

# Caracterización de la potencia consumida por cargas residenciales basadas en fuentes conmutadas ante variaciones en la amplitud y distorsión de la señal de tensión de alimentación.

## Characterization of the power consumed by residential loads based on switched sources in the face of variations in the amplitude and distortion of the voltage supply signal.

J. Barbosa<sup>1</sup>, J. García<sup>2</sup>, F. Monsalve<sup>3</sup>, G. Malagón<sup>4</sup>, G. Ordoñez<sup>5</sup>

<sup>1</sup>GISEL, Ingeniería Eléctrica, Universidad Industrial de Santander, Colombia. Email: juan.barbosa@correo.uis.edu.co

<sup>2</sup>GISEL, Ingeniería Eléctrica, Universidad Industrial de Santander, Colombia. Email: jesus.garcia3@correo.uis.edu.co

<sup>3</sup>GISEL, Ingeniería Eléctrica, Universidad Industrial de Santander, Colombia. Email: fainner.monsalve@correo.uis.edu.co

<sup>4</sup>GISEL, Ingeniería Eléctrica, Universidad Industrial de Santander, Colombia. Email: gabriel.malagon@correo.uis.edu.co

<sup>5</sup>GISEL, Ingeniería Eléctrica, Universidad Industrial de Santander, Colombia. Email: gaby@uis.edu.co

RECIBIDO: abril 21, 2017. ACEPTADO: junio 02, 2017. VERSIÓN FINAL: noviembre 01, 2017

### RESUMEN

La mayoría de los trabajos encontrados en la literatura presentan modelos matemáticos de potencia en función de la tensión, sin tener en cuenta la distorsión de esta señal ni los efectos que puedan tener dichas perturbaciones en el consumo de potencia de cargas no lineales. En este artículo se analiza el comportamiento de cargas típicas en sistemas de baja tensión de tipo residencial: una luminaria tipo CFL, una luminaria tipo LED de 15 W cada una y un televisor LCD de 115 W de potencia nominal y 29 pulgadas. El estudio se enfoca en el análisis del consumo de potencia, y el comportamiento de los parámetros de los modelos ZIP y Exponencial de las mismas al ser sometidas a variaciones de amplitud, ángulo de fase y distorsión de la señal de tensión de alimentación.

Inicialmente, se definen los escenarios de prueba en el laboratorio con el fin de realizar una comparación del consumo de potencia bajo condiciones de distorsión de tensión, en donde la señal de tensión sinusoidal se fija como referencia. Posteriormente, se establece un procedimiento para la realización de las pruebas en el laboratorio. Finalmente, se analizan los datos adquiridos durante la monitorización de los escenarios de prueba con el objeto de cuantificar los efectos en el comportamiento de la potencia en las cargas por cuenta de las variaciones de la señal de tensión de alimentación. Las potencias consumidas por las cargas resultan ser mayores cuando están alimentadas con tensiones distorsionadas y los parámetros de los modelos ZIP y exponencial varían ante estas perturbaciones.

**PALABRAS CLAVE:** Potencia IEEE 1459, Algoritmo de Budeanu, Algoritmo de Fryze, Modelo ZIP, Modelo Exponencial.

### ABSTRACT

Most of the studies found in the literature present mathematical models of power as a function of voltage, without taking into account the distortion of this signal or the effects that those disturbances may have on the power consumption of nonlinear loads. In this paper the behavior of typical loads in residential low voltage systems is analyzed: a CFL type lamp, a LED type lamp and a 29 inch LCD TV. The study focuses on the analysis of the power consumption and the behavior of the parameters of the ZIP and Exponential models of the same when subjected to variations of amplitude, phase angle and distortion of the voltage supply signal.

Initially, the test scenarios are defined in the laboratory in order to make a comparison of power consumption under conditions of voltage distortion, where the sinusoidal voltage signal is set as a reference. Subsequently, a procedure is established for carrying out the tests in the laboratory. Finally, the data acquired during the monitoring of the test scenarios is analyzed in order to quantify the effects on the behavior of the power in the loads due to the variations of



the voltage supply signal. The powers consumed by the loads prove to be greater when fed with distorted voltages and the parameters of the ZIP and exponential models vary in these perturbations.

