las actuales (incandescentes y halógenas). Si el proceso de modernización llega a darse en su totalidad, como se espera, otros serán los retos técnicos y operativos para la puesta en marcha. Para la muestra están las perturbaciones electromagnéticas que afectan a la red eléctrica de semaforización, más cuando los equipos que se usa en un cuerpo semafórico emplean luminarias LED y convertidores de baja potencia, los cuales se caracterizan por ser altamente no lineales y por “inyectar” armónicos a la red.

A raíz de esto, deben mitigarse o erradicarse (en lo posible) los efectos dañinos de las perturbaciones electromagnéticas en la red eléctrica, si lo que se espera es un mayor factor de potencia, con estabilidad de tensión, menores pérdidas en la red, ausencia de problemas de resonancia o de amplificación de las perturbaciones eléctricas, lo que equivale a una carga mucho menor sobre los equipos,

aunada a una mayor duración de estos, con menores costes de mantenimiento y de sustitución de equipos deteriorados.

Entonces, el estándar IEC 61000-3-2 clasifica los equipos que son conectados a la red y los cuales al operar ofrecen cualquier tipo de carga sobre esta en cuatro clases (A, B, C, D), con base en los siguientes criterios: 1) número de piezas de equipo en uso; 2) duración (número de horas de funcionamiento); 3) la simultaneidad de uso (son el mismo tipo de equipo utilizado en el mismo período); 4) consumo de energía, y 5) espectro de armónicos [32]. Individualmente, la luminaria tipo LED pleno SIMSA, LED flecha de giro, y paso peatonal SoBright son clase A, concordando con las especificaciones técnicas de contrato (mantenimiento correctivo y preventivo de los semáforos y redes eléctricas del sistema de semaforización de Bogotá D. C. y de las nuevas intersecciones que se vayan integrando al sistema 2015). Se señala que para que sea considerado un equipo, luminaria o bombilla clase A, debe mantener límites en THD-I; es decir, para el armónico de tercer orden debe ser 2,30%; el de quinto orden, 1,14%; el de séptimo orden, 0,77%; el de noveno orden 0,40%; el de onceavo orden, 0,33%; el de treceavo orden, 0,21 %, y aquellos contenidos entre el quince y el treintainueveavo armónico,  $0,15 \times 15/n$ , con n igual al número del armónico.

En comparación con la luminaria halógena módulo verde, el consumo de energía es menor en un porcentaje cercano al 300 %, casi que cuadruplicando el consumo la luminaria tipo halógeno frente a sus similares de tipo LED. Se entiende así la necesidad del recambio tecnológico y sus problemas conexos (THD elevados cuando un número apreciable de ellas, luminarias LED, activas de forma simultánea a un mismo PCC).

En términos generales, el comportamiento de las luminarias tipo LED, ya sea pleno SIMSA, flecha de giro o paso peatonal SoBright, tiene similares consumos de potencia (cerca de 13W), no sin mayor THD-I comparado al THD-V, predomina la participación del tercer armónico.

Asimismo, para las luminarias LED y halógena, la dispersión no supera el 10 % del THD, de lo cual, al revisar la ecuación 20, se infiere que las luminarias no afectan individualmente el factor de potencia de la carga, de allí se desprende la consideración de que el primer componente armónico, de tensión y corriente, sea aproximadamente el 100 % del valor RMS de la onda; o lo que es lo mismo,

incipiente participación de los armónicos mayores a uno en la distorsión de la onda. Claro está, lo anterior es visto sin considerar un número apreciable de luminarias en servicio simultáneo a un mismo PCC.

Por lo anterior, se concluye y recomienda la observación de los valores base existentes en este documento y nuevas investigaciones en el seguimiento de las tendencias en el tiempo de la tensión y los armónicos de corriente (diario o estacional), para tomar medidas de tipo correctivo y preventivo.

