

Análisis de una Estrategia Backward – Forward para el Flujo Armónico de un Sistema Radial  
Monofásico Utilizando Luminarias Tipo Led

Luis Alejandro Rodríguez León y Juan José Ortiz Trujillo

Trabajo de Grado para optar por el título de Ingenieros Electricistas

Director

César Antonio Duarte Gualdrón  
Doctor en ingeniería eléctrica y computacional

Codirector (es)

Gabriel Alexis Malagón Carvajal  
Doctor en ingeniería eléctrica

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas

Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones

Ingeniería Eléctrica

Bucaramanga

2025

### **Agradecimientos**

Agradezco a Dios por permitirme llegar a este punto, a mis padres y mis hermanas por el apoyo y la paciencia a lo largo de estos años pues a pesar de la distancia y cualquiera de mis acciones siempre creyeron en mí. A mis amigos en especial a Duván y Juan por siempre estar presentes en los momentos difíciles. A la profesora Alejandra Martínez, por su guía y apoyo en el desarrollo de este trabajo de grado, y al profesor Gabriel Malagón, por sus valiosas enseñanzas y disposición para acompañarme en este proceso.

También quiero expresar mi gratitud a todas aquellas personas que fueron parte de mi camino, incluyendo aquellas que, por circunstancias de la vida, ya no están, pero que siempre tendrán un lugar especial en mi corazón. Culmino esta etapa con la certeza de que, a pesar de las dificultades, ha sido una experiencia maravillosa que me ha enseñado a seguir adelante y a convertirme en la persona que soy hoy.

*Luis Alejandro Rodríguez León*

### **Agradecimientos**

Quiero expresar mi más sincero agradecimiento a todas las personas que han sido parte fundamental en la realización de este trabajo de grado. En primer lugar, a Dios y a mi familia, quienes han sido mi pilar de apoyo incondicional.

A mi madre Magaly Trujillo Castrillón, por su amor, paciencia y por creer en mí en cada paso de este camino. Por su constante ánimo y por ser una fuente de inspiración.

A mi novia, Natalia Poveda Andrade por su amor, comprensión y apoyo incondicional. Gracias por estar siempre a mi lado, por sus sacrificios y por brindarme la fuerza necesaria para alcanzar mis metas. Este logro también es suyo.

Gracias a todas las personas que han estado a mi lado y por su apoyo incondicional, por sus sacrificios y por brindarme la fuerza necesaria para alcanzar mis metas. Este logro también es de ustedes.

*Juan José Ortiz Trujillo*

## Tabla de Contenido

Introducción	11
1. Objetivos	13
1.1 Objetivo general	13
1.2 Objetivos específicos	13
2. Antecedentes y Estado de Arte	14
3. Marco Teórico	16
3.1 Modelado en el Dominio del Tiempo	16
3.1.1 <i>Fundamentos teóricos del experimento de un armónico a la vez</i>	16
3.1.2 <i>Modelo circuital equivalente de una luminaria LED</i>	17
3.1.3 <i>Modelo de la línea</i>	19
3.1.3.1 <i>Modelo de Línea Media</i>	20
3.2 Modelos en el Dominio de la Frecuencia	21
3.2.1 <i>Modelo de Matriz de Admitancia Armónicamente Acopladas (HACAM)</i>	21
3.2.2 <i>Modelo Equivalente de Norton (NEM)</i>	22
3.3 Estrategia Backward-Forward	23
3.4 Montaje Experimental	25
4. Metodología	32
4.1 Obtención de Parámetros de la Luminaria LED de 15 W.	32
4.2 Modelado en MATLAB (Simulink)	32
4.3 Modelado en el Dominio de la Frecuencia	33
4.3.1 <i>Desempeño de los modelos HCAM y NEM</i>	33

4.4 Circuito Experimental y Escenarios de Análisis	36
5. Resultados	39
5.1 Implementación de los Modelos en el Dominio de la Frecuencia	40
5.2 Implementación de los Modelos en el Dominio del Tiempo	42
5.3 Implementación del montaje experimental	44
6. Conclusiones	51
Referencias Bibliográficas	53

**Lista de Figuras**

<b>Figura 1.</b> <i>Modelo Circuitual Equivalente de una Luminaria tipo LED</i>	18
<b>Figura 2.</b> <i>Modelo Circuitual Equivalente implementado en MATLAB (Simulink)</i>	19
<b>Figura 3.</b> <i>Modelo de línea Corta</i>	20
<b>Figura 4.</b> <i>Fuente Chroma 61701</i>	26
<b>Figura 5.</b> <i>Analizador de red PQube 3</i>	27
<b>Figura 6.</b> <i>Transformador de corriente.</i>	27
<b>Figura 7.</b> <i>Ordenador con software Softpanel.</i>	28
<b>Figura 8.</b> <i>Luminaria LED de 15W</i>	28
<b>Figura 9.</b> <i>Interruptor bipolar</i>	29
<b>Figura 10.</b> <i>Tomacorriente doble</i>	30
<b>Figura 11.</b> <i>Tramo de la línea 7 con Cable duplex</i>	30
<b>Figura 12.</b> <i>Borneras</i>	31
<b>Figura 13.</b> <i>Sistema Radial de 13 Barras</i>	33
<b>Figura 14.</b> <i>Señal de tensión y corriente reconstruida con los modelos HCAM y NEM a partir de las señales de alimentación Sinusoidal, Flat-top y Pointed-top.</i>	40
<b>Figura 15.</b> <i>MSE% obtenidas para la luminaria LED de 15W con los modelos HCAM y NEM</i>	42
<b>Figura 16.</b> <i>Simulación del sistema de 13 barras monofásico</i>	44
<b>Figura 17.</b> <i>Montaje experimental del Sistema de 13 barras monofásico</i>	45
<b>Figura 18.</b> <i>Señales de corriente reconstruidas para el sistema radial monofásico de 13 barras</i>	45

**Lista de Tablas**

<b>Tabla 1.</b> <i>Especificaciones técnicas luminaria LED de 15 W</i>	31
<b>Tabla 2.</b> <i>Características de las formas de onda de Tensión</i>	37
<b>Tabla 3.</b> <i>Parámetros del modelo circuital equivalente utilizados para modelar la luminaria LED de 15W en MATLAB(Simulink)</i>	43
<b>Tabla 4.</b> <i>Parámetros utilizados para el modelo de línea en Simulink</i>	43
<b>Tabla 5.</b> <i>MSE de las líneas para escenarios con señal de alimentación Sinusoidal</i>	46
<b>Tabla 6.</b> <i>MSE de las líneas para escenarios con señal de alimentación Flat-top</i>	47
<b>Tabla 7.</b> <i>MSE en las líneas para escenarios con señal de alimentación Pointed-top</i>	48
<b>Tabla 8.</b> <i>MSE en las barras para escenarios con señal de alimentación Sinusoidal</i>	48
<b>Tabla 9.</b> <i>MSE en las barras para escenarios con señal de alimentación Flat-top</i>	49
<b>Tabla 10.</b> <i>MSE en las barras para escenarios con señal de alimentación Pointed-top</i>	49

## Glosario

**Armónicos:** Componentes de una señal periódica que son múltiplos enteros de la frecuencia fundamental

**Carga:** Cualquier dispositivo o conjunto de dispositivos conectados a un sistema eléctrico que consume energía eléctrica

**Estrategia:** Plan o método diseñado para alcanzar un objetivo específico

**Error:** Discrepancia entre un valor calculado, observado o medido y el valor verdadero, correcto o deseado

**Radial:** Sistema o configuración en el que los componentes están dispuestos en forma de rayos que se extienden desde un punto central

**Modelo:** Representación abstracta, conceptual, matemática o física de un sistema, entidad, fenómeno o proceso

**Sistema:** Conjunto de elementos o componentes interrelacionados que trabajan juntos para lograr un objetivo común

## Resumen

**Título:** Análisis de una estrategia backward – forward para el flujo armónico de un sistema radial monofásico utilizando luminarias tipo led.\*

**Autor (es):** Luis Alejandro Rodriguez y Juan José Ortiz Trujillo\*\*

**Palabras Clave:** Sistema radial, Flujo armónico, Luminarias tipo LED, Estrategia Backward – Forward, Modelo en el dominio de la frecuencia.

## Descripción

Este trabajo de grado analiza una estrategia backward-forward implementada en un sistema radial monofásico de baja tensión de 13 barras con luminarias LED de 15 W. Para ello, se modela el sistema utilizando modelos de carga en el dominio de la frecuencia como el de matriz de admitancias armónicamente acopladas (HCAM), y el equivalente de Norton (NEM), y en el dominio del tiempo un modelo circuital equivalente optimizado mediante la estimación de parámetros óptimos (OPE) y posteriormente implementado en MATLAB (Simulink). Para obtener las medidas, se realizan experimentos como el de un armónico a la vez para modelar la carga LED de 15 W. Además, este mismo sistema de 13 barras se implementa en el laboratorio con el fin de tomar medidas y comparar los resultados obtenidos en el dominio del tiempo, la frecuencia y las medidas de laboratorio en diferentes escenarios de carga y tensiones de alimentación.

Se parte del estudio de trabajos de grado previos que sirven como base para plantear un marco teórico, metodológico y de resultados, representando las diferencias entre los resultados simulados y medidos. Para ello se propone la estimación de un error medio cuadrático (MSE) que se encuentra entre el 0,583% y el 13,99%. Estos valores de MSE indican que, aunque el modelo presenta una precisión aceptable en la mayoría de los casos, existen escenarios específicos donde la discrepancia entre los resultados simulados y medidos es más significativa.

---

\* Trabajo de Grado

\*\* Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas. Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones. Ingeniería Eléctrica. Director: César Antonio Duarte Gualdrón. Doctor en Ingeniería Eléctrica y Computacional. Codirector: Gabriel Alexis Malagón Carvajal. Doctor en Ingeniería Eléctrica.