**KEYWORDS:** IEEE 1459 standard, Budeanu's algorithm, Fryze's algorithm, ZIP model, Exponential model.

## 1. INTRODUCCIÓN

El uso racional de la energía busca aumentar la eficiencia y control de los recursos naturales, en este sentido, tecnologías de menor consumo de energía se han integrado masivamente al sistema eléctrico, sin embargo, múltiples cargas conectadas que en su interacción podrían generar problemas significativos en la calidad de la potencia, entre ellos la distorsión de tensión y corriente [1]. Estos problemas en la calidad de potencia en el sistema de distribución residencial se ven reflejados en distorsiones de tensión características como lo son las de tipo Flat-Top y Pointed-Top, las cuales son producidas por cargas no lineales presentes en el sistema o rectificadores de seis pulsos en la industria.

Este artículo cuantifica el consumo adicional de potencia cuando se alimentan cargas tipo LED y CFL, así como televisores LCD con tensiones de alimentación distorsionadas típicas en sistemas de baja tensión respecto a la tensión de alimentación sinusoidal, para ello se estiman las potencias mediante los algoritmos de medida propuestos por Budeanu, Fryze e IEEE 1459 Budeanu [2], Fryze [3], IEEE 1459 [4]. Además se calculan los parámetros de los modelos ZIP y Exponencial en condiciones sinusoidales y se comparan los resultados frente a las variaciones de distorsión, regulación y ángulo de fase de la señal de tensión de alimentación.

## 2. METODOLOGÍA

La metodología propuesta para el desarrollo de este trabajo está compuesta por las etapas citadas a continuación.

El acondicionamiento de la señal: consiste en la programación en la fuente controlada de las señales de tensión de alimentación a las cuales se va someter la carga.

Medición de parámetros, esta etapa hace referencia al proceso en el que se obtienen y almacenan las señales de tensión y corriente con el analizador de calidad de la energía.

Finalmente para mostrar los resultados y realizar el análisis de los mismos, las mediciones de los parámetros de corriente y tensión son adquiridas y tratadas por medio de un script en Matlab.

Los escenarios de prueba a los que se someten las cargas se consolidan en la Figura 1, en donde se describen las

formas de onda de la señal de tensión de alimentación que se implementaron.

El tipo de señal sinusoidal permite obtener un punto de referencia de la respuesta de la carga. Los tipos de señal Flat-Top y Pointed-Top son señales características del sistema de distribución [1].

Los tipos de onda medida casa 1 y medida casa 2 son formas de onda de tipo Flat- Top medidas en dos residencias de la ciudad de Bucaramanga, estas consideran los hábitos de consumo en la región. El THDV para la señal tipo medida casa 1 es de 3.56% y para la señal tipo medida casa 2 es 3.66%. El quinto armónico predomina en ambos tipos de señal, corresponde a 3.32% y 3.57% del armónico fundamental respectivamente.

El barido armónico de la señal de tensión de alimentación permite analizar la respuesta de corriente de la carga ante múltiples señales de tensión de alimentación en donde en cada una de las señales está presente la fundamental y un armónico impar específico, por ejemplo: componente fundamental más tercero armónico, fundamental más quinto armónico y así sucesivamente hasta llegar al onceavo armónico. Cada nueva señal corresponde a una variación de la magnitud y fase del orden armónico en estudio, proporcionando información acerca del impacto provocado en el consumo de potencias ante dichas distorsiones.

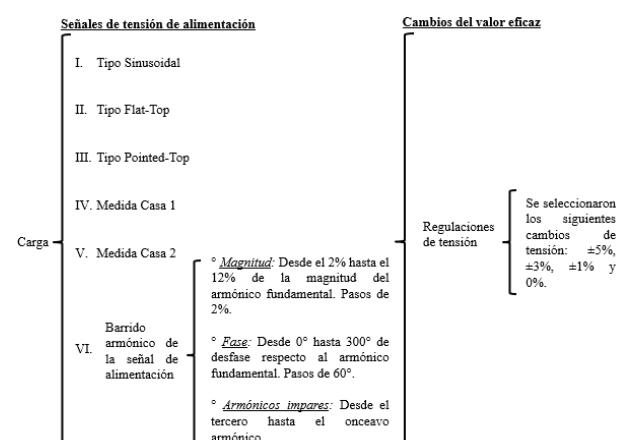


Figura 1. Organigrama de los escenarios de prueba. **Fuente.** Elaboración propia.