## Referencias

- [1] Presidencia de la República de Colombia. (1968, dic. 26). *Decreto 3133, Por el cual se reforma la organización administrativa del distrito especial de Bogotá* [en línea]. Disponible en: <http://www.alcaldiabogota.gov.co/sisjur/normas/Norma1.jsp?i=3788>
- [2] Consejo de Bogotá, Colombia (2006, nov. 22). *Acuerdo 256, Por el cual se dictan normas básicas sobre la estructura, organización, y funcionamiento de los organismos y las entidades de Bogotá D.C. y se expiden otra disposiciones* [en línea]. Disponible en: <http://www.alcaldiabogota.gov.co/sisjur/normas/Norma1.jsp?i=2227>
- [3] El Tiempo, “Sobre el metro de Bogotá se debate hasta en el exterior”, *El Tiempo*, p. 4, 23, oct. 2015. [en línea]. Disponible en: <http://www.eltiempo.com/bogota/metro-de-bogota-debate-internacional/16411535>
- [4] El Espectador, “‘Si el trazado original de la ALO se hace, desaparecen tres humedales’: Petro”, *El Espectador*, 21, mayo 2015. [en línea]. Disponible en: <http://www.elespectador.com/noticias/bogota/si-el-trazado-original-de-alo-se-hace-desaparecen-tres-articulo-561855>
- [5] Revista Semana “Diez retos para el nuevo alcalde”, *Revista Semana*, 07, p. 1, junio 2011. [en línea]. Disponible en: <http://www.semana.com/nacion/articulo/diez-retos-para-nuevo-alcalde-bogota/240769-3>
- [6] TransMilenio S.A., “Informe SUBGERENCIA TÉCNICA Y DE SERVICIOS TRANSMILENIO S. A. Estadísticas de oferta y demanda del Sistema Integrado de Transporte Público –SITP”, TransMilenio S.A. Bogotá, Informe No. 21, agosto 2015. [en línea]. Disponible en: <http://www.transmilenio.gov.co/loader.php?l-Servicio=Publicaciones&lTipo=WfaccionA&lFuncion=visualizar&id=13249&bd=m>
- [7] El Tiempo, “El RUNT tiene la realidad del ‘censo’ automotor en Colombia: hay más de 11 millones de vehículos”, 7, marzo 2015 [en línea], Disponible en: <http://www.eltiempo.com/revista-motor/actualidad/tecnologia/runt-realidad-censo-automotor-colombia-hay-11-millones-vehiculos/21229>
- [8] J. Margolis, “8 million people. No subway. Can this city thrive without one?”, *PRIs the World* 21 oct. 2015 [en línea]. Disponible en: <http://www.pri.org/stories/2015-10-21/can-modern-megacity-bogot-get-without-subway>
- [9] A. Vásquez, “Semaforización en Bogotá: plan de choque”, *El Tiempo*, 5, dic. 2008 [en línea]. Disponible en: <http://www.eltiempo.com/archivo/documento/CMS-4707385>.
- [10] A. Chica, “Instalan red de semáforos inteligentes en Bogotá”, *Caracol Radio*, 25, junio 2013 [en línea]. Disponible en: [http://caracol.com.co/radio/2003/05/26/bogota/1053900000\\_036217.html](http://caracol.com.co/radio/2003/05/26/bogota/1053900000_036217.html)
- [11] E. Chávez, I. Rodríguez y M. Tarazona, “Estudio de características técnicas de los computadores de tráfico y equipos de control de tráfico local, proyectando un sistema inteligente de tráfico (SIT), de acuerdo a las necesidades de la ciudad de Bogotá D.C.”, Tesis de pregrado, Fac. Ing. Elect., Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Bogotá, Colombia, 2015.
- [12] Secretaria Distrital de Movilidad, Bogotá D. C. y Universidad Francisco José de Caldas, “Convenio Interadministrativo 995 de 2014. Mantenimiento correctivo y preventivo de los semáforos y redes eléctricas del sistema de semaforización de Bogotá D.C. y de las nuevas intersecciones que se vayan integrando al sistema”, 2014.
- [13] Alcaldía de Bogotá, *Resolución 1050 de 2004: por la cual se adopta el Manual de Señalización para calles, carreteras y ciclorutas de Colombia*, Ministerio de Transporte de Colombia, Bogotá D.C. 5 mayo de 2004, [en línea]. Disponible en: <http://www.alcaldiabogota.gov.co/sisjur/normas/Norma1.jsp?i=13958>
- [14] A. Abreu, “Calidad de potencia eléctrica en redes de distribución”, ENELVEN Energía Eléctrica de Venezuela, Venezuela, Manual junio 2005 [en línea]. Disponible en: <https://es.scribd.com/doc/15283024/Manual-de-Calidad-de-Potencia-Elctrica-en-Redes-de-Distribucion>
- [15] M. Monzón, *Calidad de suministro eléctrico: Huecos de tensión, mitigación de sus efectos en las plantas industriales*. Madrid, España: Publicaciones Universidad Carlos III de Madrid, 2013, pp. 16-30.
- [16] A. V. Méndez, “Desarrollo de una metodología para el control de la señalización del tráfico y el sistema de semaforización”, Tesis de Maestría, Fac. Ing. de Telecomun., Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, 2010 [en línea]. Disponible en: <http://www.bdigital.unal.edu.co/2450/>