## Abstract

**Title:** Analysis of a backward – forward strategy for harmonic flow in a single-phase radial system using led luminaries.\*

**Author (s):** Luis Alejandro Rodriguez León y Juan José Ortiz Trujillo \*\*

**Key Words:** Radial system, Harmonic flow, LED luminaries, Backward – Forward strategy, Frequency dominion model.

## Description

This degree work analyzes a backward-forward strategy implemented in a 13-bar single-phase low voltage radial system with 15 W LED luminaires. For this purpose, the system is modeled using frequency domain load models such as the harmonically coupled admittance matrix (HCAM), and the Norton equivalent (NEM), and in the time domain an equivalent circuit model optimized by optimal parameter estimation (OPE) and subsequently implemented in MATLAB (Simulink). To obtain the measurements, experiments such as one harmonic at a time are performed to model the 15 W LED load. In addition, this same 13-bar system is implemented in the laboratory in order to take measurements and compare the results obtained in time domain, frequency and laboratory measurements in different load scenarios and supply voltages.

We start from the study of previous degree works that serve as a basis to propose a theoretical, methodological and results framework, representing the differences between simulated and measured results. For this purpose, the estimation of a mean squared error (MSE) between 0.583% and 13.99% is proposed. These MSE values indicate that, although the model presents an acceptable accuracy in most cases, there are specific scenarios where the discrepancy between simulated and measured results is more significant.

---

\* Degree Thesis

\*\* Faculty of Physicomechanical Engineering. School of Electrical, Electronic and Telecommunications Engineering. Electrical Engineering. Director: César Antonio Duarte Gualdrón. PhD in Electrical and Computer Engineering. Codirector: Oscar Arnulfo Quiroga. PhD in Electrical Engineering.

## Introducción

Actualmente, el impacto de las cargas no lineales en los sistemas de distribución eléctrica es cada vez más significativo. Año tras año, los usuarios introducen un número creciente de estas cargas, lo que resulta en una mayor distorsión armónica en la red eléctrica. La distorsión armónica puede causar sobrecalentamiento en los conductores y transformadores, reducir la eficiencia de la energía transmitida y afectar la calidad de la energía suministrada a los usuarios finales. Además, puede generar problemas de compatibilidad electromagnética y afectar el funcionamiento de equipos sensibles. Asimismo, las luminarias tipo LED y electrodomésticos que utilizan tecnología de inversor son ejemplos de cargas no lineales que están siendo cada vez más utilizadas en sistemas de distribución eléctrica. Aunque todos estos equipos ofrecen ventajas significativas en términos de eficiencia energética y durabilidad, también distorsionan la señal de corriente, lo que puede causar distorsión armónica. De esta forma se requieren soluciones y/o estrategias innovadoras que permitan estimar eficazmente la distorsión armónica y de esta manera se logren moderar los efectos en la calidad y estabilidad del suministro eléctrico, así como garantizar la eficiencia y fiabilidad de los equipos y los sistemas de distribución eléctrica. Este trabajo de grado está centrado en el análisis una de estas estrategias para la estimación de la distorsión armónica, la cual tiene el potencial de estimar de una mejor manera la distorsión armónica. De esta manera este trabajo evalúa el desempeño de la estrategia en donde se emplea un método backward-forward de simulación para el flujo armónico en el dominio de la frecuencia, y se utilizan modelos en el dominio de la frecuencia basados en matrices de admitancia, y se comparan los resultados de simulación con mediciones tomadas en el laboratorio. Este trabajo proporciona información valiosa para el diseño de un algoritmo que permita a los operadores de red y los ingenieros

electricistas, seguir contribuyendo al avance del conocimiento en el campo de la calidad de la energía eléctrica y la gestión de sistemas eléctricos.

## 1. Objetivos

A continuación, se describen los objetivos que se plantean como las metas que guiarán el desarrollo y la ejecución de este trabajo de grado.

### 1.1 Objetivo general

Implementar en el laboratorio un sistema radial de iluminación tipo LED, para evaluar el desempeño de una estrategia backward – forward de simulación para el flujo armónico en el dominio de la frecuencia con respecto a mediciones tomadas en el laboratorio.

### 1.2 Objetivos específicos

Diseñar y montar un sistema radial de iluminación utilizando luminarias tipo LED en el laboratorio, que permita evaluar el flujo armónico en el dominio de la frecuencia.

Llevar a cabo mediciones experimentales en el laboratorio para evaluar la eficiencia del sistema radial de iluminación LED.

Realizar una síntesis comparativa entre los resultados experimentales obtenidos de un sistema radial de iluminación utilizando cargas LED y los modelos de simulación.

## 2. Antecedentes y estado del arte

En este capítulo se presentan estudios previos que son relevantes para el desarrollo del trabajo de grado.

En (Estupiñan Lugo & Uyabán Bonilla , 2024), se parametrizan luminarias LED mediante un experimento denominado un armónico a la vez, en donde se establecen límites de distorsión y regulación de tensión como lo establece la IEEE 519 2014 (Biblioteca Virtual de la Universidad Industrial de Santander , 2014) y la ANSI C84.1-2011 (NEMA: Asociación Nacional de Fabricantes Eléctricos [nema], 2006) respectivamente para establecer los límites en la variación de la señal de tensión del experimento. De acuerdo con el estándar ANSI C84.1-2011 (NEMA: Asociación Nacional de Fabricantes Eléctricos [nema], 2006) se establece un límite no superior del 5% respecto al valor de tensión nominal de alimentación, que se consideró como base 120 V. Asimismo, el experimento se lleva a cabo en el laboratorio, en donde se varía sistemáticamente la tensión de suministro (magnitud y ángulo de fase para cada orden armónico) esto permite establecer un método de ajuste óptimo de parámetros en donde se comparan las medidas obtenidas de corriente con los resultados de simulación de la corriente en un modelo circuital equivalente para las luminarias LED de 5, 9, 11, 13, 15 W

(Capacho, Miguel, & León Carvajal, 2023), estudia modelos en el dominio de la frecuencia, como el NEM (Norton Equivalent Model) y el HCAM (Harmonically Coupled Admittance Matrix), y los implementa en el análisis de flujo armónico radial. Los autores validan estos enfoques a través de datos de salida generados en MATLAB (Simulink) que permite evaluar la calidad de las estimaciones hechas añadiendo armónicos en la señal de alimentación y otros parámetros eléctricos bajo condiciones dinámicas.

En este trabajo de grado se implementa el sistema radial de 13 barras propuesto por (Capacho, Miguel, & León Carvajal, 2023) y se adapta con cargas LED de 15W. Inicialmente se implementa este sistema en laboratorio, posteriormente las cargas son modeladas en el dominio de la frecuencia a partir de medidas obtenidas mediante el experimento "un armónico a la vez", enseguida se ajustan los modelos HCAM y NEM utilizando estas medidas. Asimismo, estas medidas también se utilizan para obtener parámetros de un modelo circuital equivalente para una luminaria LED, mediante un método de ajuste óptimo de parámetros como se plantea en (Estupiñan Lugo & Uyabán Bonilla , 2024). Así, se obtiene un sistema radial de 13 barras monofásico con cargas LED de 15W, simulado en el dominio de la frecuencia y en el dominio del tiempo con MATLAB (Simulink), que se compara con el mismo sistema diseñado y montado en un laboratorio. Se evalúa la convergencia de una estrategia de barrido backward-forward en un sistema con modelos de la frecuencia, así como el mismo modelo implementado en MATLAB (Simulink) para la simulación en el dominio del tiempo. De esta manera se comparan los resultados obtenidos en simulación (dominio del tiempo y dominio de la frecuencia) con un sistema monofásico en baja tensión de 13 barras con cargas LED de 15 W en un entorno práctico de laboratorio. Esta comparación no solo permite validar el desempeño de los modelos, sino también comprender de una mejor manera el comportamiento de las distorsiones de la señal de corriente en un contexto práctico.

### 3. Marco teórico

En este capítulo se abordan los fundamentos teóricos necesarios para comprender los modelos y estrategias implementados para el análisis, y la implementación de un sistema radial monofásico de 13 barras en baja tensión en un ambiente de laboratorio.

#### 3.1 Modelado en el dominio del tiempo

En esta sección se presentan los modelos y herramientas utilizados para construir un sistema de 13 barras en MATLAB (Simulink), basado en datos y medidas obtenidos de una luminaria LED de 15 W. Se incluyen fundamentos y conceptos teóricos necesarios para representar este sistema en el dominio del tiempo.

##### *3.1.1 Fundamentos teóricos del experimento de un armónico a la vez*

El experimento de un armónico a la vez es una técnica utilizada para la estimación de parámetros en modelos de cargas no lineales. Este método consiste en variar sistemáticamente la magnitud y el ángulo de fase de la tensión de alimentación de una carga, comenzando con la componente fundamental ( $V_1$ ) y añadiendo componentes armónicas uno por uno hasta un orden  $h$ . Cada variación se registra de manera que ( $V_1$ ) y ( $V_k$ ) se superponen, donde  $k$  representa cada componente armónica impar ( $k = 3, 5, \dots, h$ ) para obtener las respuestas de corriente de la carga. Estas medidas son utilizadas en un algoritmo para la estimación óptima de los parámetros circuitales del modelo en donde se compara la medida de corriente con la corriente modelada por el modelo circuital equivalente de la luminaria de 15 W a partir del cambio sistemático de estos parámetros y un error entre las dos señales.

### 3.1.2 Modelo circuital equivalente de una luminaria LED

El circuito equivalente implementado en (Estupiñan Lugo & Uyabán Bonilla , 2024) para luminarias LED se emplea para modelar la respuesta de corriente ante variaciones en la tensión de alimentación. En este trabajo este modelo es utilizado para modelar una luminaria LED de 15 W, en donde a partir de las medidas tomadas en el experimento de un armónico a la vez y la estimación óptima de parámetros se obtienen los parámetros definidos a continuación:

- **Resistencia de entrada ( $R$ ):** Conectada en serie con la fuente de tensión, representa las pérdidas resistivas del sistema. Esta resistencia afecta la corriente que fluye a través del circuito.