Para el cálculo de los parámetros del modelo ZIP se implementa un ajuste cuadrático para modelar el

Caracterización de la potencia consumida por cargas residenciales basadas en fuentes conmutadas ante variaciones en la amplitud y distorsión de la señal de tensión de alimentación.

consumo de potencia activa en función de la tensión eficaz de alimentación, este ajuste se realiza con el fin de garantizar la independencia lineal de las medidas y viene dado por la ecuación 1 [5].

$$P = P_0 [Z_p \left( \frac{V_i}{V_0} \right)^2 + I_p \left( \frac{V_i}{V_0} \right) + P_p] \quad (1)$$

Donde  $V_i$  la tensión de operación,  $V_0$  la tensión nominal y  $P_0$  es el valor nominal de potencia activa de la carga. Los coeficientes  $Z_p$ ,  $I_p$  y  $P_p$  corresponden a la característica de impedancia, corriente y potencia constante respectivamente.

En el caso del modelo Exponencial el ajuste de la potencia activa consumida en función de la tensión está dada por la ecuación 2 [5].

$$P_i = P_0 \left( \frac{V_i}{V_0} \right)^\alpha \quad (2)$$

Siendo  $V_i$  y  $V_0$  la tensión de operación y nominal respectivamente,  $P_0$  el valor nominal de potencia activa de la carga. El parámetro  $\alpha$  describen el comportamiento de la carga.

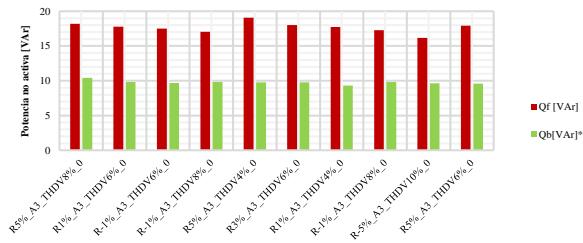
### 3. RESULTADOS

#### 3.1. Cuantificación de potencia consumida.

Para el barrido armónico de la señal de alimentación en la Figura 2 se muestra una comparación entre las potencias reactivas calculadas a partir de los modelos matemáticos Budeanu y Fryze para la luminaria tipo CFL, el televisor tipo LCD y la luminaria tipo LED respectivamente. En dicha figura, se presentan las diez señales dentro del barrido armónico para las cuales se presenta una mayor diferencia entre la potencia no fundamental según IEEE 1459 (Sn) y la potencia no activa (Qf) según Fryze.

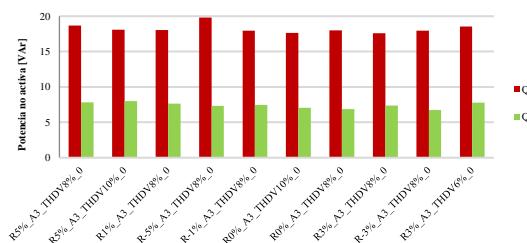
En todos los casos Qb es de carácter capacitivo mientras que Qf es inductivo. En el caso de las luminarias CFL y LED estas potencias difieren en aproximadamente un 50% (Ver Figuras 2.A y 2.C). Para el televisor LCD, el registro de energía reactiva en por unidad disminuye comparado con las dos luminarias, lo cual se explica con el compensador de factor de potencia activo propio de esta carga en su composición circuital (Ver Figura 2.B).

#### Medidas Budeanu y Fryze



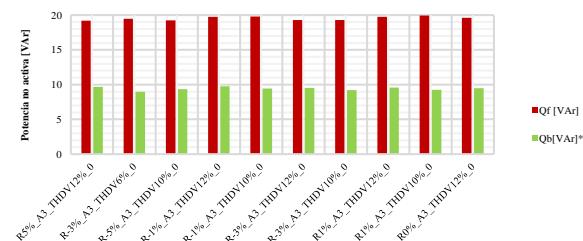
A. Potencias Budeanu y Fryze en CFL.

#### Medidas Budeanu y Fryze



B. Potencias Budeanu y Fryze para el televisor LCD.

#### Medidas Budeanu y Fryze



C. Potencias Budeanu y Fryze en LED.

Figura 2. Comparación entre las potencias reactivas calculadas a partir de los modelos matemáticos Budeanu y Fryze. **Fuente.** Elaboración propia.