- [17] A. Baghini, *Handbook of power quality*. West Sussex, Inglaterra: John Wiley & Sons, Ltd., 2008, pp. 31-65.
- [18] R. Guerrero y I. Martínez, *Calidad de energía Factor de potencia y filtrado de armónicos*, México, D. F., México: McGraw-Hill, 2012, pp. 15-16.
- [19] ABB, “Guía de productos de alta tensión: Condensadores para el filtro de armónicos”, junio 2015, pp. 4-8 [en línea]. Disponible: [https://library.e.abb.com/public/897462d590876b5fc125791a003bd1e0/1TXA007107G0701\\_CT8.pdf](https://library.e.abb.com/public/897462d590876b5fc125791a003bd1e0/1TXA007107G0701_CT8.pdf)
- [20] S. Ramírez y E. Cano, *Calidad del servicio de energía eléctrica*. Manizales, Colombia: Publicaciones Universidad Nacional de Colombia, 2006, pp. 21-101 [en línea]. Disponible en: <http://www.bdigital.unal.edu.co/5073/1/samuelramirezcastano.2006.pdf>
- [21] IEEE, “IEEE Recommended Practice for Monitoring Electric Power Quality I”, IEEE Std 1159-2009, 25, junio 2009. [en línea]. Disponible en: <http://ieeexplore.ieee.org/servlet/opac?punumber=5154052>
- [22] J. Seymour y T. Horsley, *Los siete tipos de problemas en el suministro eléctrico*. Rhode Island, USA: APC publications, 2005, pp. 4-18 [en línea]. Disponible en: [http://www.apc.com/salestools/VAVR-5WKLPK/VAVR-5WKLPK\\_R0\\_LS.pdf](http://www.apc.com/salestools/VAVR-5WKLPK/VAVR-5WKLPK_R0_LS.pdf)
- [23] CREG, Ministerio de Minas y Energía de Colombia (2007, DIC. 27). *Resolución 080 de 1995. Por el cual se adoptan decisiones en materia de tarifas de energía eléctrica y otras disposiciones de transición*.
- [24] S. R. K. Kanaesalingam y V. K. Ramachandaramurthy, “Intelligent Driven Power Quality Monitoring Using Pseudomeasurement Technique”, en *10th International Conference on Electrical Power Quality and Utilisation, 2009. EPQU 2009*. Poland, 2008.
- [25] R. Targosz y J. Manson, “Cost of poor power quality”, en *Handbook of Power Quality*, A. Baghini, Ed. West Sussex, Inglaterra: John Wiley y Sons, Ltd., 2008, pp. 545-594.
- [26] J. Kosmák, S. Misak y L. Prokop, “Power quality dependence on connected appliances in an off-grid system”, in *16th Int. Scien. Conf. on Electrical Power Engineering (EPE)*, Kouty nad Desnou, 2015.
- [27] J. Arrillaga, D. A. Bradkey y P. S. Bodger, *Power System Harmonic*, New York, Estados Unidos: Wiley, 1985, pp. 61-193.
- [28] C. L. Wadhwa, *Electrical Power Systems*. New Delhi, India: New Age International, 2014 [en línea]. Disponible en: <http://www.newagepublishers.com/servlet/nagetbiblio?bno=001099>
- [29] M. Islam, N. Chowdhury, A. Sakil, A. Khandakar y H. Abu-Rub, “Power Quality Effect of Using Incandescent, Fluorescent, CFL and LED Lamps on Utility Grid”, en *First Workshop on Smart Grid and Renewable Energy: sGRE 2015*, Doha, 2015.
- [30] IEEE Industry Applications Society, Power Engineering Society, *Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Electrical Power Systems*. New York, Estados Unidos: Institute of Electrical and Electronics Engineers Publications, 1992, p. 75.
- [31] Everfine ltd, “User’s Manual PF9800 Series: Power Digital Meter”, 13, nov. 2015 [en línea]. Disponible en: <http://www.everfine.net/productinfo.php?pid=62&clid=17>
- [32] International Electrotechnical Commission, “Electromagnetic compatibility (EMC) – Part 3-2: Limits – Limits for harmonic current emissions (equipment input current  $\leq 16$  A per phase)”. IEC 61000-3-2, International standard concerning the harmonics emitted by electric equipment, May 2006.