- **Inductancia ( $L$ ):** También conectada en serie con la fuente de tensión, simula el comportamiento reactivo del conjunto, afectando cómo la corriente cambia en respuesta a la tensión.

- **Capacitancia ( $C$ ):** Conectada en paralelo a la carga, esta capacitancia permite almacenar energía y suaviza las fluctuaciones en la tensión, mejorando la estabilidad del funcionamiento de la luminaria LED.

- **Resistencia equivalente ( $Re$ ):** Representa los componentes electrónicos internos de la luminaria LED. Modela la interacción entre los diferentes elementos del circuito.

El circuito opera bajo un proceso de carga y descarga del condensador  $C$ . Durante la carga, la corriente  $i(t)$  depende de la caída de tensión a la salida del puente rectificador y la resistencia  $R$ . La corriente se divide en componentes activas y reactiva, pasando a través de  $Re$  y  $C$ .

En estado estable, el comportamiento de la corriente y tensión en el circuito se describe mediante ecuaciones que consideran la resistencia, inductancia y capacitancia, permitiendo

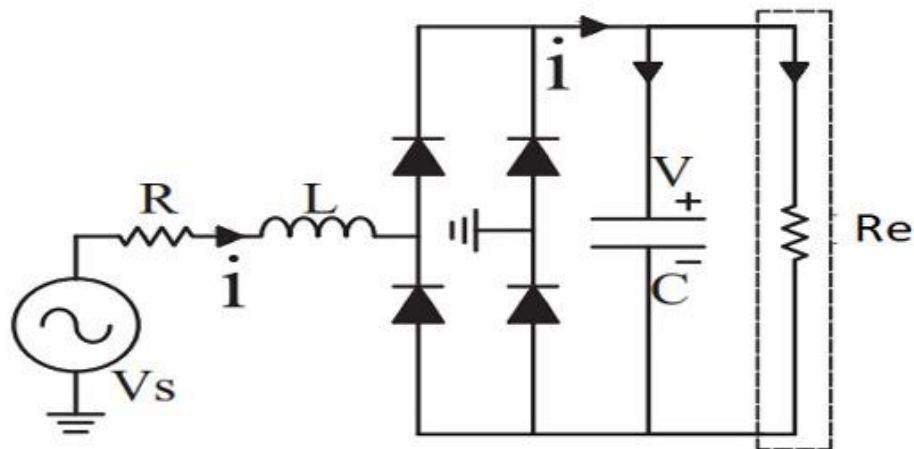
simular los estados operativos de la luminaria.

Para ajustar los parámetros  $R$ ,  $L$ ,  $C$  y  $Re$ , se aplica el método de Estimación Óptima de Parámetros (*OPE*), partiendo de los valores iniciales calculados a partir de las ecuaciones y el método presentados en (Malagón-Carvajal & Otros, 2021). Estos valores se optimizan para cada medición realizada en la luminaria LED de 15W. Posteriormente, se promedian los valores óptimos obtenidos (uno para cada medición y uno para cada parámetro del modelo) para que la salida del modelo se asemeje lo más posible a la realidad.

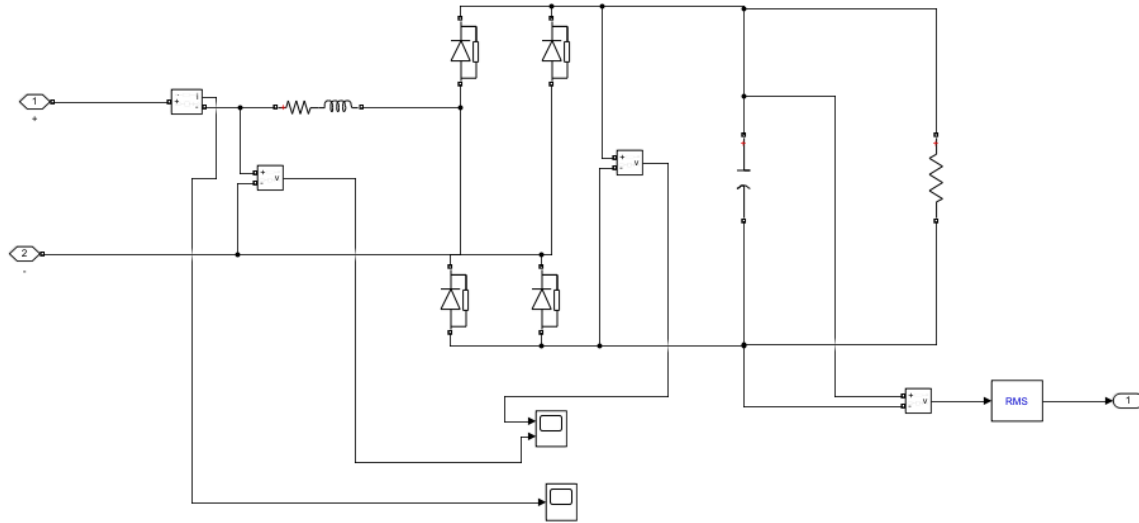
La Figura (1) muestra la representación del modelo propuesto, mientras que la Figura (2) muestra su equivalente en MATLAB (Simulink).

### Figura 1.

*Modelo Circuital Equivalente de una Luminaria tipo LED*



**Nota.** Imagen extraída de (Estupiñan Lugo & Uyabán Bonilla , 2024) (p. 5)

**Figura 2.***Modelo Circuitual Equivalente implementado en MATLAB (Simulink)*

### 3.1.3 Modelo de la línea

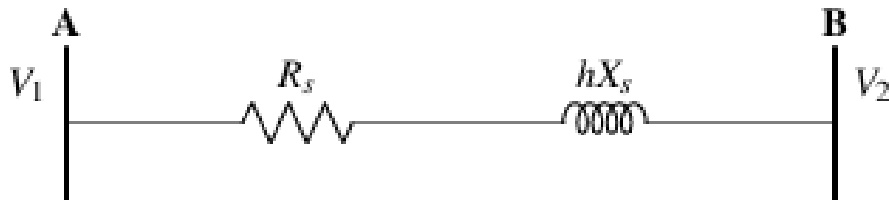
La red de distribución eléctrica es una componente esencial del sistema de suministro de energía, cuyo propósito es trasladar la energía desde las subestaciones de distribución hasta los consumidores finales. Para representar las líneas de distribución, se pueden emplear tres modelos distintos: el modelo de línea corta, el modelo de línea media y el modelo de línea larga. Estos modelos se utilizan para analizar cómo se comportan la corriente y la tensión a lo largo de la línea, considerando factores como la resistencia, la inductancia y la capacitancia.

En este trabajo de grado, se utiliza el modelo de línea corta para el diseño del circuito radial de 13 barras en MATLAB (Simulink), teniendo en cuenta algunas consideraciones como longitud de la línea cable utilizado para el diseño del mismo circuito en baja tensión en un ambiente de laboratorio.

**3.1.3.1 Modelo de línea corta.** El modelo de línea corta incluye una resistencia y una inductancia en serie, mientras que la capacitancia para este caso no es considerada. Este enfoque es similar al implementado en (Capacho, Miguel, & León Carvajal, 2023).

**Figura 3.**

*Modelo de línea Corta*



**Nota.** Imagen extraída de (Capacho, Miguel, & León Carvajal, 2023) (p. 42).

El modelo tiene una impedancia serie ( $Z_{s,h}$ ), que se compone de una resistencia serie ( $R_s$ ) y una reactancia inductiva ( $X_s$ ). La Ecuación (1) representa esta relación.

$$Z_{s,h} = R_s + jhX_s \quad (1)$$

En esta ecuación,  $jhX_s$  indica que la reactancia inductiva está multiplicada por el factor  $j$  (la unidad imaginaria) y por  $h$ , que es el orden de la componente armónica impar. El valor de  $h$  puede variar dependiendo de la componente armónica específica que se esté analizando, y  $s$  representa el orden armónico máximo que se desea considerar.

### 3.2 Modelos en el dominio de la frecuencia

Los modelos de matriz de admitancias armónicamente acopladas (HCAM) y el modelo equivalente de Norton (NEM) se emplean para representar la relación entre las variaciones de la tensión y la corriente en sistemas eléctricos que contienen cargas no lineales. Estos modelos permiten analizar cómo las variaciones de la componente armónica de la tensión, magnitud y ángulo de fase afectan el comportamiento de la corriente de la carga y son esenciales dentro de la estrategia backward-forward para la evaluación del flujo armónico. Para la estimación de los parámetros que describen los modelos HCAM y NEM se implementa un método de ajuste formulado en (Nassif , Yong , & Xu , 2010), el cual está basado en el álgebra matricial, de esta manera se consideran las ecuaciones modificadas en (Malagon-Carvajal, Ordonez-Plata, & Duarte, 2024) y se describen en los modelos que se presentan a continuación.

#### 3.2.1 Modelo de Matriz de Admitancia Armónicamente Acopladas (HCAM)

El modelo HCAM se utiliza para representar cargas no lineales en el dominio de la frecuencia y está basado en la utilización de matrices de admitancia que permiten calcular la respuesta en corriente de la carga. El modelo HCAM se expresa en la Ecuación (2).

$$I_{(n)} = I_{c(n)} + Y^+_{(n \times n)} \Delta V_{(n)} + Y^-_{(n \times n)} \Delta V_{(n)}^* \quad (2)$$

Donde:

$I_{(n)}$  es la corriente de la carga en el orden armónico  $n$ .

$I_{c(n)}$  es la corriente de corte para el orden  $n$

$Y^+_{(n \times n)}$  y  $Y^-_{(n \times n)}$  son las matrices de admitancia armónicamente acopladas. Estas matrices representan la respuesta en corriente de la carga.