Las Figuras 3, 4 y 5 cuantifican algunos parámetros propuestos por el estándar IEEE 1459 para una señal de tensión de alimentación del barrido armónico seleccionado entre los 10 casos descritos en la Figura 2. Para la luminaria tipo CFL el caso de estudio con señal de tensión de alimentación tipo R5%\_A3\_THDV4%\_0 (ver Figura 3), corresponde a la regulación de tensión de +5%, señal de tensión con componente fundamental y tercer armónico, THDV del 4% y ángulo de fase de 0°. El consumo de energía no fundamental es del 47% respecto a la potencia de dimensionamiento. De este 47%, el 99.63% es causado por la distorsión en corriente.

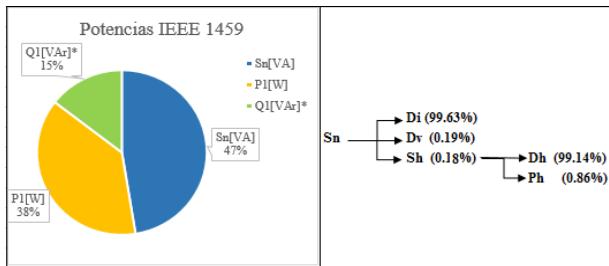


Figura 3. Parámetros IEEE 1459 en luminaria tipo CFL con señal de alimentación R5%\_A3 THDV4%\_0. **Fuente.** Elaboración propia.

Para el televisor LCD el caso seleccionado es R1%\_A3 THDV8%\_0. En la Figura 4 se observa como la potencia no fundamental representa un 5% de la potencia de dimensionamiento, mientras que la potencia activa fundamental constituye el 94% de la misma. De la potencia no útil se aprecia que la distorsión en corriente influye un 91.3%.

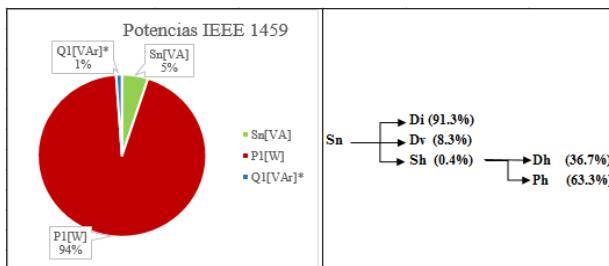


Figura 4. Caso aleatorio para el televisor LCD: R1%\_A3 THDV8%\_0. **Fuente.** Elaboración propia.

El caso de estudio seleccionado para la luminaria tipo LED es R1%\_A3 THDV12%\_0 (Figura 5). La potencia no fundamental representa el 55% de la potencia de dimensionamiento en esta carga, de este porcentaje, el 98.2% es producida por distorsión en corriente. El porcentaje de influencia de la distorsión en corriente es similar para las dos luminarias analizadas, a pesar de que la polución armónica de tensión es 8% mayor en el caso de la luminaria LED.

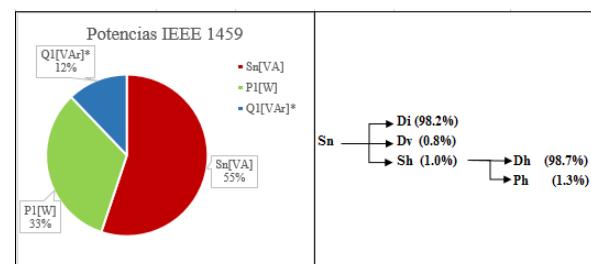


Figura 5. Parámetros IEEE 1459 luminaria tipo LED: R1%\_A3 THDV12%\_0. **Fuente.** Elaboración propia.

A continuación se presentan las potencias consumidas por cada carga al ser sometidas a diferentes tipos de onda de tensión de alimentación: sinusoidal, Flat-Top, Pointed-Top, la señal medida casa 1 y medida casa 2. Para el caso de la luminaria tipo CFL, el consumo de potencia activa se muestra en la Figuras 6. El consumo de potencia aumenta al excitar la carga con ondas de tensión alimentación distorsionadas en comparación con el sinusoidal puro. El mayor consumo se da en con la señal de alimentación tipo Pointed-Top.

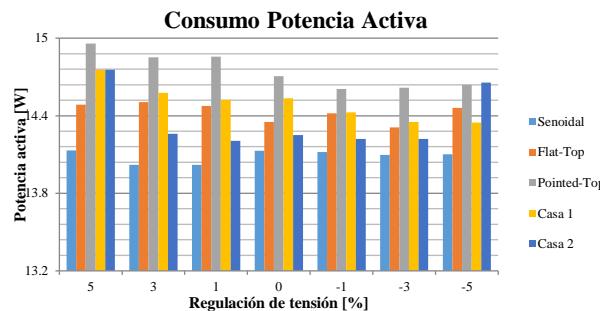


Figura 6. Consumo de potencia activa para la lámpara CFL. **Fuente.** Elaboración propia.

Para la luminaria tipo LED, la Figura 7 ilustra la potencia activa consumida en cada caso de operación. El caso donde la señal de tensión de alimentación es tipo Flat-Top, tiene igual o menor consumo que la sinusoidal, sin embargo la potencia reactiva es mayor en esta última. En el caso de regulación de tensión del 5%, la señal de tensión de alimentación tipo Pointed-Top tiene un consumo de potencia activa que excede el valor nominal de 15W.

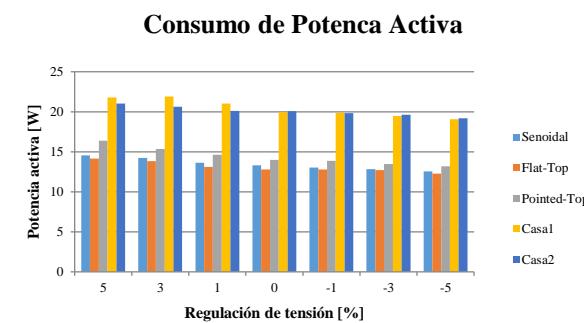


Figura 7. Consumo de potencia activa para la luminaria tipo LED. **Fuente.** Elaboración propia.

El televisor LCD tiene un comportamiento dinámico en el consumo de potencia activa como se observa en la Figura 8. Para las regulaciones de -5% y 5% el mayor consumo es generado por la tensión de alimentación tipo sinusoidal. Para los demás escenarios de regulación de tensión, prevalece en consumo cuando la señal de tensión de alimentación es de tipo Pointed-Top y Flat-Top, en la

Caracterización de la potencia consumida por cargas residenciales basadas en fuentes conmutadas ante variaciones en la amplitud y distorsión de la señal de tensión de alimentación.

regulación -3% se presenta el mayor consumo de potencia activa.

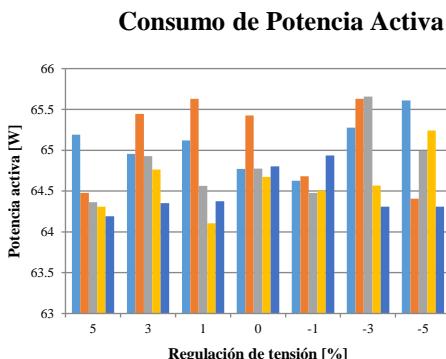


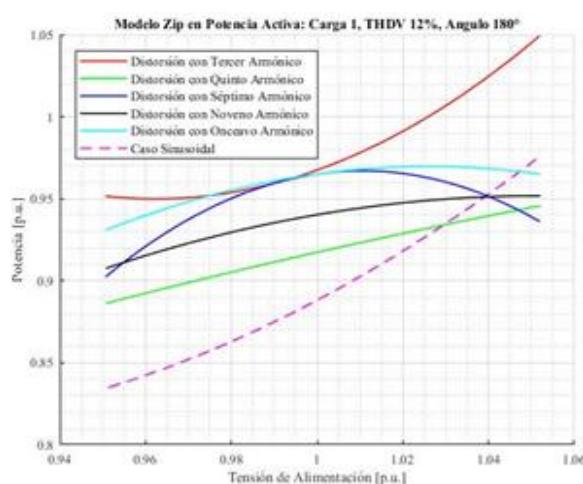
Figura 8. Consumo de potencia activa para el televisor LCD.  
Fuente. Elaboración propia.