La razón de tener dos matrices,  $Y^+$  y  $Y^-$  en el modelo HCAM radica en la necesidad de capturar simultáneamente las contribuciones directas y conjugadas de las tensiones armónicas para representar con precisión la respuesta armónica total de las cargas no lineales.

$V_{(n)}$  es el vector de tensiones en el orden armónico  $n$ .

$V_{(n)}^*$  es el conjugado de  $V_{(n)}$ .

$n$  representa en orden armónico.

### 3.2.2 Modelo Equivalente de Norton (NEM)

El modelo NEM también es utilizado para caracterizar cargas no lineales. Este modelo simplifica el análisis al representar la carga como una fuente de corriente equivalente en paralelo. Este modelo es especialmente útil porque permite la utilización de mediciones de corriente y tensión para estimar sus parámetros. La expresión para el modelo NEM se presenta en la Ecuación [\(3\)](#).

$$I_{(n)} = I_{C(n)} + Y_{(n \times n)} \Delta V_{(n)} \quad (3)$$

Donde:

$I_{(n)}$  es la corriente total de la carga en el orden armónico  $n$ .

$I_{C(n)}$  es la corriente de corte para el orden  $n$ .

$Y_{(n \times n)}$  es la matriz de admitancias equivalente que encapsula la dinámica de la carga no lineal.

$V_{(n)}$  es el vector de tensiones en el orden armónico  $n$ .

$n$  representa en orden armónico.

### 3.3 Estrategia backward-forward

La estrategia de backward-forward consiste en un método iterativo utilizado para calcular las corrientes y tensiones en un sistema de distribución radial. Esta técnica se implementa en dos etapas:

**Barrido hacia atrás (backward):** En esta fase, se determina la corriente en las líneas comenzando desde las últimas cargas conectadas (últimas barras de un sistema), utilizando la ley de corrientes de Kirchhoff. Se calcula la corriente en cada línea teniendo en cuenta las corrientes que fluyen hacia esas líneas desde las cargas. La Ecuación (4) representa la manera de calcular la corriente en una línea.

$$I_k = I_{k-1} + \sum_{i=1}^p I_k^{(i)} \quad (4)$$

Donde:

$I_k$  corresponde a la corriente en la línea que se está analizando.

$I_{k-1}$  es la corriente de la línea anterior.

$I_k^{(i)}$  representa el espectro armónico de corriente que fluye desde las cargas conectadas a cada barra del sistema.

$p$  es el número de cargas conectadas a la barra.

Esta fórmula permite sumar las corrientes distorsionadas que fluyen desde las cargas hasta llegar a la barra de referencia.

**Barrido hacia adelante (forward):** Después de calcular las corrientes desde las cargas hacia las líneas, se utiliza esta información para actualizar las tensiones en las barras. Se reinicia el proceso en la barra de referencia (barra Slack), asegurando que se mantengan constantes durante las iteraciones. La Ecuación (5) representa la manera de calcular la tensión en cada barra.

$$V_{k+1} = V_k + Z_k \times I_k \quad (5)$$

Donde:

$V_{k+1}$  es la tensión en la barra que se está analizando, después de considerar la influencia de la corriente en la línea.

$V_k$  es la tensión en la barra anterior.

$Z_k$  es la impedancia de la línea que conecta ambas barras, que incluye resistencia y reactancia.

$I_k$  es la corriente que fluye a través de la línea.

Esta ecuación se aplica para actualizar la tensión en cada barra a medida que se avanza en la red de distribución, desde la barra de referencia hasta las barras finales.

Este método iterativo continúa hasta que la variación en las magnitudes de tensión y corriente de una iteración a otra se encuentra dentro de una tolerancia predefinida, garantizando así una estimación precisa del flujo armónico en el sistema.

Así como en (Capacho, Miguel, & León Carvajal, 2023), se implementa esta estrategia

mediante un código en MATLAB que permite abordar la estimación de los espectros armónicos de tensiones y corrientes en un sistema de 13 barras. En este trabajo este algoritmo se ha modificado usando los modelos de cargas LED de 15W previamente ajustados a partir de mediciones obtenidas en el laboratorio con el experimento de un armónico a la vez.

### **3.4 Montaje experimental**

En esta sección se describen los instrumentos y materiales empleados para la implementación de pruebas del sistema radial de 13 barras en baja tensión, utilizando luminarias LED como cargas. Estas pruebas se llevan a cabo en el laboratorio de Uso Racional de la Energía y Energías Renovables, situado en el edificio de Alta Tensión de la Universidad Industrial de Santander. Este sistema consta de doce líneas, con un total de tres bifurcaciones y doce cargas. La barra Slack está representada por el banco de trabajo, que se conecta mediante un interruptor bipolar de 15 A. Cada tomacorriente representa una barra y están interconectados mediante cable dúplex calibre 10 AWG, que representa las líneas del sistema, con una longitud aproximada de 2 metros entre barras. Las cargas LED se conectan a las barras mediante clavijas, unidas también con cable dúplex de 20 cm a la porta luminarias. Las bifurcaciones del circuito se realizan utilizando borneras.

Para el sistema experimental, se utilizaron los siguientes equipos:

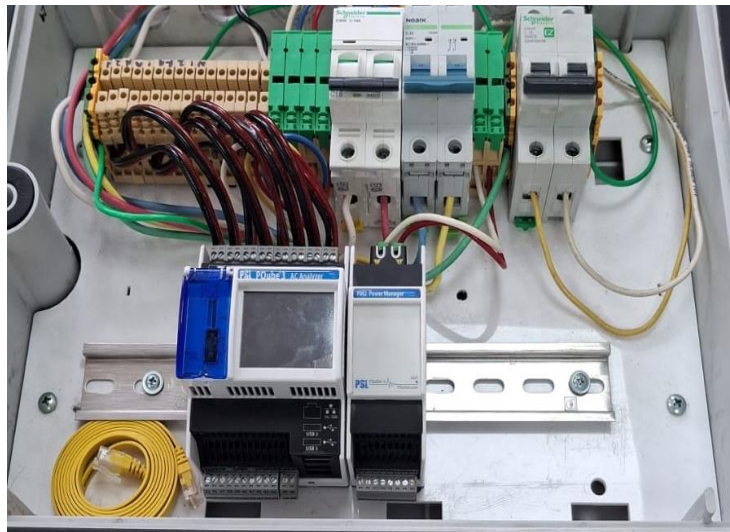
a. Fuente Chroma 61701, permite ajustar tanto la magnitud como el ángulo de fase de la tensión de las componentes armónicas de la tensión de suministro (ver Figura [4](#)).

**Figura 4.***Fuente Chroma 61701*

a. Analizador de red PQube 3, permite medir señales de tensión y corriente en las cargas configurado para capturar 128 muestras por ciclo a una frecuencia de red de 60 Hz en ocho canales de corriente y uno de tensión simultáneamente. Este analizador exporta las medidas en formato Excel, de las cuales se seleccionan 12 ciclos de las señales de tensión y corriente, conforme a la norma IEC 61000-4-30, que establece rangos y estándares para la interpretación de resultados. Estas señales se sincronizan y se guardan en archivos mat en formato double utilizando MATLAB (ver Figura 5).

**Figura 5.**

*Analizador de red PQube 3*



b. Transformador de corriente (Ct) 5A y tensión de salida 333mV, que permite registrar las señales de corriente de las líneas definidas (ver Figura 6).

**Figura 6.**

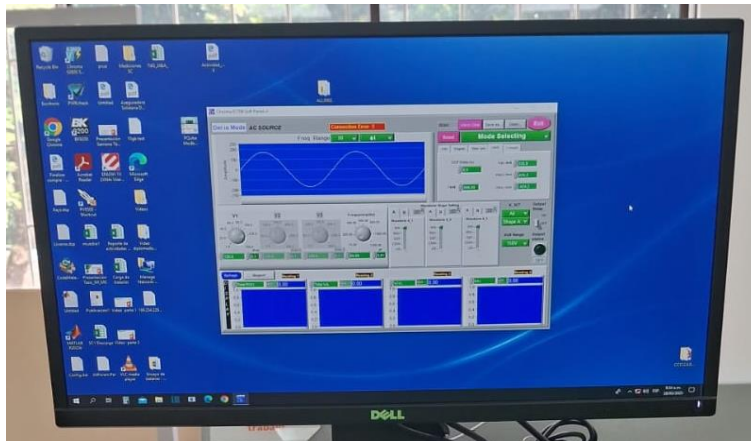
*Transformador de corriente.*



c. Ordenador para controlar la fuente programable Chroma 61701 mediante el software Softpanel (ver Figura 7).

**Figura 7.**

*Ordenador con software Softpanel.*



d. Luminarias LED de 15 W (ver Figura 8). Las especificaciones técnicas se detallan en la Tabla (1)

**Figura 8.**

*Luminaria LED de 15W*



A continuación, se proporciona una breve descripción de los materiales implementados para la construcción del circuito experimental:

e. Interruptor bipolar de 15 A, que funciona como medio de desconexión y protección del montaje experimental (ver Figura 9).

### Figura 9.

#### *Interruptor bipolar*



f. Tomacorriente monofásico doble de 15<sup>a</sup> (ver Figura [10](#)).

**Figura 10.**

*Tomacorriente doble*



g. Cable dúplex calibre 10 AWG (ver Figura [11](#)).