### 3.2. Modelos ZIP y Exponencial

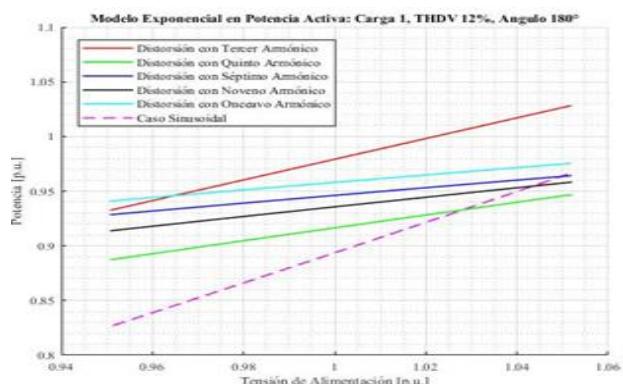
Para el barido armónico de la señal de alimentación en las Figuras 10, 11 y 12 muestran la variación en el comportamiento del consumo de potencia activa tras someter las cargas a señales de tensión de alimentación distorsionadas con componente fundamental y diversas componentes armónicas. Para el caso de la luminaria CFL, en el modelo ZIP (Figura 9.A) aumenta el consumo de potencia con la tensión siendo la distorsión con tercer armónico que tiene mayor consumo respecto al caso sinusoidal puro. Para el modelo Exponencial (Figura 9.B) se observa la variación del perfil de consumo de potencia respecto al caso sinusoidal puro.

Para el caso del televisor LCD, en el modelo ZIP (Figura 10.A) el perfil del consumo cuando la señal de tensión de alimentación es distorsionada difiere del caso sinusoidal puro. Siendo la distorsión con noveno armónico la de mayor discrepancia. Para el modelo Exponencial (Figura 10.B) el consumo de potencia activa es menor en el caso sinusoidal que en todos los casos con señal de tensión de alimentación distorsionada.

Finalmente, en la luminaria tipo LED, en el modelo ZIP (Figura 11.A) el consumo de potencia activa es mayor en el caso sinusoidal puro, la distorsión con onceavo armónico es el caso que presenta mayor consumo entre todas las distorsiones. Cuando la señal de tensión de alimentación está compuesta por armónico distorsión con onceavo armónico el modelo Exponencial (Figura 11.B) disminuye el consumo de potencia con la tensión en el caso sinusoidal puro. Para las señales con presencia de séptimo y noveno armónico tienden a mantener constante el consumo de potencial al aumentar la tensión eficaz de la señal.

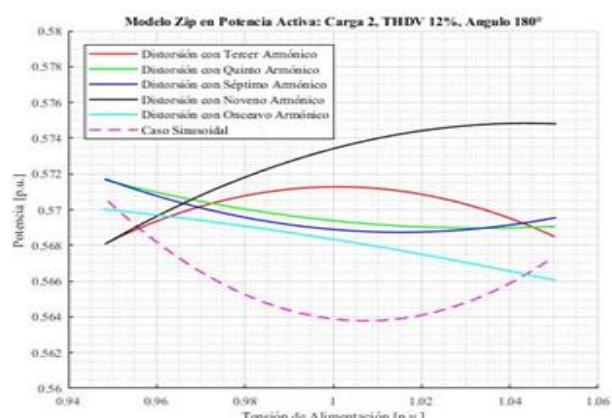


A. Modelo ZIP para un caso de estudio para la luminaria CFL

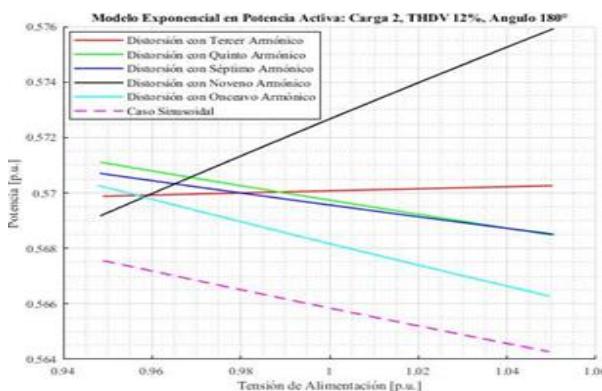


B. Modelo Exponencial para un caso de estudio para la luminaria CFL

Figura 9. Comportamiento de los parámetros del modelo ZIP y Exponencial en potencia activa de un caso de estudio para la luminaria CFL. Fuente. Elaboración propia.

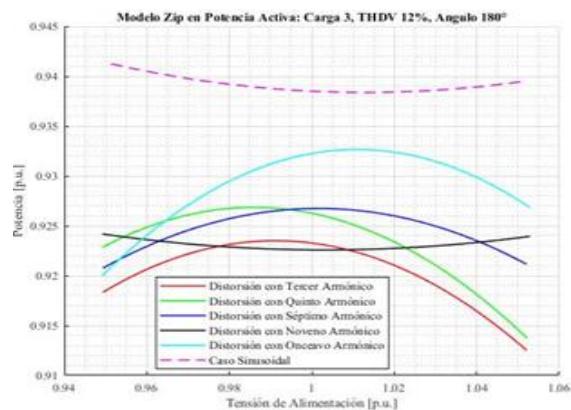


A. Modelo ZIP para un caso de estudio para el televisor LCD.

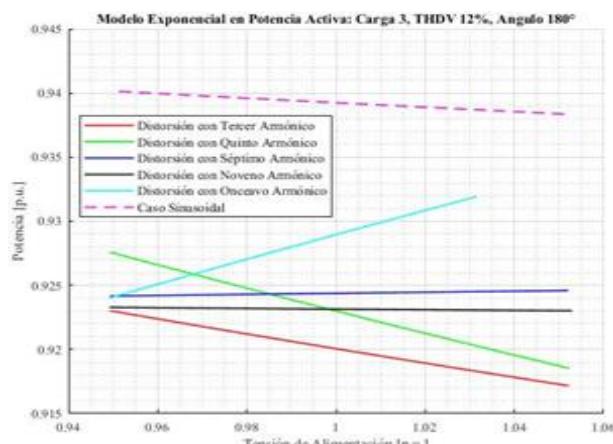


B. Modelo Exponential para un caso de estudio para el televisor LCD

Figura 10. Comportamiento de los parámetros del modelo ZIP y Exponential en potencia activa de un caso de estudio para el televisor LCD. **Fuente.** Elaboración propia.



A. Modelo ZIP para un caso de estudio para la luminaria LED



B. Modelo Exponential para un caso de estudio para la luminaria LED

Figura 11. Comportamiento de los parámetros del modelo ZIP en potencia activa de un caso de estudio para la luminaria LED. **Fuente.** Elaboración propia.

#### 4. CONCLUSIONES

- El proceso de medición de potencia no activa se afecta notablemente por el algoritmo seleccionado, análisis realizados indican diferencias alrededor del 50% entre la metodología propuesta por Fryze y Budeanu.
- En el análisis propuesto por IEEE 1459 se identifica que la distorsión de corriente prima sobre la distorsión de tensión en todos los casos analizados, ya que se presentan valores superiores al 90% de la potencia no fundamental.
- La luminaria tipo LED tiene mayor intensidad luminosa respecto al CFL con un consumo menor de potencia activa de hasta 8%, pero mayor consumo de reactivos de alrededor de un 25% de su valor nominal.
- Los parámetros de los modelos ZIP y Exponential varían tras excitar la carga con señales de tensión distorsionadas, esta variaciones pueden superar el 100% dependiendo del caso seleccionado en comparación con el caso sinusoidal puro.

#### 5. BILIOGRAFÍA

- [1] M. J. Blanco Ana, Stiegler Robert, "Power Quality Disturbances caused by Modern Lighting Equipment ( CFL and LED )" *IEEE*, 2013.
- [2] IEEE, Standard IEEE 1459-Definitions for the Measurement of Electric Power Quantities Under Sinusoidal, Nonsinusoidal, Balanced, or Unbalanced Conditions. 2010.
- [3] D. Jeltsema, "Budeanu's Concept of Reactive and Distortion," *IEEE*, 2015.
- [4] A. E. Emanuel, J. A.Orr, "Fryze's Power Definition : Some Limitations," *IEEE*, 2012.
- [5] W. D. Caetano and P. Romeiro, "Load Static Models for Conservation Voltage Reduction in the Presence of Harmonics," *Energy Power Eng*, 2016.