**Figura 11.**

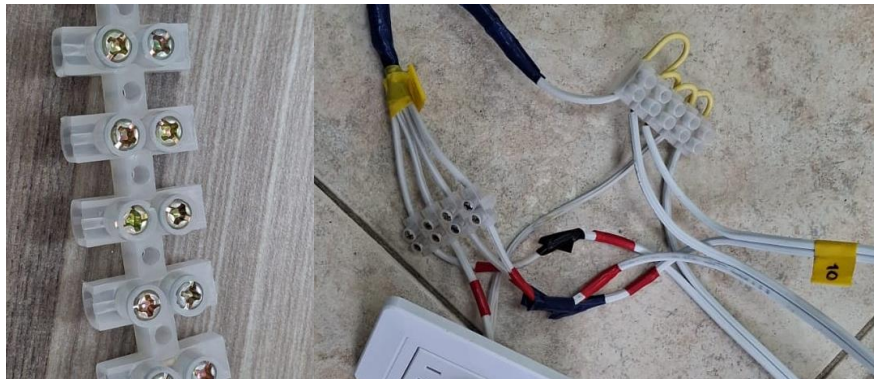
*Tramo de la línea 7 con Cable dúplex*



h. Borneras de dos pines de 10 A (ver Figura 12).

**Figura 12.**

*Borneras*



**Tabla 1.**

*Especificaciones técnicas luminaria LED de 15 W*

Referencia	Potencia	Tensión	Flujo	Frecuencia	Corriente
	[W]	[V]	[lm]	Hz	[mA]
CRD-D15W	15	120	1150	60	125

## 4. Metodología

En este capítulo se presentan el procedimiento y pasos planteados para llevar a cabo los experimentos: montajes, estados o variaciones, así como las medidas del presente trabajo de grado.

### 4.1 Obtención de parámetros de la luminaria LED de 15 W.

Se realiza el experimento de un armónico a la vez siguiendo la metodología y organización de medidas descritas por (Estupiñan Lugo & Uyabán Bonilla , 2024). En esta ocasión, el experimento se llevó a cabo para una luminaria de 15 W. Además, se establece un límite del 5% en la distorsión armónica individual, conforme a la norma UN 50160:2015.

Estas medidas permiten ajustar el modelo en el dominio del tiempo mediante un problema de optimización. Para ello se compara la corriente medida con la corriente generada a partir del modelo circuital equivalente, el cual mediante una representación matemática (ecuación de corriente de carga del modelo) que describe como la luminaria responde a diferentes tensiones de alimentación. De esta forma se minimiza la diferencia entre ambas corrientes proponiendo un error en el mean square error. Para ello, mediante un algoritmo basado en el solver fmincom de MATLAB para cada medida de corriente. Posteriormente se establece los valores medios de estos ajustes para modelar la luminaria LED de 15 W en MATLAB (Simulink).

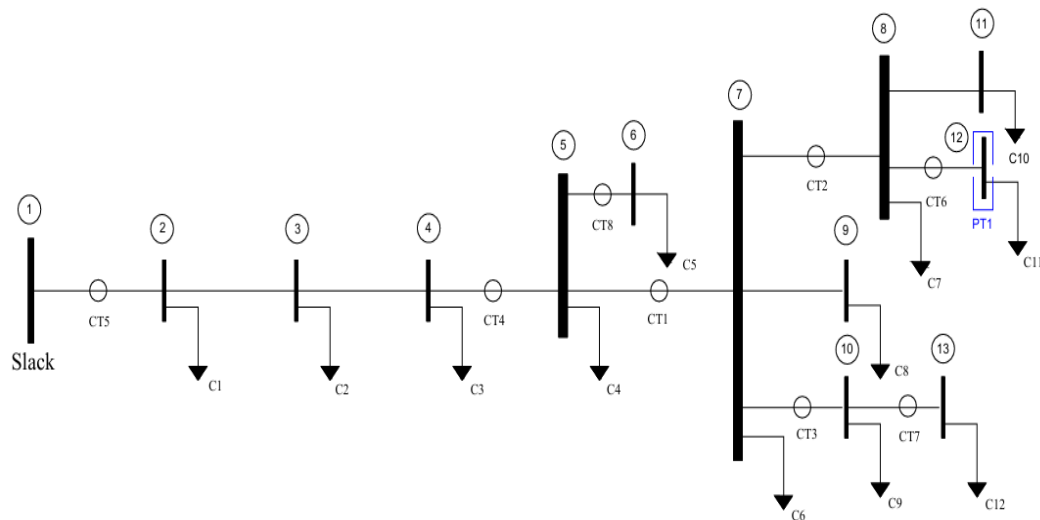
### 4.2 Modelado en MATLAB (Simulink)

Para el modelado es MATLAB (Simulink) se sigue la misma topología de la Figura [\(13\)](#) para la simulación en el dominio del tiempo comparando los resultados con el montaje realizado

en el laboratorio. Cada señal de tensión y de corriente obtenida por medio de la simulación en MATLAB (Simulink), y se visualiza mediante medidores (Bloque Scope) conectados al sistema.

**Figura 13.**

*Sistema radial de 13 Barras*



### 4.3 Modelado en el dominio de la frecuencia

Se modelan en el dominio de la frecuencia las medidas obtenidas con el experimento de un armónico a la vez para la luminaria LED de 15 W utilizando los modelos HCAM y NEM, así como el método de ajuste en (Nassif , Yong , & Xu , 2010) y descritos en las secciones [3.2.1](#) y [3.2.2](#).

#### 4.3.1 Desempeño de los modelos HCAM y NEM

Para evaluar el desempeño de los modelos HCAM y NEM se realiza una comparación entre las medidas tomadas de acuerdo con el experimento de un armónico a la vez y las señales obtenidas

de la simulación del modelo circuital equivalente. Para ello se calcula un error basado en el método propuesto por (Duarte, Ordóñez-Plata, & Malagón-Carvajal, 2023), el cual se utiliza para estimar el error de los modelos en el dominio de la frecuencia (FDM). Este método se basa en el error cuadrático medio evaluado a partir de la comparación en la señal medida y simulada. Para ello, se emplean tres ecuaciones las cuales se presentan a continuación:

### Error Cuadrático Medio Total (MSE)

$$MSE[\%] = \frac{\sum_{\mu=1}^h |I_{\mu} - I_{F\mu}|^2}{\sum_{\mu=1}^h |I_{\mu}|^2} \times 100\% \quad (6)$$

Donde  $I_{\mu}$  son las señales medidas para cada luminaria y  $I_{F\mu}$  son las señales estimadas por los modelos HCAM y NEM. El MSE proporciona una medida global del error entre las corrientes medidas y simuladas.

### Error de Magnitud (E\_mag)

$$E\_mag_{\mu}^m[\%] = \frac{[|I_{\mu}|^2 - |I_{F\mu}|^2]}{\sum_{\mu=1}^h |I_{\mu}|^2} \times 100\% \quad (7)$$

Esta ecuación calcula el error en la magnitud de la corriente para el armónico  $\mu$ . Aquí  $|I_{\mu}|$  es la magnitud de la corriente medida y  $|I_{F\mu}|$  es la magnitud calculada a partir del modelo corriente.

**Error de Desajuste de Fase (E\_ang)**

$$E\_ang_{\mu}^a[\%] = \frac{|I_{\mu} - I_{F\mu}|^2 - [ |I_{F\mu}| - |I_{F\mu}| ]^2}{\sum_{\mu=1}^h |I_{\mu}|^2} \times 100\% \quad (8)$$

Esta ecuación evalúa el desajuste en el ángulo de fase de la corriente.  $\angle I_{\mu}$  y  $\angle I_{F\mu}$  representan los ángulos de fase de las corrientes medida y simulada, respectivamente.

Esta evaluación del error se realiza para el total de medidas del experimento de un armónico a la vez. Para cada armónico se realizan 5 variaciones en magnitud y 20 variaciones en el ángulo de fase, considerando 5 órdenes armónicos. Además, la señal fundamental se varía 5 veces en regulación sin variaciones en el ángulo de fase. Para la luminaria LED de 15 W, se obtienen mediciones con señales sinusoidales, Flat-Top y Pointed-Top, sumando un total de 508 mediciones, presentando el error mediante el uso de Box-plot que se construye de la siguiente manera:

- La caja de bigotes representa el rango intercuartílico (IQR), que abarca desde el primer cuartil (Q1), correspondiente al 25% inferior de las señales, hasta el tercer cuartil (Q3), que corresponde al 75% superior de las señales.

- La línea central en la caja de bigotes indica la mediana de los errores.

Los bigotes se extienden hasta los valores dentro de 1.5 veces el rango intercuartílico desde Q1 y Q3, y los puntos fuera de esos límites se consideran valores atípicos.

Este error solo se evalúa sobre los modelos y no sobre la estrategia de flujo armónico.

#### 4.4 Circuito experimental y escenarios de análisis

Para la realización del experimento y la operación de los equipos descritos en la Sección [3.4](#), es necesario seguir los siguientes pasos:

1. Primero, se conecta la fuente Chroma 61701 a una toma de corriente regulada.
- 2 El analizador de red PQube 3 se conecta a la toma de corriente regulada del banco de laboratorio.
3. El analizador PQube 3 se conecta al ordenador del banco de trabajo mediante un cable Ethernet.
4. El circuito de 13 barras se conecta a la toma de corriente de prueba del banco de trabajo.
5. Las luminarias LED de 15W se conectan individualmente a cada una de las barras del circuito.
6. Los 8 canales del analizador PQube 3 se conectan a 8 líneas del circuito mediante transformadores de corriente (CT), permitiendo medir la corriente en dichas líneas como se muestra en la Figura [\(13\)](#).
7. El canal de tensión del analizador PQube 3 se conecta a la barra 12 del circuito experimental.
8. Se encienden la fuente Chroma 61701 y el analizador PQube 3.
9. Se pone en marcha el software de la fuente programable Chroma y del analizador PQube 3, previamente instalados en el ordenador del banco de trabajo.
10. Se configura la señal de tensión de acuerdo con la tensión de prueba que se va a analizar (Flat-Top, Pointed-Top y Sinusoidal).

11. La fuente Chroma 61701 se activa directamente a través del software instalado en el ordenador.

12. El software del analizador PQube 3 se ajusta en la ventana de comandos para capturar una instantánea.

13. Finalmente, se crea el evento en la ventana de comandos del software del analizador PQube 3. Luego, se repiten los pasos del 10 al 13 para realizar una nueva medición conforme a los escenarios que se plantean a continuación.

Para la obtención de medidas de tensión y corriente, se utilizan tres tipos de señales de alimentación: Flat-Top, Pointed-Top y Sinusoidal. Estas señales fueron obtenidas de la misma manera que en (Blanco, Stiegler, & Meyer, 2013), pero en esta ocasión con una tensión de alimentación de 120 V. El espectro armónico de dichas señales se presentan en la Tabla (2).

**Tabla 2.**

*Características de las formas de onda de Tensión*

<b>Armónicos de Tensión</b>		<b>Sinusoidal</b>	<b>Flat-top</b>	<b>Pointed-top</b>
<b>Magnitud(V)</b>	1	120	116,6	120
	3	--	2,37	3,04
	5	--	1,66	3,04
	7	--	0,89	0,05
<b>Angulo (°)</b>	1	0	0	0
	3	--	0	180
	5	--	180	0
	7	--	0	0
<b>THDv (%)</b>		0	4,92	6,13

Asimismo, se plantean los siguientes escenarios de carga, y numerados del 1 al 9:

1. Red completa con 12 cargas LED.
2. Desconexión de la carga 10.
3. Desconexión de carga 7.
4. Desconexión de las cargas 10 y 11.
5. Desconexión de las cargas 1, 2, 3, 4, y 8.
6. Desconexión de las cargas 5, 6, 9, 10 y 12.
7. Desconexión de las cargas 5, 6, 7 y 8.
8. Desconexión de las cargas 6, 8, 9 y 12.
9. Desconexión de las cargas 4 y 5.

Asimismo, estos escenarios de desconexión de cargas se analizan utilizando los tres tipos de señales de forma y/o formas de onda de tensión, tanto en el laboratorio como en las simulaciones de MATLAB (Simulink) en el dominio del tiempo, como en la estrategia backward-forward en el dominio de la frecuencia.

Para comparar todos los escenarios de carga, se estima un error medio cuadrático (MSE) con el fin de evaluar las diferencias entre los valores medidos y los simulados. Dado que el analizador de redes PQube3 solo permite medir 8 canales de corriente y uno tensión simultáneamente, solo se comparan 8 canales de corriente, y uno de tensión como se planteó anteriormente y se muestra en la Figura (13). La Ecuación (9) describe cómo calcular este error.

$$MSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2} \quad (9)$$

Donde:

$n$  es el número de muestras.

$y_i$  son las señales medidas.

$\hat{y}_i$  son las señales simuladas.

El MSE se calcula sumando los cuadrados de las diferencias entre las medidas y las señales simuladas, y luego dividiendo esa suma por el número total de muestras. Para una mejor interpretación, se utiliza un MSE porcentual, normalizando los resultados obtenidos de la Ecuación (9) como se muestra en la Ecuación (10).

$$MSE \% = \frac{MSE}{y_{irms}} \times 100 \quad (10)$$

Donde:

$y_{irms}$  representa el valor eficaz o (RMS) de los valores medidos.

## 5. Resultados

En este capítulo se presentan los resultados obtenidos tras la implementación de los modelos en los dominios del tiempo y la frecuencia, junto con el montaje experimental realizado

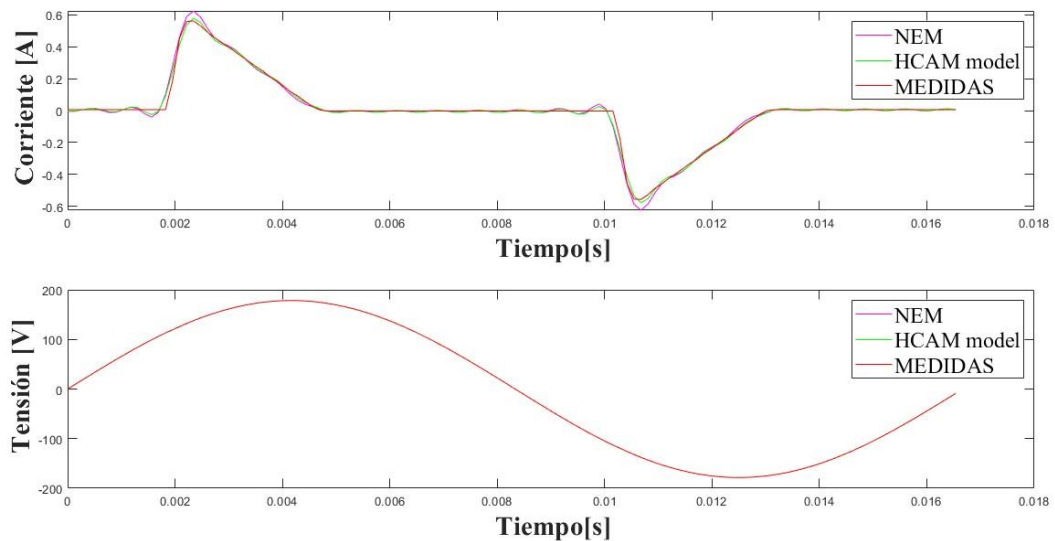
en el laboratorio.

### 5.1 Implementación de los modelos en el dominio de la frecuencia

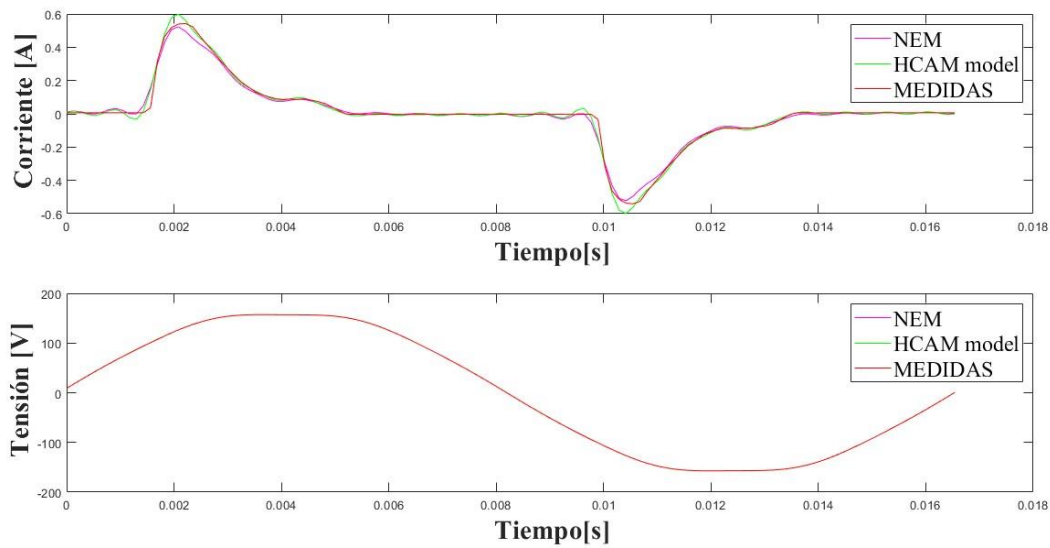
La Figura (14) muestra las reconstrucciones de las señales de corriente de salida para la luminaria LED de 15 W. A partir del modelo en el dominio de la frecuencia, así como la señal real obtenida de las medidas tomadas en el laboratorio.

**Figura 14.**

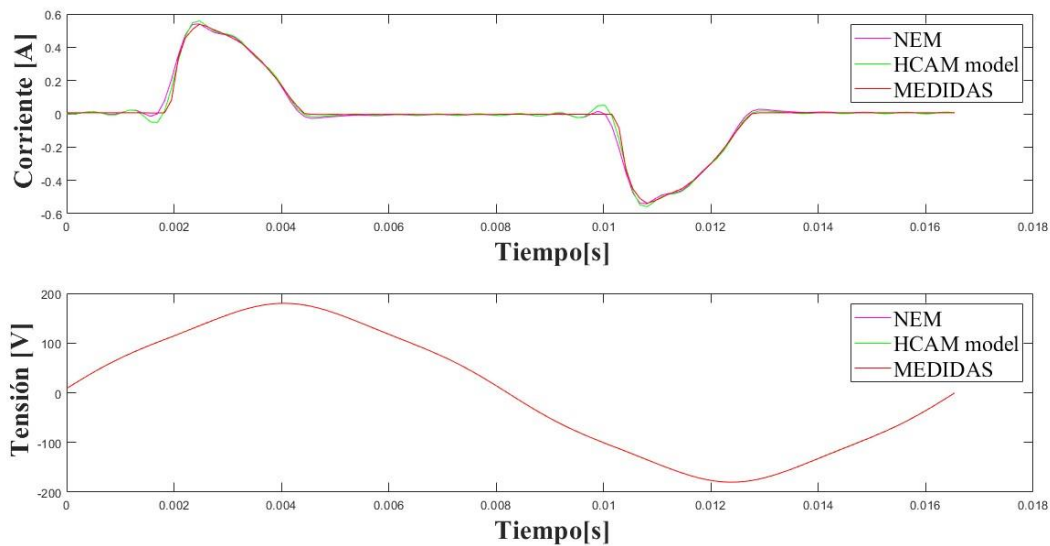
*Señal de tensión y corriente reconstruida con los modelos HCAM y NEM a partir de las señales de alimentación Sinusoidal, Flat-top y Pointed-top.*



(a) Con señal de alimentación Sinusoidal



(b) Con señal de alimentación Flat-Top



(c) Con señal de alimentación Pointed-Top

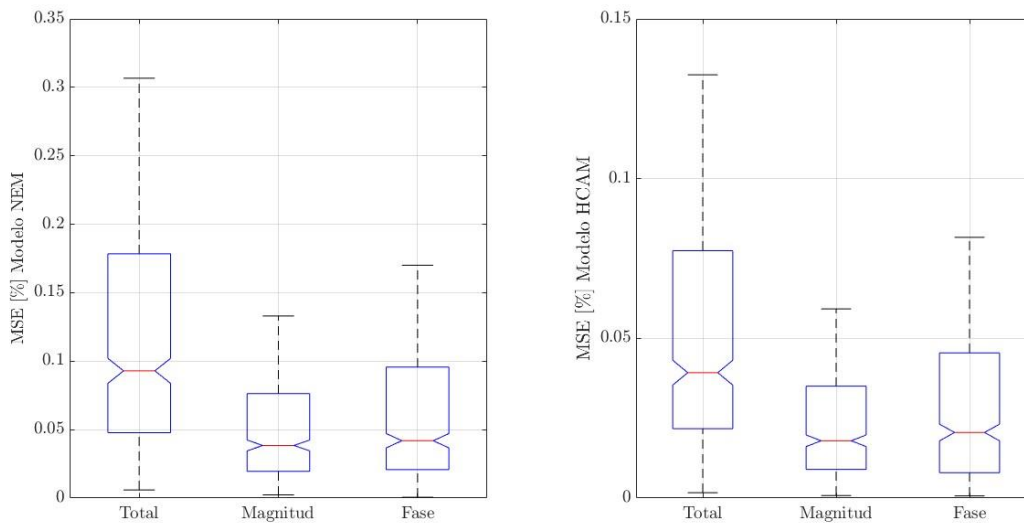
A continuación, se muestra la comparación de las señales medidas y obtenidas con los modelos HCAM y NEM, mediante errores calculados descritos en la Sección [4.3.1](#), se generan Box-plot que comparan los errores totales, de magnitud y de desajuste de fase. Cada gráfico ilustra

la distribución de los errores, lo que facilita la evaluación del rendimiento de los modelos HCAM y NEM.

Las Box-Plot generadas muestran que los modelos HCAM y NEM tienen un buen desempeño al modelar una luminaria LED de 15 W, ya que los errores encontrados no superan el 0.5% y que el rango intercuartílico no supera el 0.2% lo cual indica que la dispersión de datos se encuentra cerca al valor de la mediana. Además, se destaca que el modelo HCAM tiene un mejor desempeño cerca de 3 veces mayor que el modelo NEM, como se muestra en la Figura (15).

**Figura 15.**

*MSE% obtenidas para la luminaria LED de 15W con los modelos HCAM y NEM*



## 5.2 Implementación de los modelos en el dominio del tiempo

La Tabla (3) detalla los parámetros del modelo circuital equivalente utilizados para representar las cargas LED de 15 W distribuidas en las 12 barras obtenidos como se describe en la Sección 3.1.2. Los parámetros utilizados para el modelado de las líneas en MATLAB (Simulink)

se presentan en la Tabla (4) obtenidos de la ficha técnica del cable utilizado en el montaje de laboratorio descrito en la Sección 3.4.

**Tabla 3.**

*Parámetros del modelo circuital equivalente utilizados para modelar la luminaria LED de 15W en MATLAB (Simulink)*

Parámetro	Valor
Cdc [ $\mu F$ ]	8,9480
Xl [ $\Omega$ ]	0,0126
Ltotal [ $H$ ]	0,033423
Rentrada [ $\Omega$ ]	4,3898
Requ [ $k\Omega$ ]	1,7474
Pdc [ $W$ ]	15

**Tabla 4.**

*Parámetros utilizados para el modelo de línea en Simulink*

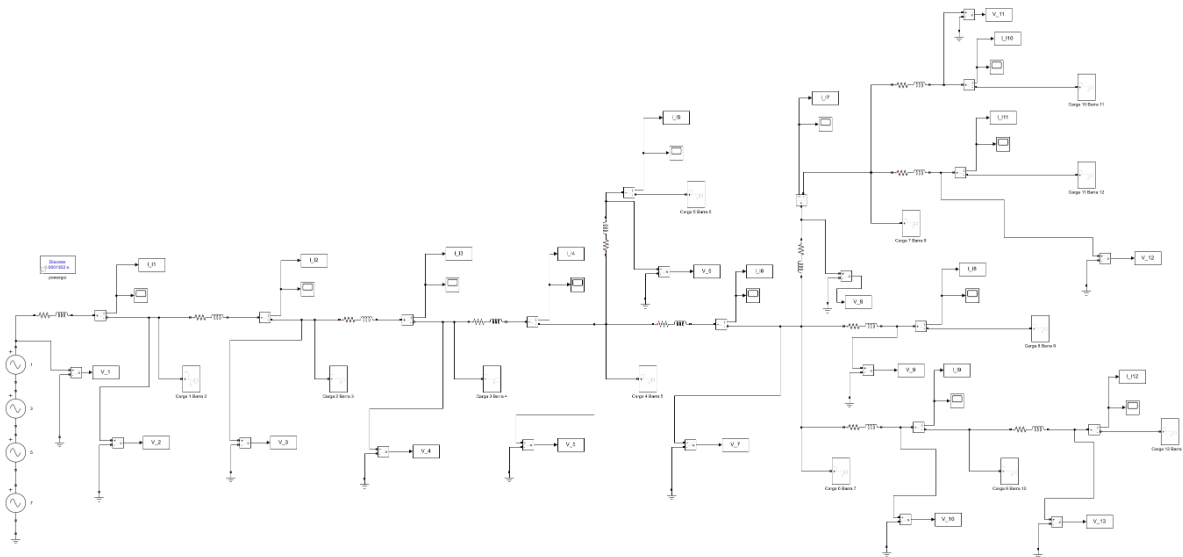
Parámetro	Valor
R [ $\Omega/km$ ]	8,9480
Xl [ $\Omega/km$ ]	0,0126

La Figura (16) muestra la representación del sistema radial monofásico de 13 barras. En esta figura, cada fuente conectada a la barra Slack representa la tensión de alimentación por orden armónico, en donde cada fuente es superpuesta con una frecuencia múltiplo entero de la frecuencia fundamental. Estos armónicos comienzan desde  $h = 1$  y avanzan en pasos de armónicos impares

hasta  $h = 7$ , correspondientes a las señales de alimentación definidas en los escenarios planteados en la Sección [4.4](#).

### Figura 16.

*Simulación del sistema de 13 barras monofásico*



### 5.3 Implementación del montaje experimental

La Figura [\(17\)](#) muestra el sistema el sistema radial de 13 barras monofásico en baja tensión el cual es una representación del modelo en el dominio del tiempo de MATLAB (Simulink).

**Figura 17.**

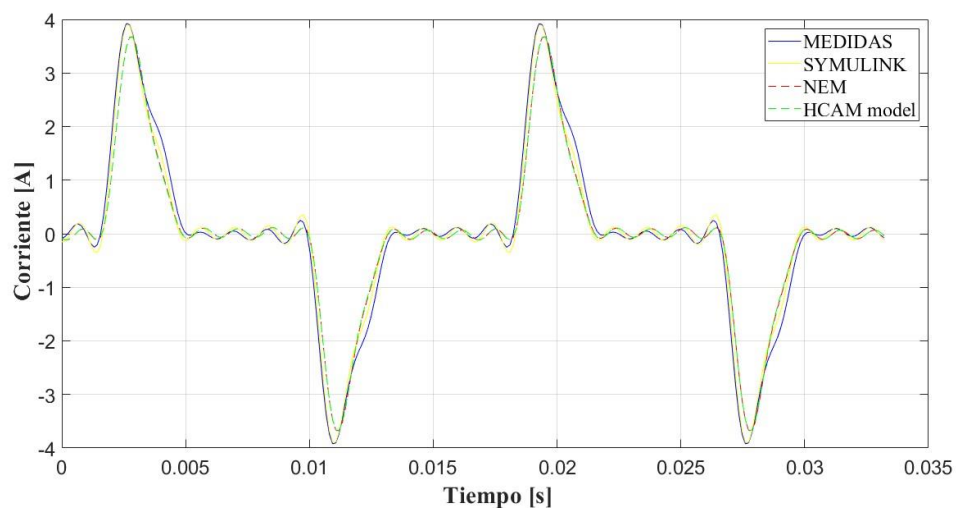
*Montaje experimental del sistema de 13 barras monofásico*



A continuación, en la Figura [\(18\)](#), se presenta la reconstrucción de la señal de corriente a la salida de la barra Slack, tras implementar el flujo armónico para el sistema radial de 13 barras con señal de alimentación sinusoidal.

**Figura 18.**

*Señales de corriente reconstruidas para el sistema radial monofásico de 13 barras*



Las Tablas (5), (6) y (7) muestran los resultados del error porcentual de corrientes por las líneas para los 9 escenarios de carga planteados en la Sección 4.4. Por otro lado, las Tablas (8), (9) y (10) presentan los mismos errores, pero de tensión en barras.

En MATLAB (Simulink) y en el montaje del circuito experimental en el laboratorio, el CT1 representa la línea 6, el CT2 la línea 7, el CT3 la línea 9, el CT4 la línea 4, el CT5 la línea 1, el CT6 la línea 11, el CT7 la línea 12, y el CT8 la línea 5. Además, V12 representa la barra 12.

**Tabla 5.**

*MSE de las líneas para escenarios con señal de alimentación Sinusoidal*

CT's	Escenarios Sinusoidal [%]								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	6,567	3,539	3,311	6,648	6,597	1,904	1,778	6,449	6,650
2	6,407	3,688	2,441	6,652	6,504	1,790	2,532	6,448	6,489
3	6,682	4,201	6,125	6,563	6,612	3,318	2,079	4,514	6,763
4	6,578	3,454	3,622	6,622	6,603	1,884	1,452	6,516	6,651
5	6,544	3,311	3,933	6,562	6,592	5,900	4,577	6,023	6,226
6	6,630	4,208	6,015	6,447	6,657	1,951	3,824	6,553	6,560
7	6,694	4,502	6,561	6,578	6,623	3,226	2,118	4,310	6,780
8	6,625	3,294	4,816	6,579	6,606	2,600	2,831	6,646	2,717

En la Tabla (5) se observa que el MSE más bajo es de 1,453% y lo registra el CT4 en el escenario 7, así mismo se aprecia que el escenario 7 presenta los mejores porcentajes de error más

bajos. En cuanto al MSE más alto es 6,694% y se registra en el CT7 en el primer escenario de carga.

**Tabla 6.**

*MSE de las líneas para escenarios con señal de alimentación Flat-Top*

CT's	Escenarios Flat-Top [%]								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
<b>1</b>	4,212	5,012	6,061	6,014	4,384	3,633	4,495	5,974	6,056
<b>2</b>	4,381	5,987	6,062	5,970	4,475	3,538	4,559	5,976	6,008
<b>3</b>	4,365	4,906	6,080	6,046	4,282	3,506	4,396	2,955	6,092
<b>4</b>	4,168	5,132	6,064	6,022	4,299	3,698	5,463	5,993	6,068
<b>5</b>	4,040	5,242	5,970	5,932	4,366	6,487	6,440	5,454	5,619
<b>6</b>	4,598	5,307	6,037	2,822	4,777	3,997	4,504	5,956	5,985
<b>7</b>	4,393	5,201	6,075	6,041	4,489	4,323	4,067	3,153	6,098
<b>8</b>	3,916	4,961	6,088	6,062	3,630	5,341	3,550	6,049	3,524

En la Tabla (6) se evidencia que el MSE registrado se encuentra entre el 3,506% y el 6,487% teniendo menor rango entre MSE que el registrado con la señal de alimentación sinusoidal.

**Tabla 7.***MSE en las líneas para escenarios con señal de alimentación Pointed-Top*

CT's	Escenarios Pointed-Top [%]								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
<b>1</b>	13,897	13,959	6,464	6,497	8,800	6,320	4,451	6,241	6,872
<b>2</b>	12,749	14,391	6,617	6,826	5,416	6,290	6,582	6,223	6,360
<b>3</b>	12,749	12,507	6,416	6,399	12,086	2,528	4,057	3,518	7,052
<b>4</b>	13,995	13,998	6,443	6,399	11,430	6,327	5,682	6,276	6,884
<b>5</b>	11,781	11,429	6,422	6,460	19,259	5,871	5,180	5,320	6,306
<b>6</b>	13,851	13,551	6,303	3,229	4,255	6,285	12,830	12,821	6,331
<b>7</b>	10,369	10,105	6,424	6,393	9,646	4,139	4,589	2,559	7,069
<b>8</b>	13,311	13,163	6,397	6,382	12,838	3,521	3,960	5,279	3,433

Los escenarios realizados con señal de alimentación Pointed-Top registra los peores MSE en comparación a los realizados con señal de alimentación Sinusoidal y Flat-Top. La Tabla (7) muestra un error máximo registrado del 13.995% por el CT4 en el primer escenario de carga.

**Tabla 8.***MSE en las barras para escenarios con señal de alimentación Sinusoidal*

Barra	Escenarios Sinusoidal -MSE [%]								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
<b>12</b>	1,216	0,839	0,886	1,214	1,215	0,583	0,674	1,213	1,216

En la Tabla (8) se evidencia que el MSE más bajo es de 0,583%

**Tabla 9.**

*MSE en las barras para escenarios con señal de alimentación Flat-Top*

Barra	Escenarios Flat-Top -MSE [%]								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
<b>12</b>	1,140	1,049	1,236	1,235	0,927	1,235	0,928	0,913	1,238

En la Tabla (9) que el menor MSE se mantiene cercano al 1 % lo cual indica un buen comportamiento del sistema medido en comparación al simulado.

**Tabla 10.**

*MSE en las barras para escenarios con señal de alimentación Pointed-Top*

Barra	Escenarios Pointed-Top [%]								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
<b>12</b>	1,463	1,302	1,490	1,489	1,143	0,949	1,003	1,488	1,490

Para en MSE% en la estimación de corrientes por las líneas los mayores porcentajes de error se encuentran en el escenario en donde se alimenta con una señal de tipo Pointed-Top, sin superar el 14%. En contraste para las señales Flat-Top y Sinusoidal no superan el 7%, indicando un mejor comportamiento esto debido a la distorsión presente en las señales de alimentación como se muestra en la Tabla (2). Se observa una mayor discrepancia en la línea más cercana a la barra

Slack, en las bifurcaciones del circuito y en los escenarios con mayor cantidad de cargas conectadas. Esto se debe a las condiciones físicas del circuito, como empalmes, y a las propias condiciones de operación en el laboratorio.

De manera similar, para el MSE % en la estimación de la tensión para la barra 12 presenta un menor error, ya que en ninguno de los escenarios ni señales de alimentación supera el 1.5.

## 6. Conclusiones

En este trabajo de grado, se implementa un sistema radial monofásico en baja tensión de 13 barras que es implementado en el laboratorio y se compara en primer lugar con un modelo simulado en el dominio del tiempo mediante MATLAB (Simulink), y en segundo lugar con una estrategia backward-forward en el dominio de la frecuencia, ambas para la estimación del flujo armónico.

A continuación, se presentan las conclusiones obtenidas a partir de la comparación entre los datos experimentales y los resultados de las simulaciones, destacando los principales hallazgos y las implicaciones para el modelado y análisis del flujo armónico en sistemas de potencia.

Los modelos de matriz de admitancias armónicamente acopladas (HCAM) y Modelo equivalente de Norton (NEM) han demostrado ser efectivos para modelar la carga LED de 15 W, como se muestra en la Figura [\(15\)](#). Ambos modelos presentan un error en el tercer percentil que no supera el 0.5.

Al evaluar la estrategia de barrido backward-forward, se observa errores porcentuales de MSE no mayores al 14% en corriente en líneas y situaciones específicas del experimento, y al 1.5 en tensión, como se muestra en las Tablas [\(5\)](#), [\(6\)](#), [\(7\)](#), [\(8\)](#), [\(9\)](#) y [\(10\)](#). Esto valida el buen comportamiento del modelado en el dominio del tiempo, y el uso del modelo circuital equivalente para modelar las luminarias, así como el uso de los parámetros circuitales presentados en la tabla [\(3\)](#), estimados a partir de las medidas del experimento de un armónico a la vez y optimizados mediante el método Optimal Parameter Estimation (OPE) propuesto por (Malagón-Carvajal & Otros, 2021).

Este trabajo de grado ha permitido analizar lo que ocurre en una red de operación de un sistema de potencia, y como la distorsión armónica producida por las cargas impacta sobre toda la red de suministro, así que es importante seguir trabajando en herramientas de simulación y modelado que permitan estimar de una mejor manera el flujo armónico en los sistemas de potencia.

### Referencias Bibliográficas

- Biblioteca Virtual de la Universidad Industrial de Santander . (11 de Junio de 2014). *ieeexplore*.  
Obtenido de ieeexplore: <https://ieeexplore-ieee-org.bibliotecavirtual.uis.edu.co/document/6826459>
- Blanco, A. M., Stiegler, R., & Meyer, J. (4 de Noviembre de 2013). *Power quality disturbances caused by modern lighting equipment (CFL and LED)*. Obtenido de ieeexplore: <https://ieeexplore-ieee-org.bibliotecavirtual.uis.edu.co/document/6652431>
- Capacho, R., Miguel, J., & León Carvajal, J. A. (2023). *Flujo Armónico Radial Utilizando Modelos en el Dominio de la Frecuencia*. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander.
- Duarte, C., Ordóñez-Plata, G., & Malagón-Carvajal, G. (3 de Mayo de 2023). *A Method to Compute Frequency Domain Models*. Obtenido de ieeexplore: <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/10115053/metrics#metrics>
- Estupiñan Lugo , T. C., & Uyabán Bonilla , A. L. (2024). *ESTIMACIÓN Y AJUSTE DE LOS PARÁMETROS DE UN MODELO CIRCUITAL EQUIVALENTE PARA UNA LUMINARIA LED FRENTE A VARIACIONES DE LA TENSIÓN DE ALIMENTACIÓN*. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander.
- Krejčí, P., & Čumpelík, R. (20 de Julio de 2015). *Undefined parameters and two-limit parameters in standard EN 50160 ED. 3*. Obtenido de ieeexplore: <https://ieeexplore.ieee.org/document/7161205/authors#authors>
- Malagón-Carvajal, G., & Otros, y. (15 de Diciembre de 2021). *sciencedirect*. Obtenido de sciencedirect: [https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0378778821007726?fr=RR-2&ref=pdf\\_download&rr=922fe269586ac0a7](https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0378778821007726?fr=RR-2&ref=pdf_download&rr=922fe269586ac0a7)
- Malagon-Carvajal, G., Ordonez-Plata, G., & Duarte, C. (2024). A Method to Compute Frequency Domain Models Based on Direction-Dependent Derivative of the Variation of Voltage and Current Phasors. *IEEE TRANSACTIONS ON POWER DELIVERY*, 39(1).
- Nassif , A. B., Yong , J., & Xu , W. (8 de agosto de 2010). Measurement-based approach for constructing harmonic models of electronic home appliances. *Published in IET Generation, Transmission & Distribution*.
- NEMA: Asociación Nacional de Fabricantes Eléctricos [nema]. (6 de Diciembre de 2006). *ANSI C84.1-2011*. Obtenido de ansi webstore: [https://webstore.ansi.org/standards/nema/ansic842011?srsltid=AfmBOorTjoTRgCIoeHcczDduY8F-IqAZaFr6s5Rztxd0nslyzU\\_RDdFA](https://webstore.ansi.org/standards/nema/ansic842011?srsltid=AfmBOorTjoTRgCIoeHcczDduY8F-IqAZaFr6s5Rztxd0nslyzU_RDdFA)
- Roa Capacho, J. M., & León Carvajal, J. A. (2023). *Flujo Armónico Radial Utilizando Modelos en el Dominio de la Frecuencia*. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander.