



Universidad Autónoma de Querétaro

Campus San Juan del Río

Facultad de Ingeniería

Ingeniería Electromecánica



Efectos de *flicker* en lámparas incandescentes

Tesis

Como parte de los requisitos para obtener el título de
Ingeniero Electromecánico Línea Terminal en Mecatrónica

Presenta:

José Manuel Muñoz Ugalde

Dirigido por:

Dr. René de Jesús Romero Troncoso

Codirigido por:

Dr. David Alejandro Elvira Ortiz

San Juan del Río, Querétaro, 2021



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE QUERÉTARO
FACULTAD DE INGENIERÍA
CAMPUS SAN JUAN DEL RÍO



EFFECTOS DE *FLICKER* EN LÁMPARAS INCANDESCENTES

TESIS

Como parte de los requisitos para obtener el título de

INGENIERO ELECTROMECAÁNICO

Línea Terminal

MECATRÓNICA

Presenta

JOSÉ MANUEL MUÑOZ UGALDE

Dirigido por:

DR. RENÉ DE JESÚS ROMERO TRONCOSO

SINODALES:

DR. RENÉ DE JESÚS ROMERO TRONCOSO (5119)
Presidente

DR. DAVID ALEJANDRO ELVIRA ORTÍZ (16323)
Secretario

DR. JUAN JOSÉ SAUCEDO DORANTES (15647)
Vocal

DR. ROQUE ALFREDO OSORNIO RÍOS (5620)
Suplente

San Juan del Río, Qro., Septiembre 27, 2021.

RESUMEN

En los últimos años, los disturbios en la calidad de la energía han ido en aumento. Pero uno de ellos, el *flicker*, se ha convertido en un problema de gran importancia debido a los efectos indeseables que puede ocasionar. El análisis de la intensidad de *flicker* que se ha realizado en diversas investigaciones, sin embargo, está basado en el comportamiento de señales eléctricas simuladas con el que obtienen un efecto lumínico sobre las lámparas y utilizan el modelo simulado que otorga la norma para su análisis. Por lo tanto, una metodología que brinde mediciones más confiables y que permita realizar la detección del *flicker* con señales reales y a un menor costo es necesaria.

Este trabajo de investigación se enfoca en el monitoreo y análisis de señales de alimentación de lámparas incandescentes, así como la señal de iluminación de las mismas, para encontrar cómo la calidad de la energía puede afectar en la aparición de *flicker*. Para realizar esto, se presenta una metodología basada en la transformada de Fourier que considera que el *flicker* no es estacionario a través del tiempo, complementando el modelo otorgado por la norma. Además, presenta un prototipo funcional para la medición de las señales de iluminación basado en un sensor fotorresistivo que permite realizar la detección del *flicker*. Los resultados demuestran que las componentes de *flicker* cambian a través del tiempo y la comparativa demuestra que existe un comportamiento que es opuesto entre la envolvente de la señal del sensor y la envolvente de la señal de voltaje.

(**Palabras clave:** *flicker*, calidad de la energía, lámpara incandescente)

SUMMARY

In recent years, the existence of power quality disturbances have increased. Among them, the *flicker*, has become a major problem due to the undesirable effects it can cause. The analysis of *flicker* intensity that is carried out in diverse investigations, however, is based on the behavior of simulated electrical signals to generate a response on a simulated lamp that is described by a model provided in the international standards for their analysis. Therefore, a methodology that provides more reliable measurements and that allows *flicker* detection with real signals and at a lower cost is necessary.

This research focuses on the monitoring and analysis of incandescent lamp power signals, as well as the lighting signal of the same, to find how the power quality can affect the *flicker* production. To do this, it is developed a methodology based on the Fourier Transform that considers that the *flicker* is not stationary over time, complementing the model provided by the international standards. In addition, a functional prototype for the measurement of lighting signals based on a photoresistive sensor that allows the *flicker* detection, is presented. The results show that the *flicker* components change over the time and the comparison show that there is a behavior that is opposite between the voltage signal envelope and the sensor signal envelope.

(**Key words:** *flicker*, power quality, incandescent lamp)

DEDICATORIA

Dedico este trabajo de investigación con mucho cariño a una gran persona, amigo y abuelo, el señor Jorge Ugalde Zárraga (Q.E.P.D.).

También dedico este trabajo con mucho cariño a otra gran persona, el Ingeniero Jonathan Martín Pérez Valdivia (Q.E.P.D.), un abrazo hasta el cielo amigo.

Dirección General de Bibliotecas UAQ

AGRADECIMIENTOS

A mis padres, el Sr. José Manuel Muñoz Nuevo y la Sra. Gloria Ugalde Hernández, por brindarme el apoyo, la motivación y la confianza para salir adelante durante la carrera.

A todos mis compañeros, porque juntos logramos formar un gran equipo y gracias a eso, logramos salir adelante en la carrera.

A todos mis profesores, por haber compartido conmigo sus conocimientos a lo largo de toda la carrera.

A mis asesores, el Dr. René de Jesús Romero Troncoso y el Dr. David Alejandro Elvira Ortiz, por todos sus consejos y por haber depositado su confianza en mí para el desarrollo de este trabajo de investigación.

ÍNDICE GENERAL

| | |
|--|-----|
| RESUMEN | III |
| SUMMARY | IV |
| DEDICATORIA..... | V |
| AGRADECIMIENTOS | VI |
| ÍNDICE GENERAL | VII |
| ÍNDICE DE TABLAS | IX |
| ÍNDICE DE FIGURAS | X |
| CAPÍTULO 1 INTRODUCCIÓN | 1 |
| 1.1 Introducción..... | 1 |
| 1.2 Antecedentes | 2 |
| 1.3 Descripción del problema..... | 5 |
| 1.4 Justificación..... | 6 |
| 1.5 Objetivos | 7 |
| 1.5.1 Objetivo general:..... | 7 |
| 1.5.2 Objetivos particulares:..... | 7 |
| 1.6 Planteamiento General..... | 8 |
| CAPÍTULO 2 FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA..... | 10 |
| 2.1 Calidad de la energía | 10 |
| 2.1.1 Norma IEEE Std 1159-2009 “ <i>IEEE Recommended Practice for Monitoring Electric Power Quality</i> ” | 10 |
| 2.1.2 Fenómenos electromagnéticos:..... | 11 |
| 2.2 Norma IEC Std 61000-4-15:2010 “ <i>Electromagnetic compatibility (EMC) - Testing and measurement techniques—Flickermeter— Functional and design specifications</i> ” | 15 |
| 2.3 Tarjeta de adquisición de datos PQ-UAQ | 16 |
| 2.4 Fotorresistencia (LDR) | 17 |
| 2.5 Transformada de Fourier..... | 17 |
| 2.6 Sistema fotovoltaico | 18 |
| 2.6.1 Tipos de sistemas fotovoltaicos | 19 |

| | | |
|----------------------------------|--|----|
| 2.6.2 | Elementos de un sistema fotovoltaico | 20 |
| 2.7 | Correlación..... | 21 |
| CAPÍTULO 3 METODOLOGÍA..... | | 23 |
| 3.1 | Descripción general de la metodología | 23 |
| 3.1.1 | Bloque 1: Red eléctrica..... | 24 |
| 3.1.2 | Bloque 2: Sistema de pruebas..... | 24 |
| 3.1.3 | Bloque 3: Adquisición de datos | 33 |
| 3.1.4 | Bloque 4: Análisis y procesamiento de señales..... | 33 |
| 3.2 | Casos de estudio | 34 |
| 3.2.1 | Espacio de maquinado | 34 |
| 3.2.2 | Casa-habitación..... | 35 |
| 3.2.3 | Panel fotovoltaico y un inversor..... | 36 |
| CAPÍTULO 4 RESULTADOS | | 38 |
| 4.1 | Sistema de acondicionamiento | 38 |
| 4.2 | Mediciones | 39 |
| 4.2.1 | Caso 1: Espacio de maquinado..... | 39 |
| 4.2.2 | Caso 2: Casa-habitación | 50 |
| 4.2.3 | Caso 3: Panel Fotovoltaico y un inversor | 62 |
| 4.3 | Correlación..... | 73 |
| CAPÍTULO 5 CONCLUSIONES..... | | 74 |
| REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS | | 75 |

ÍNDICE DE TABLAS

| | |
|--|----|
| Tabla 1. Características de la tarjeta PQ-UAQ..... | 16 |
| Tabla 2. Características del sistema de pruebas..... | 24 |
| Tabla 3. Características del dispositivo. | 39 |

Dirección General de Bibliotecas UAQ

ÍNDICE DE FIGURAS

| | |
|---|----|
| Figura 1.1 Diagrama a bloques de la metodología seleccionada..... | 8 |
| Figura 2.1 Fluctuaciones de voltaje..... | 14 |
| Figura 2.2 Diagrama funcional del medidor de flicker IEC. | 15 |
| Figura 2.3 Sistema aislado..... | 19 |
| Figura 2.4 Sistema conectado a la red eléctrica..... | 20 |
| Figura 2.5 Coeficiente de correlación. a) Cercano a +1, b) cercano a -1, c) cercano a 0. | 22 |
| Figura 3.1 Esquema general de la metodología..... | 23 |
| Figura 3.2 Vista general del sistema de pruebas. | 25 |
| Figura 3.3 Vista interna del sistema de pruebas. | 26 |
| Figura 3.4 Lámparas seleccionadas. a) 72 Watts, b) 43 Watts, c) 25 Watts. | 26 |
| Figura 3.5 Estructura del bloque del sensor..... | 27 |
| Figura 3.6 Circuito regulador de voltaje..... | 27 |
| Figura 3.7 Puente de Wheatstone implementado. | 28 |
| Figura 3.8 Amplificador de instrumentación implementado..... | 29 |
| Figura 3.9 Amplificador derivativo implementado..... | 30 |
| Figura 3.10 Base..... | 31 |
| Figura 3.11 Tapa..... | 31 |
| Figura 3.12 Tarjeta de acondicionamiento. | 32 |
| Figura 3.13 Tarjeta de la fuente de alimentación. | 32 |
| Figura 3.14 Sistema de acondicionamiento..... | 33 |
| Figura 3.15 Sistema conectado con la tarjeta PQ-UAQ. | 35 |
| Figura 3.16 Sistema conectado en casa-habitación..... | 36 |
| Figura 3.17 Sistema conectado con el panel fotovoltaico y el inversor. | 37 |
| Figura 4.1 Vista frontal. | 38 |
| Figura 4.2 Vista posterior. | 39 |
| Figura 4.3 Señal del sensor normalizada de la lámpara de 25W en el caso 1..... | 40 |
| Figura 4.4 Señal del sensor normalizada de la lámpara de 43W en el caso 1..... | 40 |
| Figura 4.5 Señal del sensor normalizada de la lámpara de 72W en el caso 1..... | 41 |
| Figura 4.6 Señal de voltaje normalizada de la lámpara de 25W en el caso 1. | 41 |

| | |
|---|----|
| Figura 4.7 Señal de voltaje normalizada de la lámpara de 43W en el caso 1. | 42 |
| Figura 4.8 Señal de voltaje normalizada de la lámpara de 72W en el caso 1. | 42 |
| Figura 4.9 Señal del sensor con su envoltente calculada de la lámpara de 25W en el caso 1..... | 43 |
| Figura 4.10 Señal del sensor con su envoltente calculada de la lámpara de 43W en el caso 1..... | 44 |
| Figura 4.11 Señal del sensor con su envoltente calculada de la lámpara de 72W en el caso 1..... | 44 |
| Figura 4.12 Señal de voltaje con su envoltente calculada de la lámpara de 25W en el caso 1..... | 45 |
| Figura 4.13 Señal de voltaje con su envoltente calculada de la lámpara de 43W en el caso 1..... | 45 |
| Figura 4.14 Señal de voltaje con su envoltente calculada de la lámpara de 72W en el caso 1..... | 46 |
| Figura 4.15 Envoltentes de las señales de la lámpara de 25W en el caso 1..... | 47 |
| Figura 4.16 Envoltentes de las señales de la lámpara de 43W en el caso 1..... | 47 |
| Figura 4.17 Envoltentes de las señales de la lámpara de 72W en el caso 1..... | 48 |
| Figura 4.18 Espectro en frecuencia de las envoltentes de la lámpara de 25W en el caso 1..... | 49 |
| Figura 4.19 Espectro en frecuencia de las envoltentes de la lámpara de 43W en el caso 1..... | 49 |
| Figura 4.20 Espectro en frecuencia de las envoltentes de la lámpara de 72W en el caso 1..... | 50 |
| Figura 4.21 Señal del sensor normalizada de la lámpara de 25W en el caso 2. | 51 |
| Figura 4.22 Señal del sensor normalizada de la lámpara de 43W en el caso 2. | 51 |
| Figura 4.23 Señal del sensor normalizada de la lámpara de 72W en el caso 2. | 52 |
| Figura 4.24 Señal de voltaje normalizada de la lámpara de 25W en el caso 2. | 52 |
| Figura 4.25 Señal de voltaje normalizada de la lámpara de 43W en el caso 2. | 53 |
| Figura 4.26 Señal de voltaje normalizada de la lámpara de 72W en el caso 2. | 53 |
| Figura 4.27 Señal del sensor con su envoltente calculada de la lámpara de 25W en el caso 2..... | 55 |

| | |
|--|----|
| Figura 4.28 Señal del sensor con su envolvente calculada de la lámpara de 43W en el caso 2. | 55 |
| Figura 4.29 Señal del sensor con su envolvente calculada de la lámpara de 72W en el caso 2. | 56 |
| Figura 4.30 Señal de voltaje con su envolvente calculada de la lámpara de 25W en el caso 2. | 56 |
| Figura 4.31 Señal de voltaje con su envolvente calculada de la lámpara de 43W en el caso 2. | 57 |
| Figura 4.32 Señal de voltaje con su envolvente calculada de la lámpara de 72W en el caso 2. | 57 |
| Figura 4.33 Envoltentes de las señales de la lámpara de 25W en el caso 2. | 58 |
| Figura 4.34 Envoltentes de las señales de la lámpara de 43W en el caso 2. | 59 |
| Figura 4.35 Envoltentes de las señales de la lámpara de 72W en el caso 2. | 59 |
| Figura 4.36 Espectro en frecuencia de las envoltentes de la lámpara de 25W en el caso 2. | 60 |
| Figura 4.37 Espectro en frecuencia de las envoltentes de la lámpara de 43W en el caso 2. | 61 |
| Figura 4.38 Espectro en frecuencia de las envoltentes de la lámpara de 72W en el caso 2. | 61 |
| Figura 4.39 Señal del sensor normalizada de la lámpara de 25W en el caso 3. ... | 62 |
| Figura 4.40 Señal del sensor normalizada de la lámpara de 43W en el caso 3. ... | 63 |
| Figura 4.41 Señal del sensor normalizada de la lámpara de 72W en el caso 3. ... | 63 |
| Figura 4.42 Señal de voltaje normalizada de la lámpara de 25W en el caso 3. | 64 |
| Figura 4.43 Señal de voltaje normalizada de la lámpara de 43W en el caso 3. | 64 |
| Figura 4.44 Señal de voltaje normalizada de la lámpara de 72W en el caso 3. | 65 |
| Figura 4.45 Señal del sensor con su envolvente calculada de la lámpara de 25W en el caso 3. | 66 |
| Figura 4.46 Señal del sensor con su envolvente calculada de la lámpara de 43W en el caso 3. | 66 |
| Figura 4.47 Señal del sensor con su envolvente calculada de la lámpara de 72W en el caso 3. | 67 |

| | |
|---|----|
| Figura 4.48 Señal de voltaje con su envolvente calculada de la lámpara de 25W en el caso 3..... | 67 |
| Figura 4.49 Señal de voltaje con su envolvente calculada de la lámpara de 43W en el caso 3..... | 68 |
| Figura 4.50 Señal de voltaje con su envolvente calculada de la lámpara de 72W en el caso 3..... | 68 |
| Figura 4.51 Envolventes de las señales de la lámpara de 25W en el caso 3..... | 69 |
| Figura 4.52 Envolventes de las señales de la lámpara de 43W en el caso 3..... | 70 |
| Figura 4.53 Envolventes de las señales de la lámpara de 72W en el caso 3..... | 70 |
| Figura 4.54 Espectro en frecuencia de las envolventes de la lámpara de 25W en el caso 3..... | 71 |
| Figura 4.55 Espectro en frecuencia de las envolventes de la lámpara de 43W en el caso 3..... | 72 |
| Figura 4.56 Espectro en frecuencia de las envolventes de la lámpara de 72W en el caso 3..... | 72 |

CAPÍTULO 1

INTRODUCCIÓN

1.1 Introducción

La energía eléctrica, en su forma convencional, es generada mediante grandes centrales para, posteriormente, ser transmitida por medio de las redes de distribución a los consumidores o cargas, a un nivel aceptable de voltaje. Así es como se consideraba la estructura general del sistema eléctrico. Sin embargo, existen varios factores que han modificado la forma de ver al sistema eléctrico, tales como: las demandas de los clientes que requieren una mayor confiabilidad y calidad de la energía a un menor costo, la desregulación de la industria eléctrica y la introducción de las fuentes renovables de energía (Bollen, 2003). Ahora, la generación de electricidad se está alejando de las grandes centrales eléctricas conectadas al sistema de transmisión, dirigiéndose hacia unidades más pequeñas conectadas en niveles más bajos de voltaje (Bollen, 2003). De este modo, surgió una forma más moderna de ver el sistema eléctrico resultante considerando los puntos anteriores, que han permitido el intercambio de energía entre los clientes o usuarios finales, y tienen como objetivo el de permitir la transmisión de energía eléctrica entre los usuarios garantizando un valor aceptable de voltaje y, permitiendo a los clientes tomar la energía del sistema eléctrico (Bollen, 2003).

Por otro lado, los problemas de calidad de la energía han aumentado considerablemente durante los últimos años debido a varios factores, tales como el que los equipos eléctricos se han vuelto menos tolerables a las perturbaciones de la calidad del voltaje, los equipos producen más perturbaciones de la calidad de la corriente de las que suelen tener, y con la inclusión de las fuentes de energías renovables, han aparecido nuevos problemas de la calidad de la energía tales como distorsión de la forma de onda, variaciones de voltaje y *flicker* (Bollen y Gu, 2006).

El monitoreo de calidad de la energía se ha convertido en un punto importante, por las consecuencias que puedan surgir por una mala calidad de la energía, provocando funcionamientos irregulares o malos de los equipos y las protecciones, afectando el confort de los usuarios domésticos e incluso, deteniendo la producción en el sector industrial.

Si bien existen diferentes disturbios de calidad de la energía, uno de los que más importancia ha tomado recientemente debido a los problemas que puede causar en diferentes niveles es el *flicker*. El *flicker* es un fenómeno mejor conocido por inducir malestar visual o estrés y puede causar problemas a la salud en personas que padecen epilepsia (Yoshimoto et al., 2017). Algunos efectos fisiológicos en personas pueden ser distracción, fatiga visual, molestia, migraña o dolor de cabeza. Incluso puede poner en peligro a trabajadores de la industria debido a su constante interacción con la maquinaria. Por lo tanto, el presente trabajo de tesis presenta una metodología enfocada a estudiar cómo la calidad de la energía afecta la existencia del *flicker* en algunas lámparas incandescentes de diferentes potencias. Con esta metodología, se obtiene una herramienta que brinda una detección y medición de *flicker* más confiable y a un menor costo.

1.2 Antecedentes

El monitoreo del *flicker* se ha llevado a cabo de distintas maneras, algunos trabajos utilizan la norma IEC 61000-4-15 la cual da una metodología para obtener un medidor de *flicker* (Drápela et al., 2018; Gutiérrez et al., 2017). Otros trabajos utilizan algunas metodologías como la transformada Hilbert para obtener la envolvente de la señal de voltaje (Elvira et al. (2018)), combinado con la transformada rápida de Fourier (FFT por sus siglas en inglés, Fast Fourier Transform), para encontrar la frecuencia y la amplitud de las componentes del *flicker* (Gil-de-Castro et al., 2017; Azcarate et al., 2014; Chang et al., 1997). Sin embargo, la FFT se utiliza para monitoreo en estado estacionario, para perturbaciones no estacionarias la FFT da errores por lo que surge la necesidad de utilizar otras técnicas. Otros trabajos utilizan la transformada Wavelet discreta (DWT por sus siglas en inglés, Discrete Wavelet Transform) o el algoritmo de clasificación de

señales múltiples (MUSIC por sus siglas en inglés, Multiple Signal Classification), con las que obtienen los componentes de la señal de *flicker* con una mejor estimación (Elvira et al. (2018)).

Puesto que las variaciones de voltaje han resultado ser principalmente dañinas para las cargas luminosas, diversos trabajos se han enfocado en analizar cómo dichas variaciones afectan a diversos tipos de lámparas. Por ejemplo, Gil-de-Castro et al. (2017) desarrollaron un estudio de las variaciones de la intensidad luminosa de 24 diferentes lámparas LED (Light Emitting Diode, por sus siglas en inglés), de uso doméstico debido a las variaciones de la magnitud del voltaje. Además, se estudia la contribución de estas lámparas en el contenido armónicos de las señales de corriente, y se compara el comportamiento de las 24 diferentes lámparas cuando eran expuestas a las mismas variaciones de voltaje. Para comparar los resultados, se calcula un factor de ganancia que indica la sensibilidad de las lámparas a las variaciones de voltaje. Azcarate et al. (2014) seleccionaron las lámparas comerciales más comunes y eficientes, para analizar las características espectrales de la iluminación de estas lámparas. Se concluyó que la respuesta a la frecuencia de estas lámparas no es la mejor herramienta para realizar un análisis sensitivo, y para validar el estudio se utilizó un medidor de *flicker*. También, se desarrolló una configuración experimental para adquirir y almacenar los datos de las pruebas y realizar el cálculo del factor de ganancia para analizar la sensibilidad de las lámparas. Drápela et al. (2018) presentaron un nuevo diseño capaz de simular el flujo luminoso de una lámpara en el dominio del tiempo con un diseño de gama baja que es más sensible a las variaciones del voltaje de la red. Este trabajo realizó un análisis del circuito que forman las lámparas y, utilizando sus resultados modelaron una nueva lámpara con base en una resistencia. Gutiérrez et al. (2017) analizaron la linealidad de la respuesta de un conjunto de lámparas con señales de voltaje reales y simuladas. Para esto, se implementó un sistema que genera las variaciones de voltaje simuladas o señales de voltaje reales y se registran los resultados de iluminancia de las lámparas. Chang et al. (1997) investigaron la influencia del *flicker* en la variación del nivel de iluminación de los distintos tipos de lámparas residenciales generales. Para esto, se desarrolló un

sistema que genera las variaciones de voltaje y se utiliza un medidor de lux que determina la intensidad de las lámparas, y se utiliza la transformada de Fourier para calcular el espectro de las señales adquiridas. Estos trabajos revisados tienen la desventaja de que se llevaron a cabo en condiciones controladas, y sus sistemas de pruebas se desarrollaron e implementaron con equipos que se encuentran en el mercado y que tienen un costo elevado.

Por otro lado, se encontraron trabajos publicados de profesores de la Universidad Autónoma de Querétaro en revistas internacionales con respecto a la calidad de la energía, sin embargo, no todos los trabajos se centran en el estudio del *flicker*, aunque algunos lo presentan solo como un caso de estudio. Por ejemplo, Valtierra et al. (2016) publicaron un artículo donde se presenta una metodología basada en operaciones de morfología matemática para la detección y la clasificación de las variaciones de voltaje de acuerdo a la norma IEEE 1159-2009. Valtierra et al. (2014) publicaron otro artículo donde se presenta una nueva metodología basada en redes neuronales, que clasifica y detecta una gran cantidad de disturbios de calidad de la energía. Valtierra et al. (2016) presentaron una metodología para el seguimiento y la caracterización de las variaciones de voltaje basada en la transformada Hilbert. Romero et al. (2011) proponen un sistema reconfigurable para monitoreo de variables eléctricas basado en FPGA. Para esto, se implementaron diferentes algoritmos, donde dependiendo de la variable que se monitorea, se reconfigura el dispositivo. Con respecto al estudio del *flicker* se encontró un artículo: Elvira et al. (2018) desarrollaron una metodología que estima la existencia de *flicker* en la generación de energías renovables, por medio de celdas fotovoltaicas y el uso de inversores. Analizan las posibles causas, tanto electrónicas como ambientales, por las cuales la señal generada contiene estos problemas de *flicker*.

Dentro de la Universidad Autónoma de Querétaro se han llevado a cabo distintos trabajos acerca de la calidad de la energía, por ejemplo, Granados (2013), quien realizó un estudio de corriente y voltaje de alimentación para conocer las condiciones de la calidad de la energía de la red mientras una máquina de control

numérico computarizado (CNC) está trabajando. Así mismo, realizó el estudio de algoritmos para el cálculo de los parámetros de calidad de la energía. Utilizó técnicas como FFT, wavelets, métodos paramétricos y no paramétricos para mejorar su resolución e implementar el análisis de la calidad de la energía en estado estable y transitorio. Molano (2013) diseñó e implementó un dispositivo basado en FPGA (arreglo programable de compuertas en campo por sus siglas en inglés, Field Programmable Gate Arrays) para monitoreo de la calidad de la energía para motores trifásicos o cargas trifásicas, en el cual realizó el cálculo de los índices de calidad de la energía (Voltaje Pico y Corriente pico, Voltaje RMS y Corriente RMS, THD (por sus siglas en inglés, Total Harmonic Distortion), Potencia Activa (P), Potencia Aparente(S), Factor de Potencia(FP)) y comparó las mediciones con un dispositivo comercial. Mejía (2013) realizó una interfaz Ethernet basada en FPGA para realizar monitoreo remoto de la calidad de la energía en sistemas monofásicos de baja tensión o monitoreo de sistemas conectados a corriente continua.

Debido a la necesidad de contar con sistemas y equipos que permitan medir de manera viable las señales eléctricas y el *flicker*, que, además, sean más económicos que los equipos que existen en el mercado, la Universidad Autónoma de Querétaro desarrolló el dispositivo de monitoreo de calidad de la energía llamado PQ-UAQ, un dispositivo basado en FPGA que es capaz de monitorizar la calidad de diferentes señales eléctricas de manera simultánea. Respecto al uso de la tarjeta PQ-UAQ para monitoreo de la calidad de la energía se encontraron algunos trabajos, por ejemplo, Dzul (2016) realizó un programa que fuera capaz de analizar y visualizar las señales eléctricas trifásicas en tiempo real mediante el uso de la tarjeta de adquisición de datos PQ-UAQ. Fernández (2016) realizó la calibración del equipo enfocado al monitoreo de la calidad de la energía y realizó el cálculo de la confiabilidad de las lecturas antes y después de la calibración.

1.3 Descripción del problema

El *flicker* es un tema que se ha convertido en un problema muy importante, la principal razón es que los efectos de este fenómeno pueden causar malestar y/o problemas a la salud de las personas que se encuentran expuestas a él. Con el

incremento de los problemas de la calidad de la energía en la red eléctrica, el análisis y la medición del *flicker* se han convertido en dos problemas de gran importancia. Es necesario contar con herramientas que brinden mediciones más confiables del *flicker* y que tengan un costo menor.

El análisis de la respuesta al *flicker*, presentado en los trabajos de la literatura revisada, es realizado de una manera muy parecida. Algunos estudios son implementados con una PC (Personal Computer, por sus siglas en inglés), donde generan sus propias señales con variaciones de voltaje y las aplican mediante una tarjeta de adquisición de datos (DAS por sus siglas en inglés, Data Acquisition System) a las distintas lámparas que seleccionaron, analizando sus respuestas al *flicker*. Además, estos estudios utilizan dispositivos que se encuentran en el mercado, para la medición de la iluminación de las lámparas. En otros trabajos utilizan equipos generadores de señales con variaciones de voltaje, pero además de analizar las señales de iluminación de las lámparas, analizan también las señales generadas de voltaje y corriente de alimentación de las lámparas. Llevaron a cabo sus estudios dentro de una caja de color negro o blanco, bajo condiciones controladas y con equipos comerciales que tienen un costo elevado.

Sin embargo, en los trabajos revisados, solo se ha analizado el comportamiento de las lámparas ante el *flicker*, en algunos trabajos estudiaron la contribución de las lámparas en la generación de otros problemas de la calidad de la energía. Las metodologías implementadas utilizan la señal eléctrica para determinar un efecto lumínico.

Por otro lado, el modelo otorgado por la norma IEC Std 61000-4-15:2010 sólo puede ser utilizado para el análisis de intensidad de *flicker* en señales de iluminación de lámparas incandescentes, para lo cual, el modelo considera que las señales son simuladas y su análisis está basado en el comportamiento de estas señales.

1.4 Justificación

Esta investigación se enfoca al estudio y monitoreo de señales de iluminación en lámparas incandescentes, así como el monitoreo y estudio de las señales de

corriente y voltaje que alimentan a las lámparas, con la finalidad de estudiar como la calidad de la energía de la red eléctrica puede afectar la existencia del *flicker* en lámparas incandescentes. Esto permitirá realizar una comparativa entre las señales obtenidas para determinar la relación que hay entre ellas.

La mayoría de los equipos de medición del *flicker* y en las investigaciones relacionadas al *flicker*, realizan sus cálculos de acuerdo a como lo dicta la norma IEC Std 61000-4-15:2010, y utilizan el modelo simulado que la misma norma brinda, para su análisis. En esta investigación se desarrolla una metodología, como complemento al modelo otorgado por la norma, para medición de señales reales de iluminación de lámparas, que permita realizar la detección del *flicker*, previniendo sus efectos indeseables.

Además, al realizar la medición de la señal de iluminación mediante el sensor fotorresistivo, es más sencillo realizar la detección del *flicker* y de una manera más rápida. Esto permitirá que los efectos del *flicker* puedan desencadenar problemas a la salud de las personas. Además, permite obtener una alternativa que realice las mismas tareas que un sistema comercial, pero a un costo menor.

1.5 Objetivos

1.5.1 Objetivo general:

Medir el contenido de *flicker* en lámparas incandescentes mediante el uso de un sensor fotorresistivo y compararlas con la calidad de la energía que es proporcionada por la red.

1.5.2 Objetivos particulares:

- Acondicionar un sensor fotorresistivo para que pueda ser utilizado en conjunto con la tarjeta PQ-UAQ.
- Seleccionar 3 lámparas incandescentes de diferentes potencias para determinar su respuesta ante el *flicker*.
- Realizar pruebas funcionales al sistema de sensado para corroborar su óptimo funcionamiento.

- Realizar de manera simultánea medición de voltajes, corrientes y respuesta al *flicker* para las 3 lámparas seleccionadas.
- Llevar a cabo una comparativa entre la señal adquirida con la fotorresistencia y las señales eléctricas con la finalidad de determinar el grado de relación que existe entre ambas.

1.6 Planteamiento General

En primer lugar, se llevará a cabo la búsqueda y revisión de literatura sobre el tema, detectando algunos puntos de la investigación que se puedan mejorar.

La metodología propuesta, que se llevará a cabo en esta investigación, se muestra en la figura 1.1, donde se muestran los bloques por los cuales se realizará la adquisición y el procesamiento de las señales. Posteriormente, se describen cada uno de los bloques que se implementarán en la metodología propuesta.

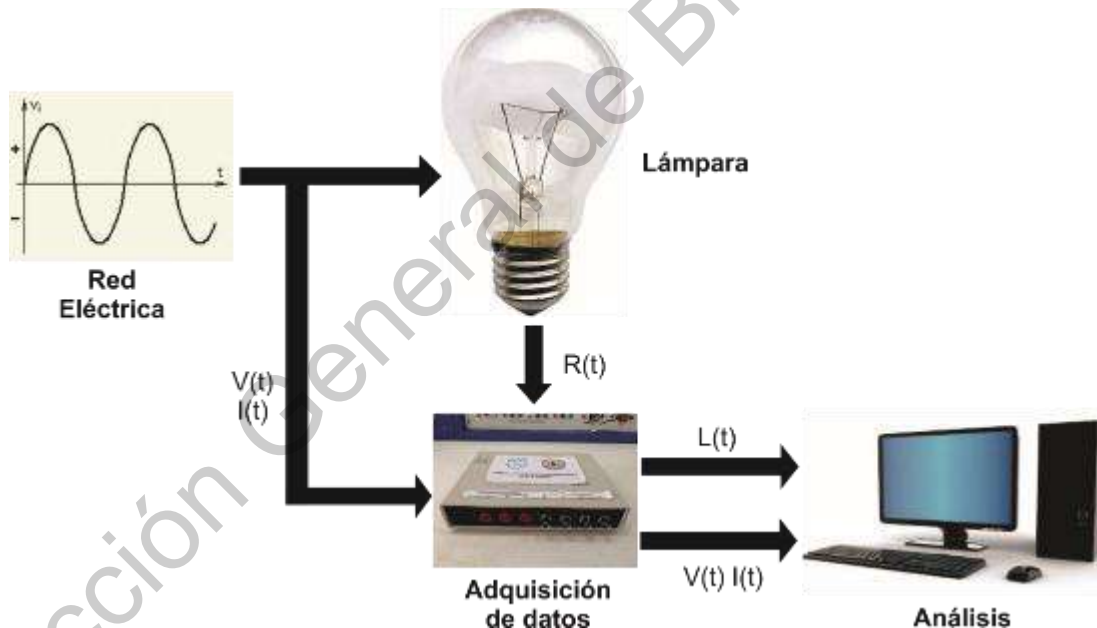


Figura 1.1 Diagrama a bloques de la metodología seleccionada.

En el bloque de adquisición de datos, se lleva a cabo la adquisición de la señal de iluminación de las lámparas mediante el uso del sensor fotorresistivo. Además, se lleva a cabo el acondicionamiento de la señal de iluminación adquirida, mediante el uso de un puente de Wheatstone y de amplificadores operacionales,

para que tenga un valor que este dentro del rango de medición de la tarjeta PQ-UAQ. Posteriormente, se encontrará la tarjeta PQ-UAQ, donde se realizará la adquisición de las señales, tanto la señal del sensor como las señales de voltaje y de corriente de alimentación de las lámparas, para guardar estos valores dentro de una tarjeta SD (Secure Digital, por sus siglas en inglés).

Finalmente, en el bloque de Análisis, se desarrolla el análisis de los valores obtenidos en las mediciones. Se utiliza la transformada de Fourier para encontrar la frecuencia de las señales adquiridas y se hace una correlación entre la señal del sensor y las señales de alimentación de las lámparas.

En total se realizan 3 pruebas, una por cada una de las distintas lámparas incandescentes seleccionadas y cada prueba por separado. Los lugares y condiciones donde se llevan a cabo las mediciones son: en una zona industrial, donde se encuentre grandes cargas trabajando; en una zona habitacional, donde se encuentren casas habitacionales; y con el uso de un panel fotovoltaico y de un inversor.

Para llevar a cabo las pruebas, se desarrolla un sistema que sea completamente oscuro donde no pueda afectar demasiada luz de otras fuentes luminosas, tratando de evitar que la luz del sol o de algunos otros equipos de iluminación interfieran en las mediciones, y tratando de que se mida solo el efecto de la lámpara.

CAPÍTULO 2

FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA

En este capítulo se presenta una breve descripción de las principales herramientas teóricas utilizadas en este trabajo de tesis.

2.1 Calidad de la energía

Calidad de la energía es una expresión que se define como una combinación de fenómenos electromagnéticos que determinan la calidad del voltaje y de la corriente, en cualquier instante y en cualquier punto de la red eléctrica (Bollen y Gu, 2006). Se refiere a los cambios que tiene la señal del voltaje y de corriente, medida con respecto a una señal ideal, la cual es considerada como una onda senoidal pura con amplitud y frecuencia constante. Con el uso más frecuente de los equipos electrónicos que pueden generar perturbaciones o que son sensibles a estos fenómenos, acompañado por el incremento de los problemas de operación de los equipos, el interés por la calidad de la energía ha aumentado en los últimos años.

Existen varios estándares para el monitoreo de la calidad de la energía. A continuación, se presenta un estándar oficial de la calidad de la energía, el cuál clasifica los distintos fenómenos electromagnéticos de la red eléctrica:

2.1.1 Norma IEEE Std 1159-2009 “*IEEE Recommended Practice for Monitoring Electric Power Quality*”

La norma IEEE Std 1159-2009 fue elaborada por el Instituto de Ingenieros Eléctricos y Electrónicos (IEEE por sus siglas en inglés, Institute of Electrical and Electronics Engineers), y los Comités Coordinadores de Estándares de la Junta de Estándares de la Asociación de Estándares IEEE (IEEE-SA). Esta norma es una práctica recomendada para el monitoreo de las características eléctricas. Define y clasifica los distintos fenómenos electromagnéticos de la red eléctrica y que son los

causantes de los distintos problemas de la calidad de la energía (variaciones de voltaje, distorsión de la forma de onda, Sag y Swell, variaciones de frecuencia, flicker, entre otros) (Granados, 2013).

2.1.2 Fenómenos electromagnéticos:

Los diferentes fenómenos que pueden suceder en un sistema eléctrico y que son considerados en el estudio de la calidad de la energía están basados en la norma IEEE Std 1159-2009. Esta norma clasifica los distintos fenómenos electromagnéticos en siete categorías, de acuerdo a las características de su espectro armónico, su duración y su amplitud (Granados, 2013). A continuación, se muestra la clasificación de acuerdo a esta norma:

2.1.2.1 Transitorios:

Son fenómenos indeseables, rápidos y de corta duración que producen distorsiones. Los fenómenos transitorios generalmente están divididos en dos tipos, impulsivos y oscilatorios:

- Un transitorio impulsivo se caracteriza por variaciones de la frecuencia del voltaje o la corriente nominal de estado estable, cuya polaridad es positiva o negativa. Típicamente es ocasionado por descargas atmosféricas.
- Un transitorio oscilatorio presenta variaciones de la frecuencia del voltaje o la corriente nominal en estado estable, que incluye valores de polaridad positiva y negativa. Son ocasionados por la energización de bancos de capacitores, transformadores o a ferorresonancia.

2.1.2.2 Variaciones de corta duración:

Son fenómenos con variaciones de voltaje que tienen duraciones que van desde medio ciclo hasta un minuto, y en donde la magnitud tiene un valor dentro del rango de 10% hasta 120% de su valor nominal.

De acuerdo a su duración se clasifican en:

- Instantánea (0.5 ciclos a 30 ciclos).
- Momentáneas (30 ciclos a 3 segundos).

- Temporal (3 segundos a 1 minuto).

De acuerdo al tipo de variación de la tensión se clasifican en:

- Interrupciones: se presentan cuando hay decrementos del voltaje a valores menores al 10% de su valor nominal que tiene duraciones de menos de un minuto. Pueden ser ocasionados por fallas en los equipos o en la red eléctrica.
- Dips, Sags o huecos de tensión: son decrementos del voltaje a valores de 90% a 10% de su valor nominal que tienen duraciones de menos de un minuto. Son generalmente ocasionados por algún cortocircuito, energización de grandes cargas o el arranque de motores.
- Swells: son incrementos en el voltaje o sobretensiones repentinas cuyos valores de voltaje están dentro de un rango de 110% y 180% de su valor nominal, y tienen una duración desde medio ciclo hasta 1 minuto. Son generalmente ocasionados por fallas en la red o accionamientos de grandes cargas.

2.1.2.3 Variaciones de larga duración:

Son variaciones del voltaje con respecto a un valor nominal por un periodo de tiempo de más de 1 minuto. Son generalmente ocasionados por variaciones de carga u operaciones de conmutación del sistema. Se clasifican en 3 tipos de fenómenos:

- Sobretensiones: son incrementos del voltaje a valores mayores al 110% de su valor nominal. Son generalmente ocasionados por desconexión de grandes cargas o fallas en la regulación de la tensión.
- Subtensiones: son decrementos del voltaje a valores menores al 90% de su valor nominal. Son generalmente provocados por la conexión de grandes cargas.
- Interrupciones: es cuando el valor del voltaje cae hasta cero y no vuelve automáticamente, su duración es de más de 1 minuto.

2.1.2.4 *Desbalance de tensión:*

Se presenta cuando los valores del voltaje de un sistema trifásico no son iguales en magnitud y/o las diferencias de fase no son 120 grados. Son generalmente ocasionados por cargas desbalanceadas en la red eléctrica.

2.1.2.5 *Distorsión de la forma de onda:*

Es una desviación de la forma de onda senoidal y se caracteriza por su contenido espectral. Se divide en cinco tipos de distorsión de la forma de onda:

- **Componente de DC:** es cuando hay presencia de una componente de corriente continua en un sistema de corriente alterna. Puede ser originada por perturbaciones magnéticas o al efecto de rectificación de media onda.
- **Armónicas:** son componentes senoidales del voltaje o de la corriente que tienen una frecuencia que es múltiplo de la frecuencia fundamental de la red eléctrica. Son causadas principalmente por las características de operación no lineales de algunas cargas como, por ejemplo, hornos de arco eléctrico o rectificadores.
- **Interarmónicas:** son componentes senoidales del voltaje o de la corriente que tienen una frecuencia que no es múltiplo entero de la frecuencia fundamental de la red eléctrica. Este fenómeno puede ser generado por los convertidores estáticos de frecuencia, los hornos de inducción y de arco eléctrico.
- **Notching:** es una perturbación del voltaje ocasionada por el funcionamiento normal de los convertidores electrónicos cuando la corriente es conmutada de una fase a otra. Es un fenómeno que tiene componentes de alta frecuencia, son repetitivos y pueden ser caracterizados en un espectro de frecuencias con un espectro alto.
- **Ruido de alta frecuencia:** son señales eléctricas indeseadas que tienen una frecuencia que es menor a 200KHz. El ruido puede ser generado por dispositivos electrónicos o de control en general.

2.1.2.6 *Fluctuaciones de voltaje:*

Son variaciones desproporcionadas de la envolvente del voltaje, las cuales pueden ser variaciones continuas o variaciones aleatorias que no sobrepasan el

rango de 95% a 105% de su valor nominal. A la sensación visual causada por estas variaciones se le conoce como *flicker*.

- *Flicker*: esta norma define al *flicker* como una sensación de inestabilidad de la calidad visual producida por una fuente luminosa cuya luminosidad varía con el tiempo. Este fenómeno es provocado por las variaciones sistemáticas de la red eléctrica que modulan la amplitud de la señal de voltaje, por ejemplo, el uso de cargas no lineales y cargas conmutadas electrónicamente que introducen alto contenido de armónicos e interarmónicos en la señal de voltaje. En la figura 2.1 se muestra un ejemplo de variaciones de voltaje:

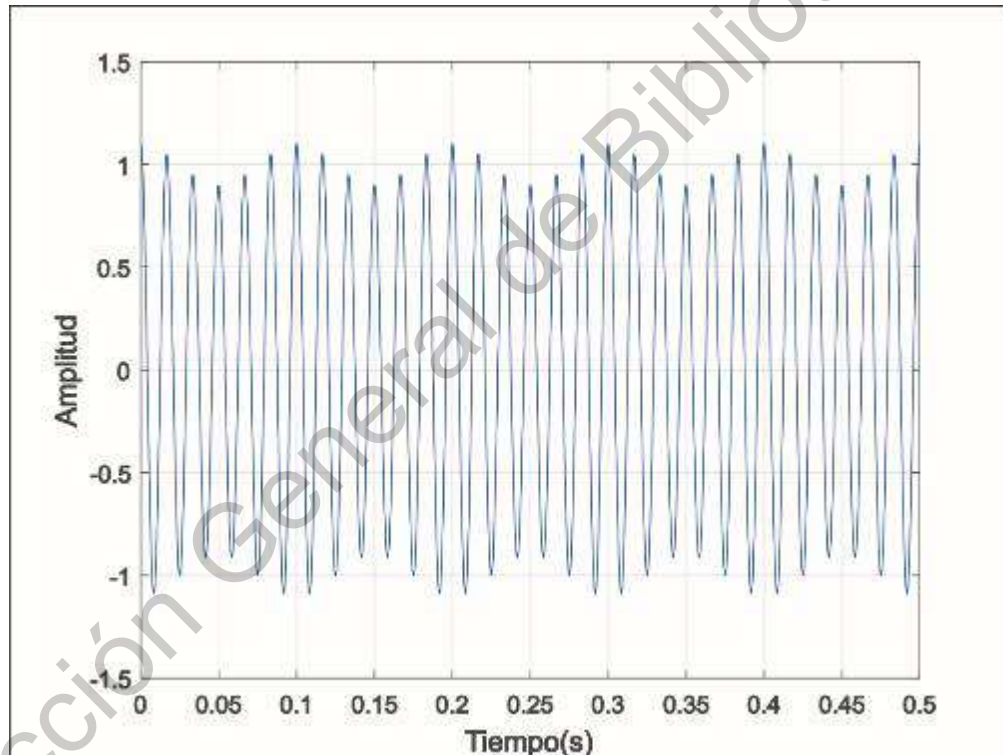


Figura 2.1 Fluctuaciones de voltaje.

2.1.2.7 Variaciones de frecuencia:

Son variaciones de la frecuencia fundamental de la red eléctrica. Si no se mantiene un equilibrio entre la carga y la generación, ocurre un cambio en la frecuencia de la red eléctrica ocasionado por los cambios de velocidad de rotación

de los generadores eléctricos. También las fallas en el sistema de transmisión pueden provocar este tipo de variaciones de frecuencia.

2.2 Norma IEC Std 61000-4-15:2010 “*Electromagnetic compatibility (EMC) - Testing and measurement techniques—Flickermeter— Functional and design specifications*”

La norma IEC 61000-4-15:2010 menciona las bases de cómo se debe diseñar un dispositivo de medición de *flicker*, también menciona los bloques funcionales de los que está compuesto el dispositivo y menciona cuál es la funcionalidad de cada uno de los bloques. En la figura 2.2 se muestra el diagrama a bloques de la implementación digital de un medidor de *flicker*.

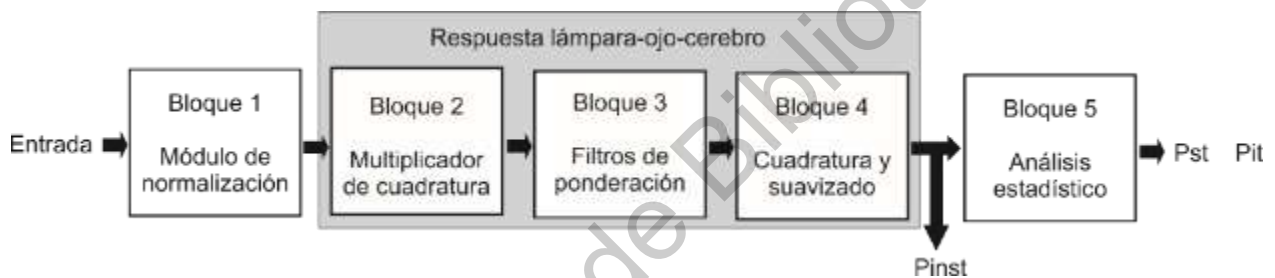


Figura 2.2 Diagrama funcional del medidor de *flicker* IEC.

El primer bloque es llamado módulo de normalización, y es usado como un módulo de adaptación de la señal, escalando el valor de la señal de entrada a un valor de referencia. Realiza una normalización de la envolvente de la señal. El segundo bloque, llamado multiplicador de cuadratura, es usado para elevar al cuadrado el voltaje de entrada, recuperando así la fluctuación del voltaje, simulando el comportamiento de una lámpara. El tercer bloque, llamado filtros de ponderación, está compuesto por dos filtros: un filtro pasa bajas, el cuál quita las frecuencias mayores a la frecuencia fundamental de la señal, y un filtro pasa altas, el cuál quita cualquier componente de C.D. que la señal contenga, simulando así la respuesta visual de un humano al *flicker*. El cuarto bloque, llamado cuadratura y suavizado, está compuesto por un filtro pasa bajas de primer orden, el cuál simula la percepción al *flicker* de un humano, combinando al ojo y el cerebro humano, y simula el efecto de acumulación de fatiga. La salida de este bloque representa la sensación

instantánea al *flicker*. El quinto bloque, llamado análisis estadístico, representa el análisis estadístico del nivel de *flicker* y permite el cálculo de varios parámetros. Los bloques 2, 3 y 4 en conjunto simulan las propiedades del filamento de una lámpara incandescente y el proceso fisiológico sensorial, conocido como cadena de efectos lámpara-ojo-cerebro (*lamp-eye-brain*).

2.3 Tarjeta de adquisición de datos PQ-UAQ

El dispositivo de monitoreo de la calidad de la energía (PQ-UAQ) está formado por un microprocesador basado en FPGA, el cual captura las señales eléctricas y guarda esta información en una tarjeta SD (Dzul, 2016). Las terminales de voltaje van conectadas directamente a la fuente de alimentación, y las terminales de corriente son pinzas que dan un valor a la salida de $\pm 1V$. Cada una de las tarjetas de adquisición de datos utiliza un grupo de ganancias definidas para cada canal y cada dispositivo de medición, las cuales deben tomarse en cuenta para, posteriormente, analizar de manera correcta las señales obtenidas.

Además, esta tarjeta cuenta con amplificadores de aislamiento modelo AMC 12000 en cada uno de sus canales. Esta tarjeta recibe instrucciones vía bluetooth y cuenta con el ADS13E08, un convertidor analógico digital de la marca Texas Instruments. En la tabla 1 se muestran las características de la tarjeta PQ-UAQ.

Tabla 1. Características de la tarjeta PQ-UAQ.

| | |
|--|-----------------------------------|
| Canales de Tensión | 4 |
| Canales de Corriente | 4 |
| Resolución de los canales de tensión | 16 bits |
| Resolución de los canales de corriente | 16 bits |
| Frecuencia de muestreo de los canales de corriente | 8 KSa/s |
| Frecuencia de muestreo de los canales de tensión | 8 KSa/s |
| Error de <i>Offset</i> | $\pm 350 \mu V$ |
| Error de ganancia | $\pm 0.1\%$ de la escala completa |

Fuente: Fernández (2016).

2.4 Fotorresistencia (LDR)

Las fotorresistencias (LDR por sus siglas en inglés, Light Dependent Resistors) son sensores que se basan en la variación de la resistencia eléctrica de un semiconductor, cuando cae sobre él una radiación óptica (Pallas-Areny, s.f.).

Su principio de operación se basa en la conductividad eléctrica de un material, la cual depende del número de electrones en la banda de conducción. En un semiconductor, a baja temperatura, la mayor parte de sus electrones están en la banda de valencia, comportándose casi como aislante. Pero al incrementar la temperatura, hay una agitación de los electrones. Como las bandas de valencia y de conducción están cercanas, los electrones saltan de la banda de valencia a la de conducción, incrementando así la conductividad del material. Si el semiconductor está lleno de electrones, el salto es más fácil. La energía necesaria para producir el salto, además del calor, proviene de una radiación óptica o una tensión eléctrica.

Los materiales más comunes de fabricación de las fotorresistencias son los compuestos de Cadmio (SCd, SeCd, TeCd), compuestos de plomo (SPb, SePb, TePb), y son fabricados en formas muy variadas, para facilitar su aplicación. Las aplicaciones de las LDR se pueden dividir entre las de medida de luz con poca precisión y de bajo costo, por ejemplo, el control automático de brillo y contraste en receptores de televisión, el control de diafragmas de cámaras fotográficas, el control de iluminación de vías públicas, etc.

2.5 Transformada de Fourier

La transformada de Fourier es un método que se utiliza para pasar una señal que está en el dominio del tiempo a una señal en el dominio de la frecuencia. La expresión de la Transformada de Fourier se muestra en la ecuación 2.1:

$$x(j\omega) = \int_{-\infty}^{+\infty} x(t) e^{-j\omega t} dt \quad (2.1)$$

Donde $x(t)$ es la señal original, $j = \sqrt{-1}$ y $\omega = 2\pi f$.

El primer paso de este método es modelar la dinámica del sistema mediante una ecuación diferencial, luego a esta ecuación se le aplica la transformada de Fourier para pasarla al dominio de la frecuencia. Esta ecuación resultante es simplificada mediante las propiedades de la transformada de Fourier (existencia, linealidad, cambio de frecuencia, modulación, cambio, inversión y escalado de tiempo, diferenciación), para encontrar la solución de la ecuación y obtener la respuesta del sistema. La transformada de Fourier ha sido usada para analizar muchos sistemas, como, por ejemplo, señales o algoritmos procesadores de imágenes, circuitos analógicos, sistemas de comunicación, sistemas mecánicos y ópticos.

La Transformada Rápida de Fourier (FFT por sus siglas en inglés, Fast Fourier Transform) es un algoritmo rápido y eficaz que evalúa la Transformada Discreta de Fourier (DFT por sus siglas en inglés, Discrete Fourier Transform), reduciendo el número de operaciones en el cálculo. Es la forma más común para encontrar las componentes armónicas en una señal. Se calcula mediante la ecuación 2.2:

$$X[k] = \sum_{n=0}^{N-1} x[n] e^{-j \frac{2\pi}{N} nk} \quad (2.2)$$

Donde $j = \sqrt{-1}$ y $k = 0, 1, \dots, N - 1$.

2.6 Sistema fotovoltaico

Un sistema fotovoltaico es capaz de convertir la energía radiante del sol en electricidad, esto se logra a través de celdas fotovoltaicas. Debido a que las celdas fotovoltaicas generan muy poca energía, estas deben conectarse entre sí en arreglos paralelo o serie para así producir suficiente energía. A un conjunto de celdas fotovoltaicas interconectadas se le denomina panel fotovoltaico.

Sin embargo, un sistema fotovoltaico solo produce energía durante el día cuando están iluminados por el sol, es necesario un mecanismo para almacenar la energía, para que pueda estar disponible en algún momento en que el sistema no

genere energía. Para solucionar este problema, se utiliza un elemento de almacenamiento, que normalmente son baterías recargables, para que la energía almacenada pueda ser utilizada en cualquier momento. Las baterías además son utilizadas para eliminar los transitorios y sirven para regular el voltaje del sistema. Con el uso de baterías, normalmente se utiliza un controlador de carga en el sistema, para evitar que las baterías se sobrecarguen o se descarguen completamente.

Si las cargas a alimentar por el sistema son cargas de corriente alterna, es necesario el uso de un inversor, para convertir la corriente directa que entrega el sistema en corriente alterna.

2.6.1 Tipos de sistemas fotovoltaicos

2.6.1.1 Sistema fotovoltaico aislado

Son los aquellos están conectados a baterías y que permiten el suministro eléctrico en periodos de poco o nulo aprovechamiento de la radiación solar (Martínez, 2014). Estos sistemas no están conectados a la red eléctrica.



Figura 2.3 Sistema aislado.

2.6.1.2 Sistema fotovoltaico conectado a la red

Son sistemas que necesitan de conexión con la red eléctrica. Son sistemas en los que la energía producida por el campo fotovoltaico es entregada directamente a la red de distribución. No utilizan baterías ni reguladores, solo se componen de los paneles fotovoltaicos y del inversor (Martínez, 2014).



Figura 2.4 Sistema conectado a la red eléctrica.

2.6.2 Elementos de un sistema fotovoltaico

2.6.2.1 Celda fotovoltaica

Son dispositivos que convierten la energía solar en electricidad, ya sea directamente mediante el efecto fotoeléctrico, o indirectamente mediante la previa inversión de la energía solar a calor o a energía química (Martínez, 2014).

2.6.2.2 Panel fotovoltaico

Es un conjunto de celdas fotovoltaicas conectadas entre sí (Martínez, 2014).

2.6.2.3 Inversor

Es un convertidor electrostático que, por medio del uso de componentes electrónicos de potencia, convierten la corriente directa de los paneles fotovoltaicos y las baterías, en corriente alterna. Existen varios tipos de inversores, como el inversor de onda cuadrada, o el inversor de onda senoidal modificada o los inversores moduladores por ancho de pulso.

- Inversor de onda cuadrada: estos inversores emplean interruptores de estado sólido conectados como generadores de onda cuadrada estable o como interruptores controlados externamente. El uso de generadores de

onda cuadrada estable permite utilizar el inversor en un sistema fotovoltaico autónomo, mientras que los interruptores controlados externamente se utilizan cuando el inversor debe sincronizarse con una fuente de corriente alterna externa.

- Inversor de onda senoidal modificada: estos inversores utilizan un método para convertir una fuente de corriente directa en una aproximación de una onda senoidal. Utiliza un método que implica el uso de un puente H para generar una aproximación a una onda senoidal. Cronometrea los niveles de tensión con los cuales minimiza la distorsión armónica y mantiene el valor V_{rms} constante.
- Inversor modulador por ancho de pulso: producen una forma de onda que tiene un valor promedio equivalente al nivel de una onda seleccionada en ese momento.

2.7 Correlación

El coeficiente de correlación es un valor que indica el grado de relación lineal entre 2 variables y puede tomar valores que oscilan entre -1 y +1.

Cuando el coeficiente de correlación es positivo y cercano a 1, indica que entre las variables existe un grado de relación bueno. En cambio, cuando el valor del coeficiente de correlación es negativo y cercano a -1, indica que entre las variables existe un comportamiento que es opuesto, es decir, mientras uno sea mayor el otro será menor. Por otro lado, cuando el valor del coeficiente de correlación es cercano a 0, esto indica que no existe relación lineal entre las variables. El comportamiento del coeficiente de correlación se puede apreciar en la figura 2.5.



Figura 2.5 Coeficiente de correlación. a) Cercano a +1, b) cercano a -1, c) cercano a 0.

Dirección General de Bibliotecas UAQ

CAPÍTULO 3

METODOLOGÍA

En este capítulo se presenta la metodología planteada para este trabajo de tesis, la cual se basa en el diseño de un sistema de acondicionamiento de un sensor fotorresistivo que, en conjunto con la tarjeta de adquisición de datos PQ-UAQ, pueda ser utilizado para adquirir la señal de iluminación de cualquier lámpara, así como las señales de alimentación de la misma, para poder encontrar si hay una relación entre estas señales.

3.1 Descripción general de la metodología

El diagrama de la figura 3.1 muestra un esquema de la metodología planteada en este trabajo; el cual se basa en 4 bloques principales: red eléctrica, sistema de pruebas, adquisición de datos y análisis y procesamiento de señales.

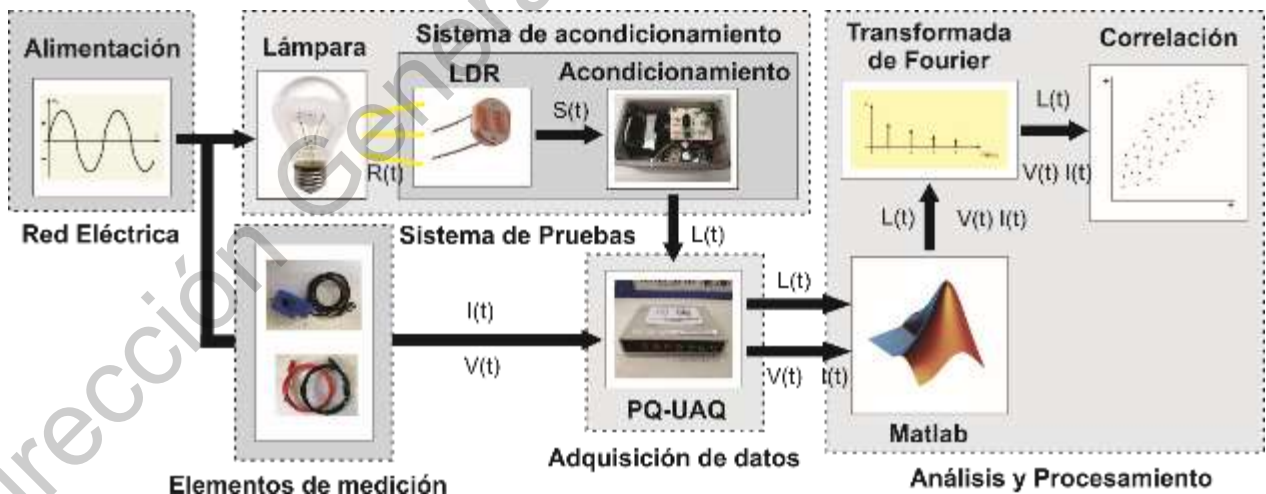


Figura 3.1 Esquema general de la metodología.

3.1.1 Red eléctrica

En este bloque se encuentran los lugares de donde se tomará la energía para alimentar las lámparas bajo estudio y que serán los casos de estudio en este trabajo de tesis. La energía necesaria para alimentar las lámparas será tomada de la red eléctrica en tres diferentes lugares, con la finalidad de estudiar cómo es la contribución de la calidad de la energía de estos lugares, en la existencia de *flicker*. Los lugares donde se llevará a cabo la alimentación de las lámparas son: en una zona industrial, donde se encuentre grandes cargas trabajando; en una zona habitacional, donde se encuentren casas habitacionales; y con el uso de una celda solar y de un inversor. En la sección 3.2 se describen más a detalle los casos de estudio planteados en este trabajo de tesis.

3.1.2 Sistema de pruebas

Para llevar a cabo las pruebas y mediciones, se implementa el sistema que se muestra en la figura 3.2, el cuál consta de un tubo de cartón pintado totalmente de negro y tapado por uno de sus extremos, en donde se localiza la base o *socket* para la colocación de las lámparas.

Algunas de las características del sistema de pruebas se muestran en la tabla 2. La distancia a considerar entre el sensor de iluminación y las lámparas es de aproximadamente 1 metro, el sistema tiene una forma cilíndrica con un diámetro de 35 cm.

Tabla 2. Características del sistema de pruebas.

| | |
|-----------|------------|
| Forma: | Cilíndrica |
| Altura: | 1 m. |
| Diámetro: | 35 cm. |
| Color: | Negro |



Figura 3.2 Vista general del sistema de pruebas.

En la figura 3.2 se muestra como está conformado el sistema: en la parte superior del tubo, por el lado donde se encuentra tapado, se encuentran localizadas las lámparas y el sistema de acondicionamiento se encuentra en la parte inferior. Además, el sistema cuenta una salida de aire, el cual es utilizado para evitar que el foco se caliente demasiado y evitar que pueda llegar a romperse, y tenga un espacio por donde pueda salir el aire suministrado.

En la figura 3.3 se muestra como está conformado el sistema por la parte de adentro, se muestra el *socket* donde van colocadas las lámparas, atrás de las lámparas se coloca un ventilador, que es utilizado para prevenir el sobrecalentamiento de las lámparas.



Figura 3.3 Vista interna del sistema de pruebas.

Además, la figura 3.1 muestra que el sistema de pruebas contiene dos bloques importantes en este trabajo de tesis: las lámparas bajo estudio y el sistema de acondicionamiento, que a continuación se describen.

3.1.2.1 Lámparas

En este bloque se localizan las lámparas seleccionadas para este trabajo de tesis. Si bien existen lámparas de una tecnología distinta a la incandescente, se seleccionaron lámparas incandescentes ya que los estándares internacionales en la medición de *flicker* se siguen basando en esta tecnología. Las potencias de las lámparas seleccionadas, que se encontraron en el mercado y que serán usadas en esta investigación, son de 72 Watts, 43 Watts y 25 Watts. En la figura 3.4 se muestran las lámparas seleccionadas.

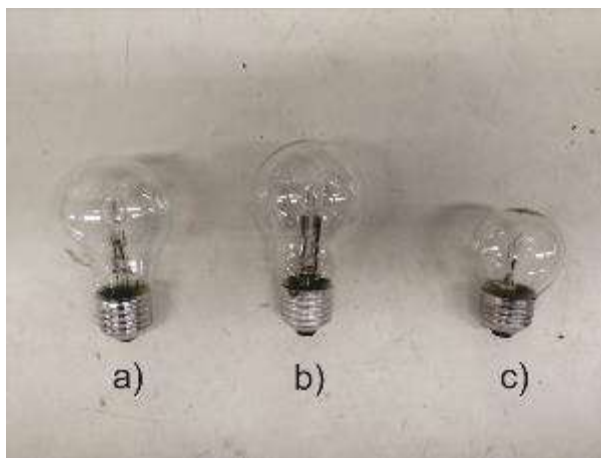


Figura 3.4 Lámparas seleccionadas. a) 72 Watts, b) 43 Watts, c) 25 Watts.

3.1.2.2 Sistema de acondicionamiento

El sistema de acondicionamiento de la señal de iluminación, implementado en esta investigación, está formado por 2 bloques, como se muestra en la figura 3.1: el bloque del sensor y el bloque del acondicionamiento.

- El bloque del sensor está formado por dos circuitos separados: el primero es un circuito regulador de voltaje y el segundo es un circuito basado en un puente de Wheatstone, como se muestra en la figura 3.5.

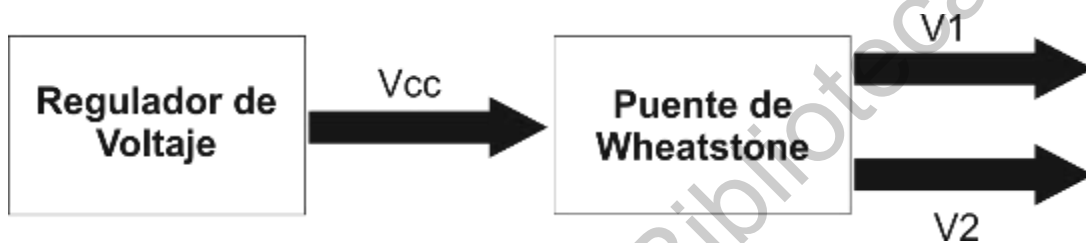


Figura 3.5 Estructura del bloque del sensor.

El circuito de regulación de voltaje que se muestra en la figura 3.6 está formado por una resistencia y un diodo Zener. Este circuito garantiza que, si existen variaciones de voltaje de la fuente de 12 volts, el voltaje de alimentación a la salida se mantenga constante.

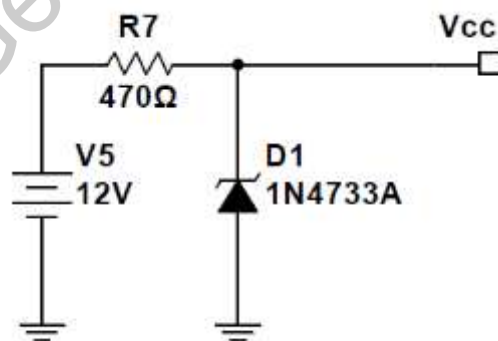


Figura 3.6 Circuito regulador de voltaje.

El circuito basado en un puente de Wheatstone está formado por un conjunto de resistencias de distintos valores, las cuales fueron

seleccionadas de tal forma que el sensor fotorresistivo pueda ser sensible a las variaciones de iluminación de las lámparas. El circuito implementado se muestra en la figura 3.7.

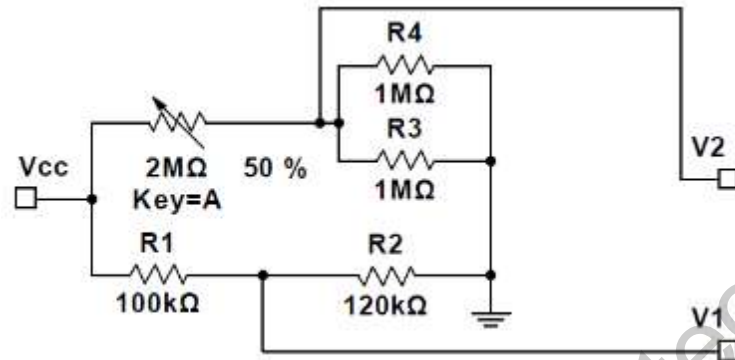


Figura 3.7 Puente de Wheatstone implementado.

- El bloque de acondicionamiento está formado por un circuito basado en un amplificador de instrumentación y un amplificador derivativo. El amplificador de instrumentación se diseñó de tal forma que las dos señales entregadas por el puente de Wheatstone sean combinadas en una sola señal y que además contenga una ganancia lo más cercana a la unidad. Para esto, se utiliza un circuito como el que se muestra en la figura 3.8.

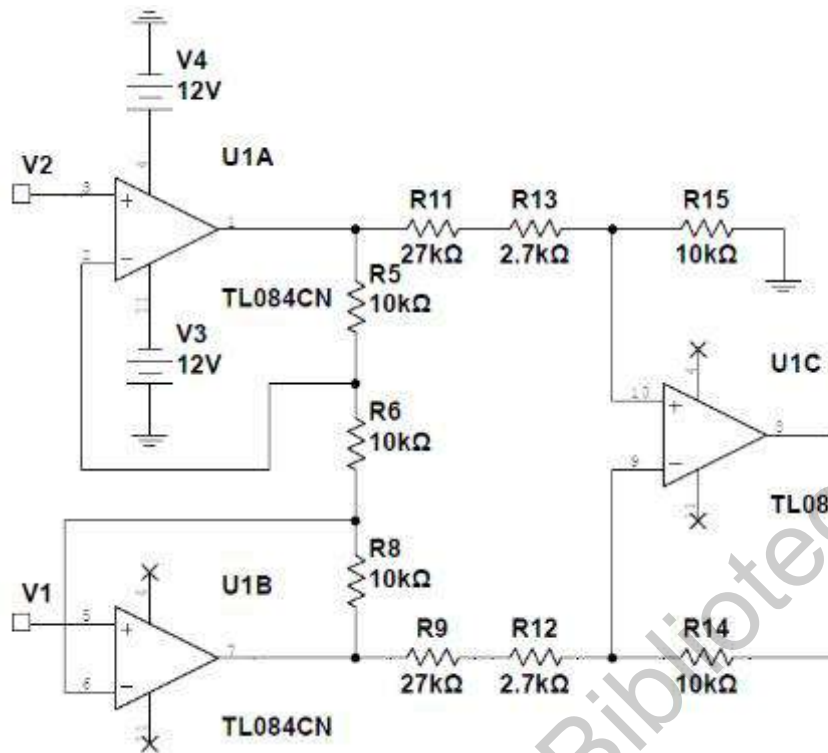


Figura 3.8 Amplificador de instrumentación implementado.

- El amplificador derivativo está formado por un capacitor y una resistencia, los cuales son seleccionados de tal forma que permitan quitar el voltaje de *offset* que contiene la señal del sensor y a su vez, amplificar la señal y dejarla dentro del rango de medición de la tarjeta PQ-UAQ, que es de ± 1 V. En este caso, la amplitud de la señal se establece en un valor de ± 0.7 V, por si en algún momento llegara a haber algún valor muy grande en la señal que pueda afectar a la tarjeta, y fue calibrado con la lámpara de 25 Watts dentro del sistema implementado. Cabe mencionar que el valor de la amplitud de la señal dependerá de la cantidad de iluminación que el sensor fotorresistivo reciba. Este circuito desarrollado se muestra en la figura 3.9.

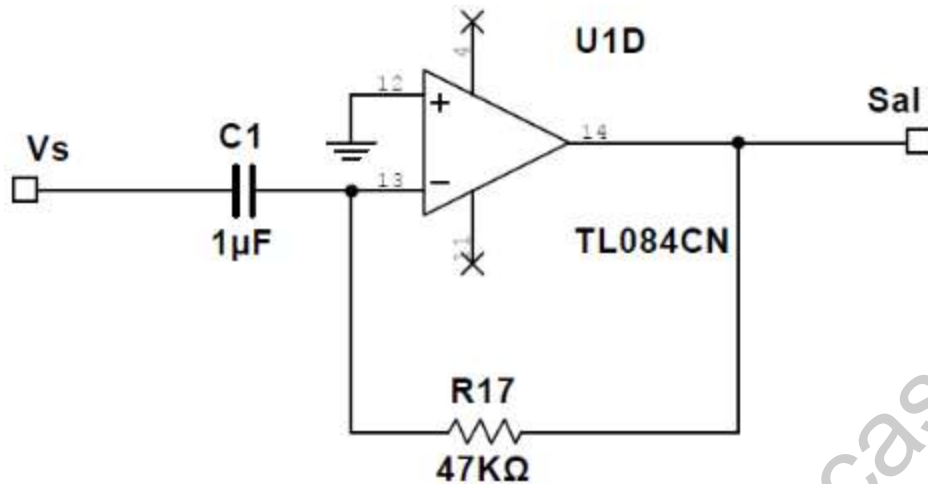


Figura 3.9 Amplificador derivativo implementado.

Para tener un dispositivo donde se puedan implementar los circuitos del sensor y del acondicionamiento de la señal, y que entregue la señal del sensor, se llevó a cabo el diseño de una carcasa en el software SolidWorks, el cual es un software de diseño asistido por computadora (CAD por sus siglas en inglés, Computer-Aided Design), en 3D. El objetivo de este diseño es tener un dispositivo que nos entregue a la salida la señal de iluminación de las lámparas y que pueda ser utilizado para otras aplicaciones posteriores. Este diseño fue elaborado en dos partes: el diseño de la base, la cual se muestra en la figura 3.10, y el diseño de la tapa de la caja, mostrado en la figura 3.11.

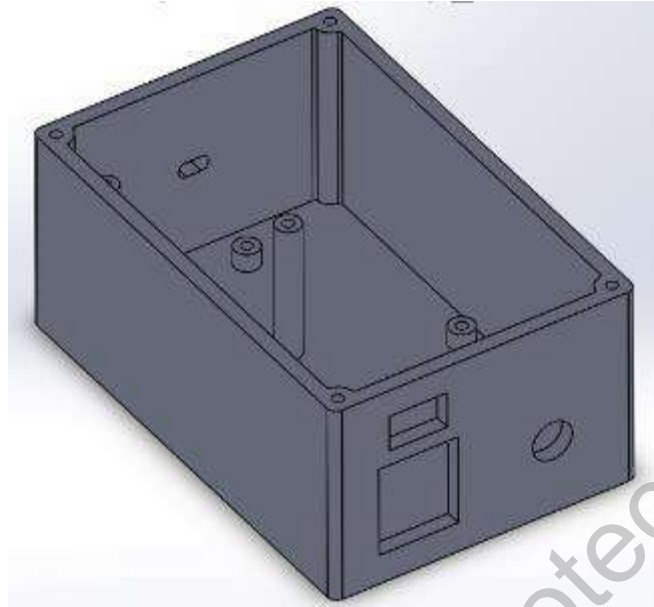


Figura 3.10 Base.



Figura 3.11 Tapa.

Además, se llevó a cabo el diseño de los circuitos de las figuras 3.6, 3.7, 3.8 y 3.9 en el software Kicad, que es un software para diseño de PCB's (Printed Circuit Board, por sus siglas en inglés). Así mismo, fue necesario el diseño de una fuente de alimentación para poder alimentar el circuito de acondicionamiento con una salida de voltaje de $\pm 12V$. En las figuras 3.12 y 3.13 se muestran una imagen de

las tarjetas diseñadas, para el acondicionamiento de la señal de iluminación y la fuente de alimentación.

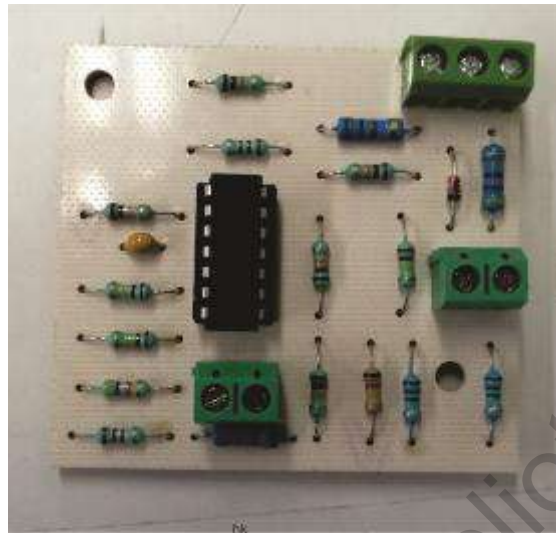


Figura 3.12 Tarjeta de acondicionamiento.

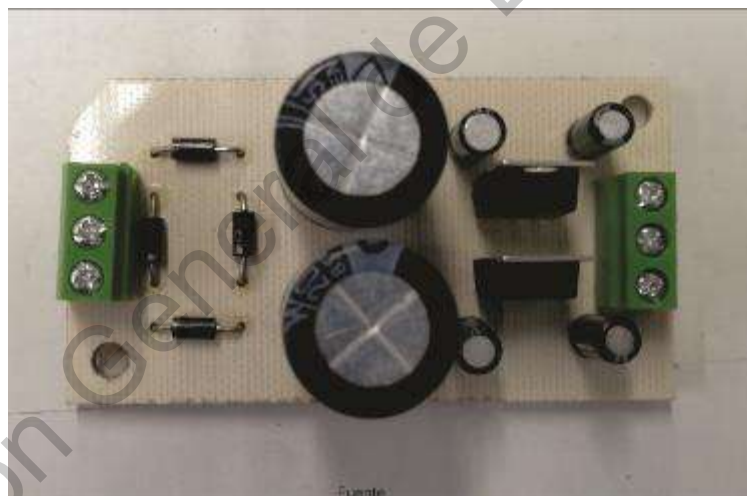


Figura 3.13 Tarjeta de la fuente de alimentación.

En la figura 3.14 se muestra el sistema desarrollado para el acondicionamiento de la señal de iluminación de las lámparas, en la cual se muestra las dos tarjetas desarrolladas, la tarjeta de acondicionamiento y la tarjeta de la fuente, y el transformador utilizado en la fuente de alimentación.

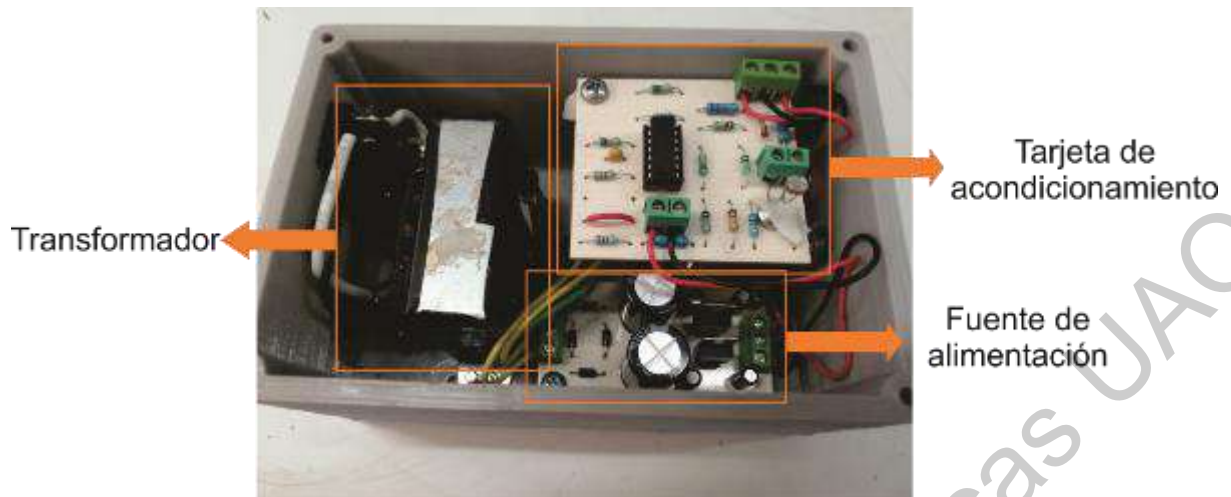


Figura 3.14 Sistema de acondicionamiento.

3.1.3 Adquisición de datos

En este bloque se encuentra la tarjeta propietaria PQ-UAQ, con la cual son adquiridas las señales tanto de alimentación de las lámparas como la señal del sensor. Para lograr esto, se utilizan terminales de voltaje las cuales son conectadas directamente a la fuente de alimentación, y además utiliza terminales de corriente las cuales son pinzas o ganchos de medición de corriente.

Los valores de las mediciones son guardados dentro de una tarjeta SD, para su posterior procesamiento y análisis. Debido a las características de operación de la tarjeta PQ-UAQ, hubo la necesidad de utilizar una tarjeta SD de una velocidad de almacenamiento y lectura alta de 90 MB/s y 95 MB/s, respectivamente.

3.1.4 Análisis y procesamiento de señales

En este bloque se lleva a cabo el procesamiento y el análisis de la información obtenida de las mediciones de las lámparas con ayuda de las funciones que el software Matlab contiene.

La metodología propuesta tiene como primer paso, el obtener la envolvente de las señales de voltaje y del sensor. Para lo cual, como primer punto se tiene que eliminar el *offset* que contiene la señal, el cual se logra restándole a las señales, el promedio de cada señal. En seguida, se realiza un filtrado de las señales, mediante la implementación de un filtro pasa bajas, con la finalidad de eliminar cualquier ruido

de alta frecuencia que las señales puedan contener. Posteriormente, se realiza una normalización de las señales para finalmente obtener la envolvente de cada señal.

La información resultante del cálculo de las envolventes de ambas señales, se le aplica la transformada de Fourier, para obtener los valores de las frecuencias de *flicker* y poder verlos en el espectro en frecuencias.

3.2 Casos de estudio

Para estudiar la contribución de la calidad de la energía en la existencia de *flicker*, se llevan a cabo las pruebas y mediciones en los siguientes espacios y condiciones, como casos de estudio:

- CASO 1: En un espacio de maquinado.
- CASO 2: En una casa habitación.
- CASO 3: Con el uso de un panel fotovoltaico y un inversor.

Además, por cada caso de estudio se llevan a cabo 3 pruebas, una por cada lámpara seleccionada, y cada una de las pruebas tiene una duración de 1 hora, aproximadamente.

Estos casos de estudio son descritos más a detalle a continuación:

3.2.1 Espacio de maquinado

En este caso de estudio se busca conocer la contribución de distintas cargas de maquinado o de soldadura en la existencia de *flicker*. Primero, se realiza la conexión del sistema de pruebas con la tarjeta PQ-UAQ junto al sensor de corriente y los ganchos de medición de voltaje, y el montaje de las lámparas, tal y como se muestra en la figura 3.15. El sistema de acondicionamiento es colocado en el interior en la parte inferior del sistema de pruebas, y adicionalmente, se conecta una fuente de computadora, para la alimentación del sistema de ventilación.

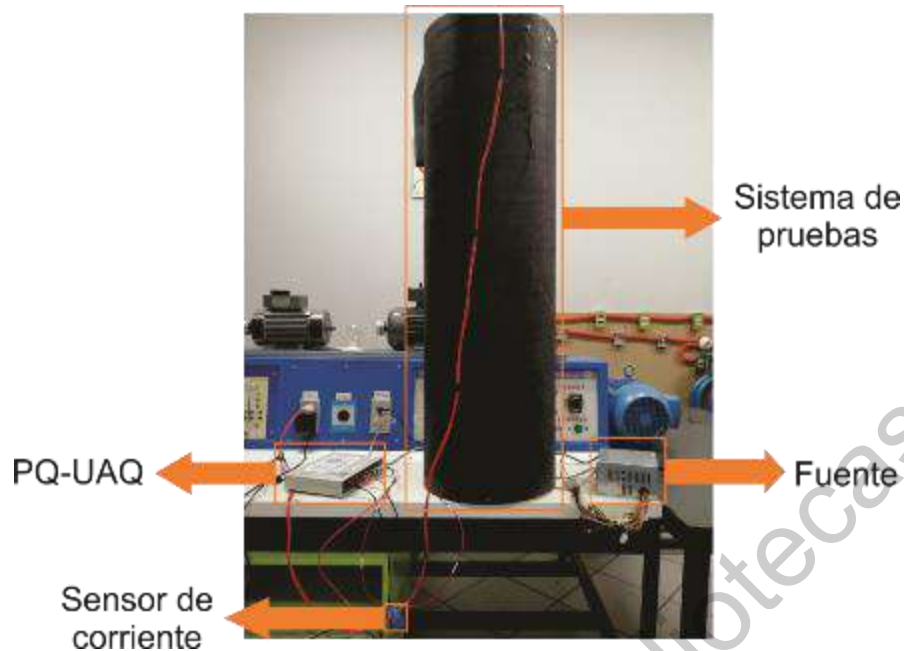


Figura 3.15 Sistema conectado con la tarjeta PQ-UAQ.

Posteriormente, se realiza la adquisición de las señales de alimentación y de iluminación de las lámparas bajo estudio. Las tres pruebas, una por cada lámpara, se realizaron en el momento en que máquinas, como tornos convencionales y soldadoras de arco eléctrico, estaban bajo uso.

3.2.2 Casa-habitación

En este caso de estudio se busca conocer la contribución de algunos electrodomésticos, que actualmente son usados y se pueden encontrar en una casa, al *flicker*. Para lo cual, se realiza la conexión del sistema de pruebas con la tarjeta PQ y el montaje de las lámparas, como se muestra en la figura 3.16.

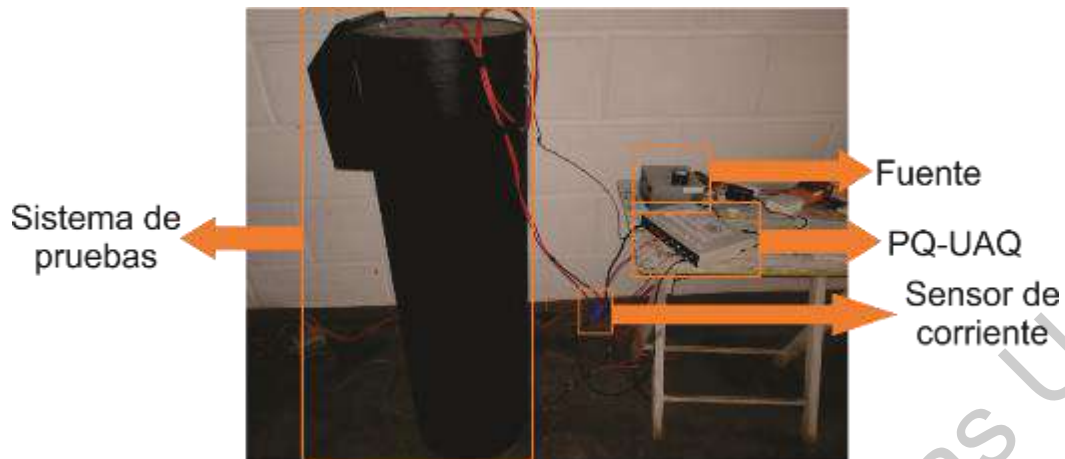


Figura 3.16 Sistema conectado en casa-habitación.

Para este caso de estudio, las pruebas fueron realizadas al momento en que electrodomésticos, como lavadora, microondas, refrigerador, etc., estaban bajo uso.

3.2.3 Panel fotovoltaico y un inversor.

Para este caso de estudio, es necesario el uso de un panel fotovoltaico y un inversor. Además, fue necesario el uso de un regulador de voltaje y una batería de auto de 12 Volts para alimentar el inversor, debido a que la celda solar entrega un valor elevado de voltaje lo que provoca un mal funcionamiento del inversor. Se realizó la conexión del sistema de pruebas con la tarjeta PQ-UAQ con el sistema de generación fotovoltaico, como se muestra en la figura 3.17.

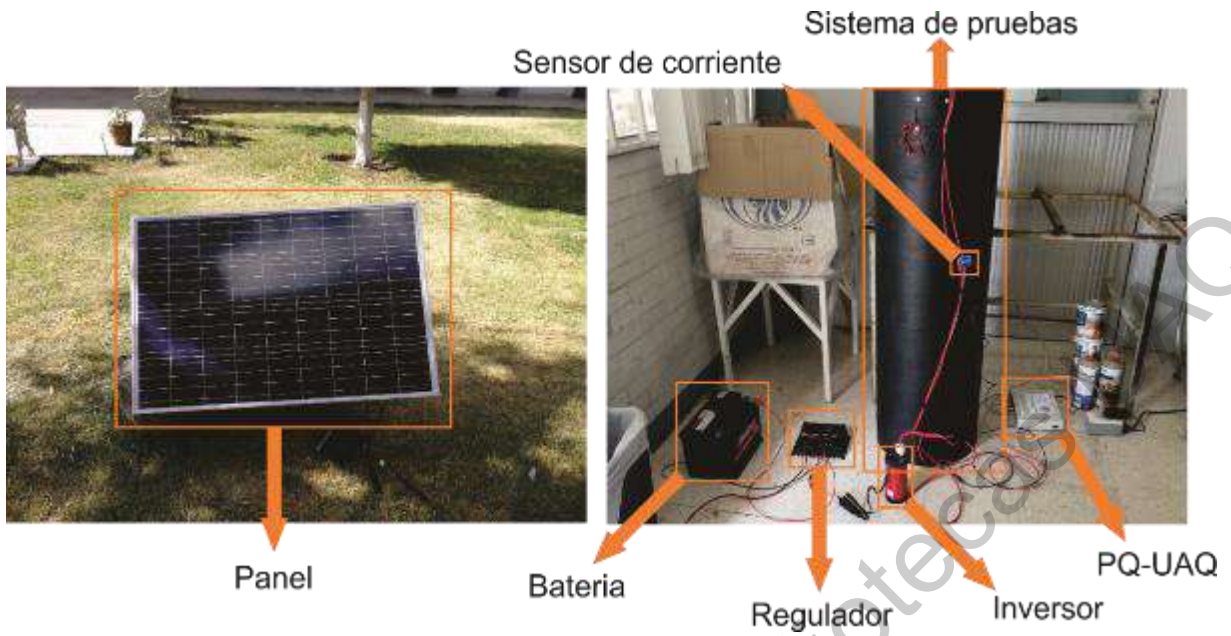


Figura 3.17 Sistema conectado con el panel fotovoltaico y el inversor.

Para este caso de estudio, se realizó la conexión del sistema de pruebas con un sistema de generación fotovoltaico tipo aislado, para alimentar las lámparas.

Dirección General de Bibliotecas

CAPÍTULO 4

RESULTADOS

Los resultados obtenidos en este trabajo de tesis son: la implementación y el desarrollo del sistema de acondicionamiento de un sensor fotorresistivo con una salida de $\pm 1V$ y los resultados y gráficas de las mediciones realizadas.

4.1 Sistema de acondicionamiento

El dispositivo diseñado para la medición de la señal de iluminación se muestra en la figura 4.2, el cual tiene localizado, en la parte superior, el sensor fotorresistivo, y a la salida cuenta con 2 conectores banana, uno que entrega la señal del sensor y otro que entrega tierra, para la medición de la señal de iluminación. Además, cuenta con un fusible como protección contra sobrecorriente, cuenta con interruptor para el encendido y apagado del dispositivo, y cuenta con conector para cable de alimentación, como se muestra en la figura 4.1.

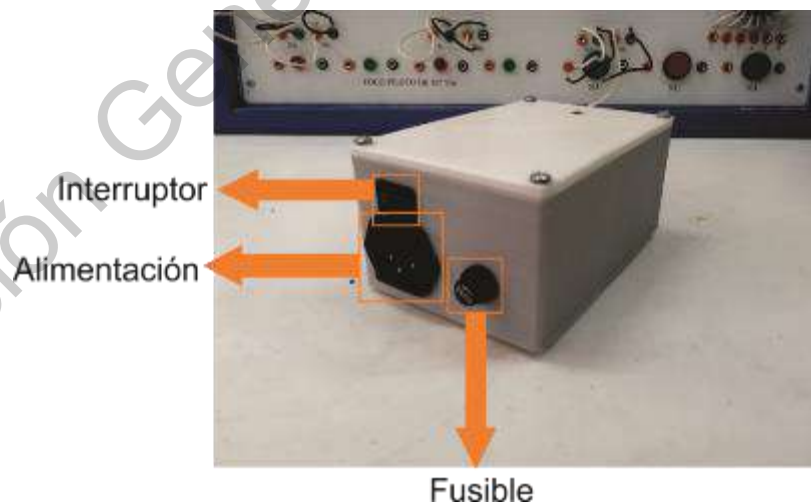


Figura 4.1 Vista frontal.

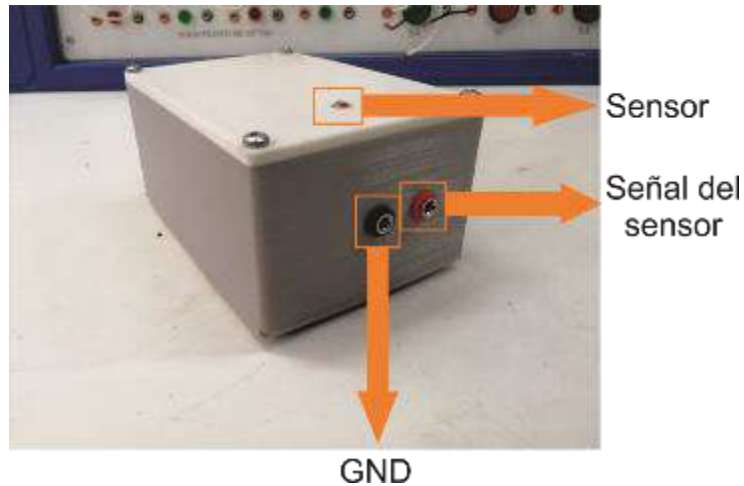


Figura 4.2 Vista posterior.

Las características de operación del dispositivo desarrollado se muestran en la tabla 3.

Tabla 3. Características del dispositivo.

| | |
|-------------------------|------------|
| Voltaje de alimentación | 120 V. |
| Voltaje de salida | ± 1 V. |

4.2 Mediciones

4.2.1 Caso 1: Espacio de maquinado

A continuación, se presentan los resultados del caso de estudio 1. Las figuras 4.3, 4.4 y 4.5 muestran las señales de iluminación obtenidas con el sensor fotorresistivo, y las figuras 4.6, 4.7 y 4.8 muestran las señales de voltaje adquiridas para las distintas lámparas bajo estudio. En ellas, se observa uno de los archivos de 10 minutos que la tarjeta PQ-UAQ guardó, y al que adicionalmente se le restó el promedio de la señal y se normalizó para poder trabajar en una representación por unidad (P.U.). En las figuras puede observarse que la forma de onda senoidal que tiene la señal de voltaje tomada de la red se puede ver reflejada en la señal del sensor. Por otro lado, a pesar de que en las figuras no se aprecian largos cambios en amplitud de las señales, eso no quiere decir que no existan cambios, solamente son más pequeños.

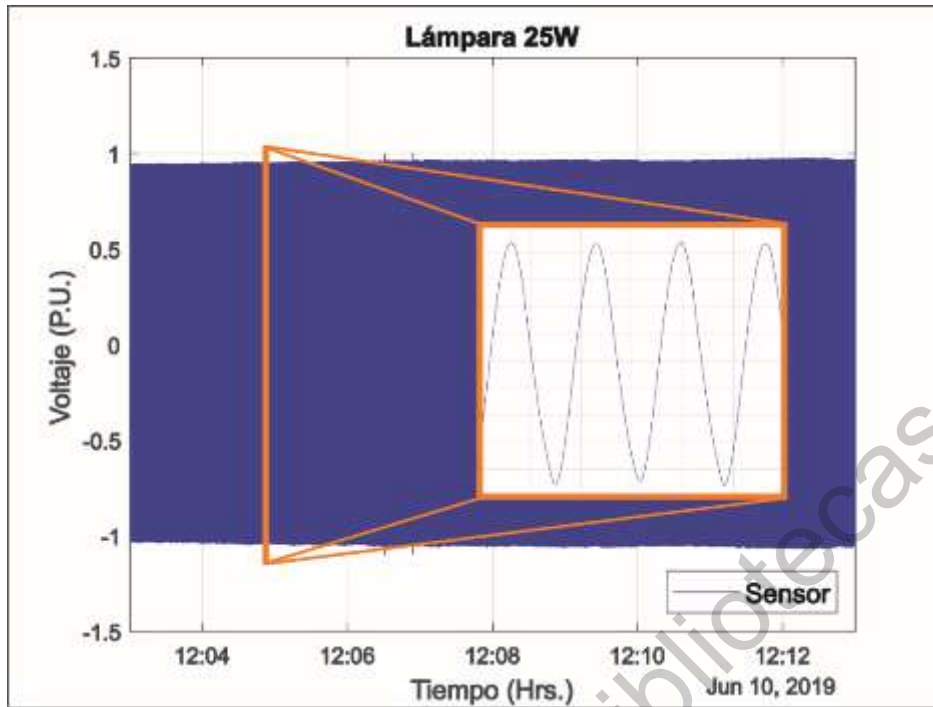


Figura 4.3 Señal del sensor normalizada de la lámpara de 25W en el caso 1.

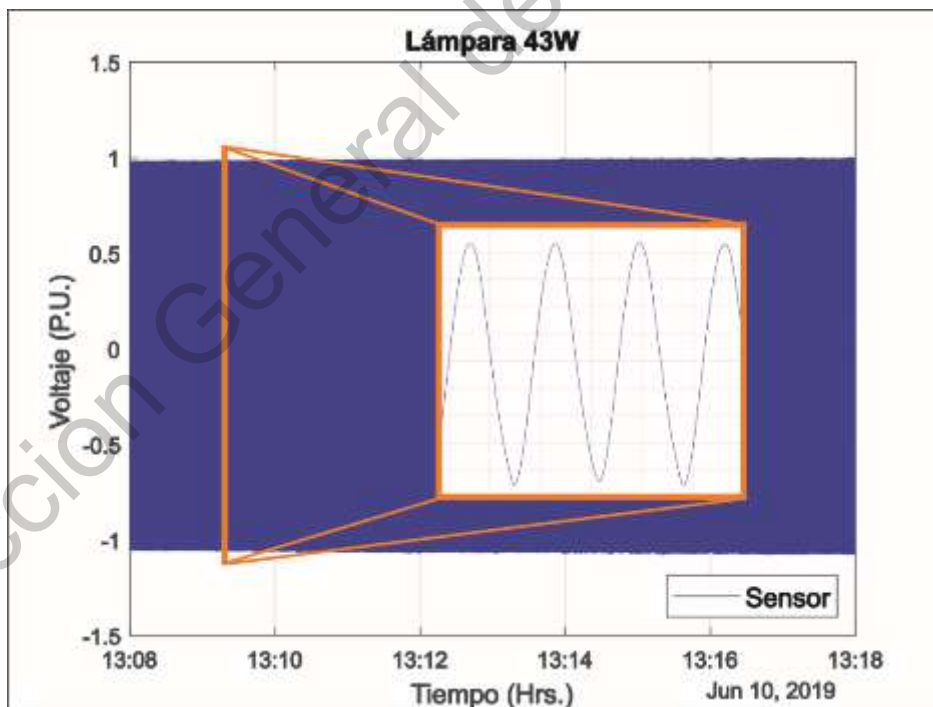


Figura 4.4 Señal del sensor normalizada de la lámpara de 43W en el caso 1.

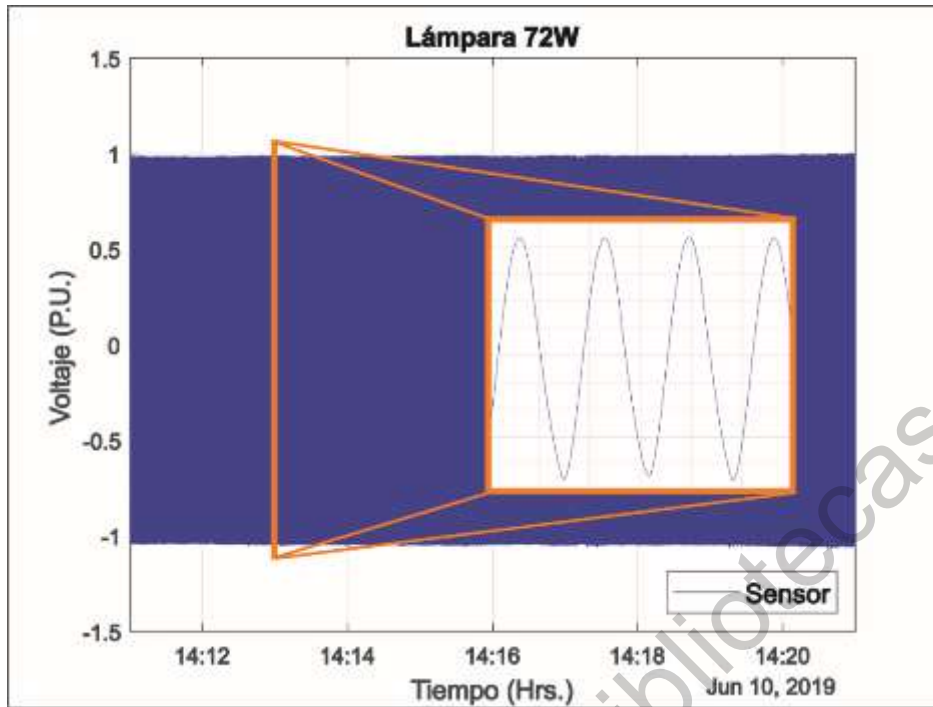


Figura 4.5 Señal del sensor normalizada de la lámpara de 72W en el caso 1.

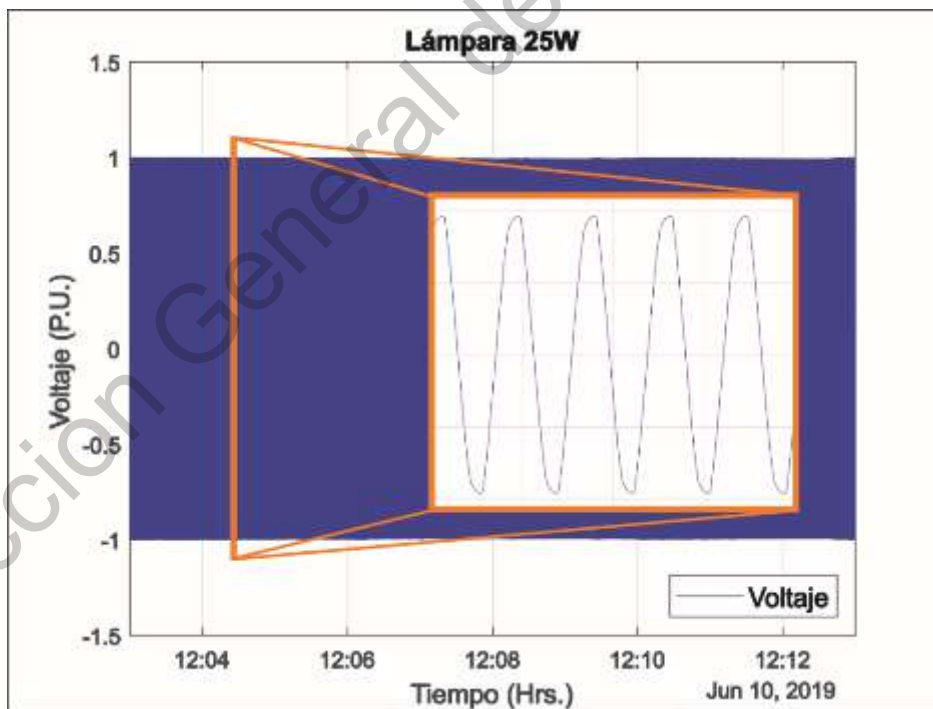


Figura 4.6 Señal de voltaje normalizada de la lámpara de 25W en el caso 1.

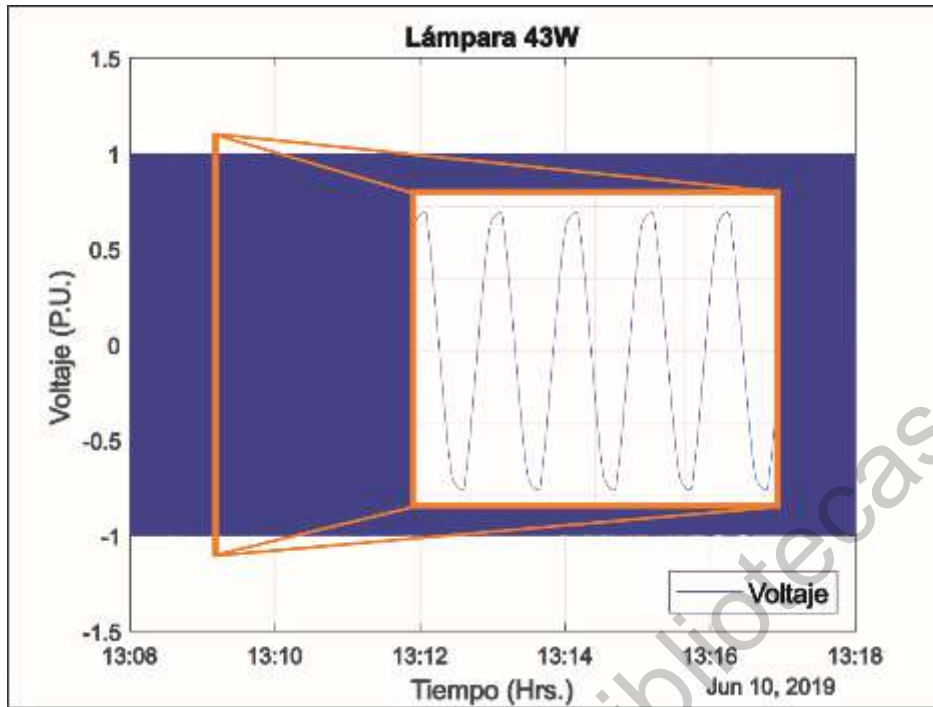


Figura 4.7 Señal de voltaje normalizada de la lámpara de 43W en el caso 1.

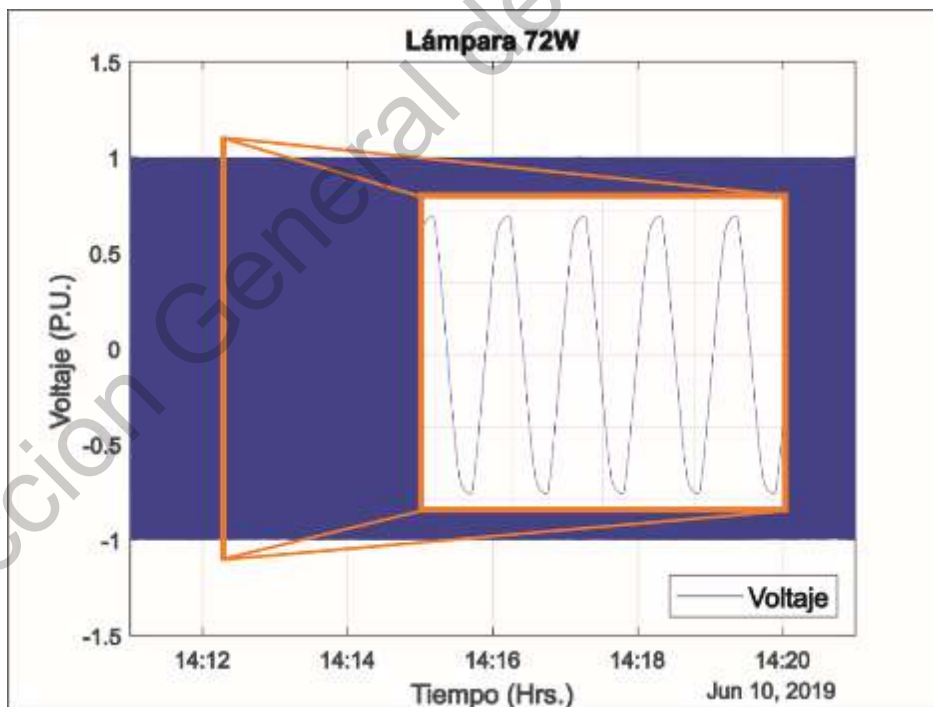


Figura 4.8 Señal de voltaje normalizada de la lámpara de 72W en el caso 1.

En el siguiente paso del análisis se realiza el cálculo de las envolventes de las señales del sensor y del voltaje de alimentación, para cada una de las lámparas bajo estudio. Las figuras 4.9, 4.10 y 4.11 muestran las envolventes calculadas junto con un periodo de las señales de iluminación obtenidas con el sensor, y las figuras 4.12, 4.13 y 4.14 muestran las envolventes calculadas junto con las señales del voltaje de alimentación. Puede observarse en las figuras 4.12, 4.13 y 4.14 que existe un pequeño lapso donde la amplitud de la señal de voltaje se ve disminuida. Caso contrario puede observarse en las figuras 4.9, 4.10 y 4.11, donde en ese mismo lapso de tiempo la señal del sensor tiene un pequeño aumento en la amplitud, esto seguramente por el encendido de algún equipo conectado a la red en ese momento. Por otro lado, el cálculo de la envolvente a lo largo de las señales es bueno, cubriendo sin problemas los cambios repentinos en la amplitud de las señales.

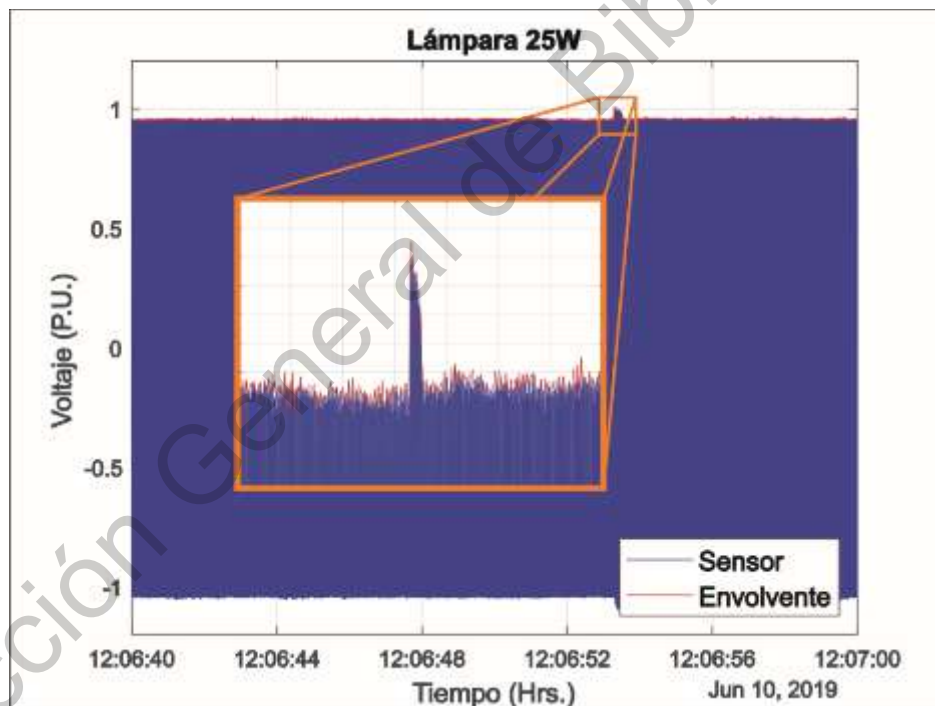


Figura 4.9 Señal del sensor con su envolvente calculada de la lámpara de 25W en el caso 1.

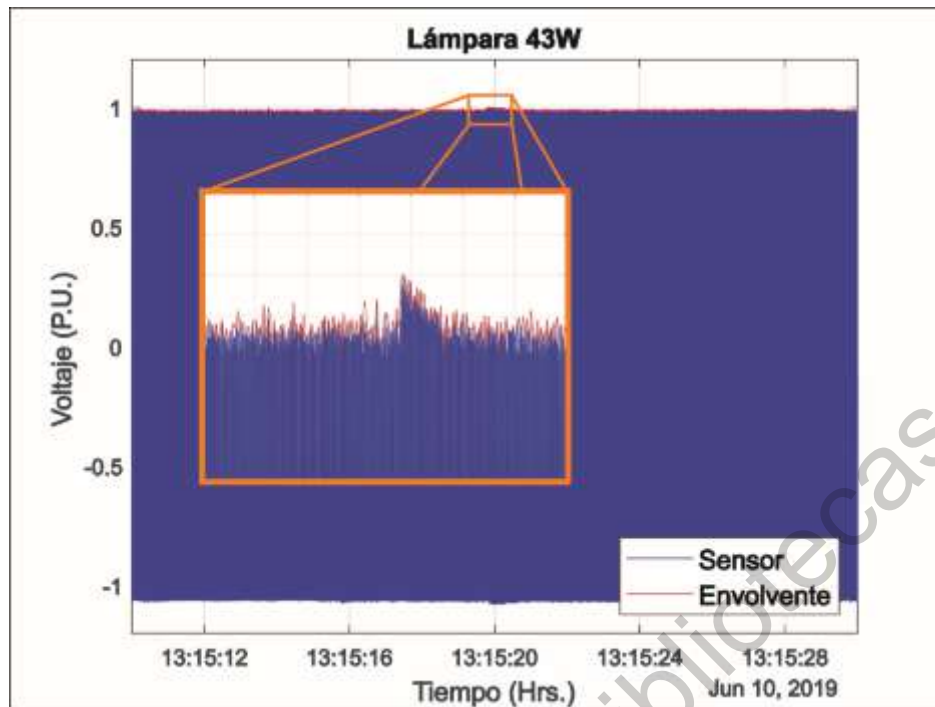


Figura 4.10 Señal del sensor con su envolvente calculada de la lámpara de 43W en el caso 1.

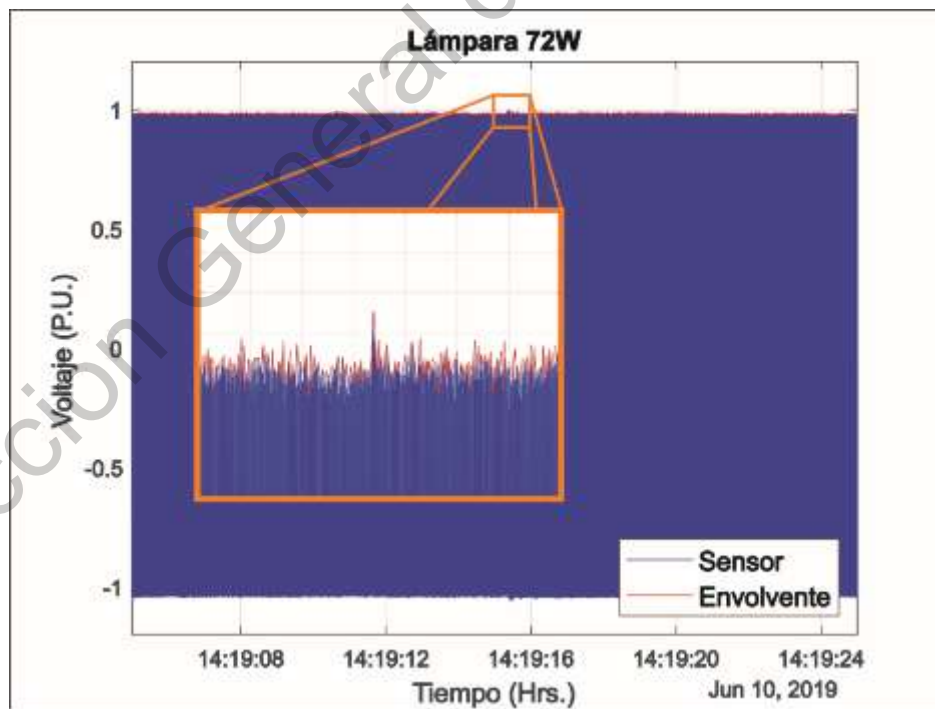


Figura 4.11 Señal del sensor con su envolvente calculada de la lámpara de 72W en el caso 1.

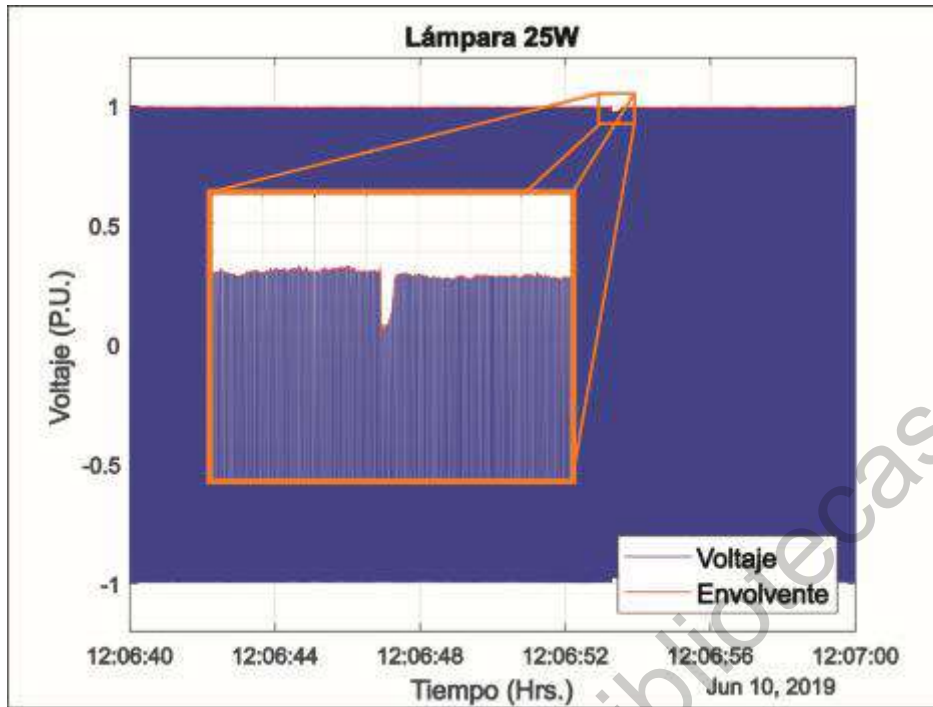


Figura 4.12 Señal de voltaje con su envolvente calculada de la lámpara de 25W en el caso 1.

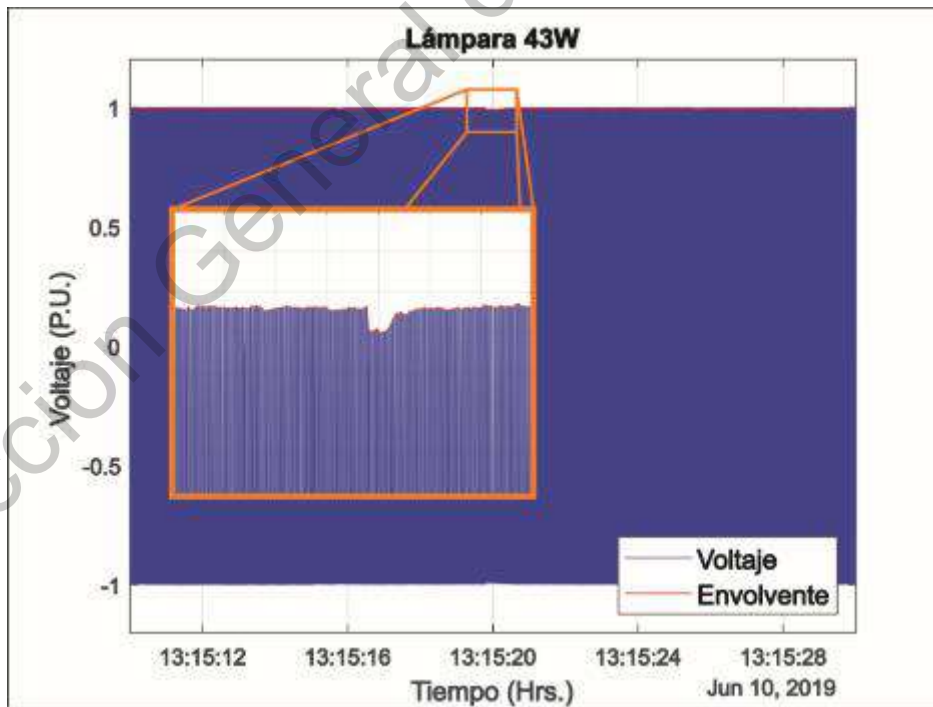


Figura 4.13 Señal de voltaje con su envolvente calculada de la lámpara de 43W en el caso 1.

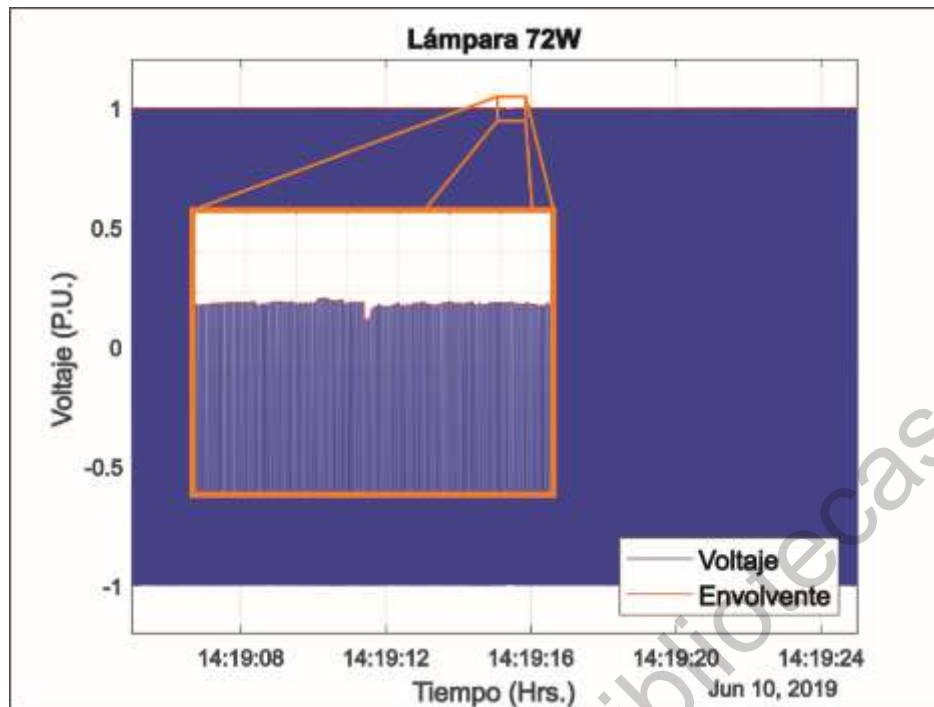


Figura 4.14 Señal de voltaje con su envolvente calculada de la lámpara de 72W en el caso 1.

En el siguiente paso se analiza un lapso de tiempo para cada una de las envoltentes, en donde ocurra y se puede notar un claro cambio en la amplitud de ambas señales, con la finalidad de ver cómo se comportaban una con respecto de la otra. Las figuras 4.15, 4.16 y 4.17 muestran una comparación entre la envolvente de la señal del sensor y la envolvente de la señal de voltaje, para cada una de las lámparas. Se puede observar claramente que, si la envolvente de la señal de voltaje disminuye, se ve reflejado con un aumento en la envolvente de la señal del sensor, y viceversa. Se nota un comportamiento entre las envoltentes que es opuesto uno del otro. Por otro lado, la figura 4.15 muestra que hay un cambio más grande en la amplitud de la señal de voltaje, caso contrario se aprecia en las figuras 4.16 y 4.17 donde hay un cambio reducido en la amplitud de la señal de voltaje.

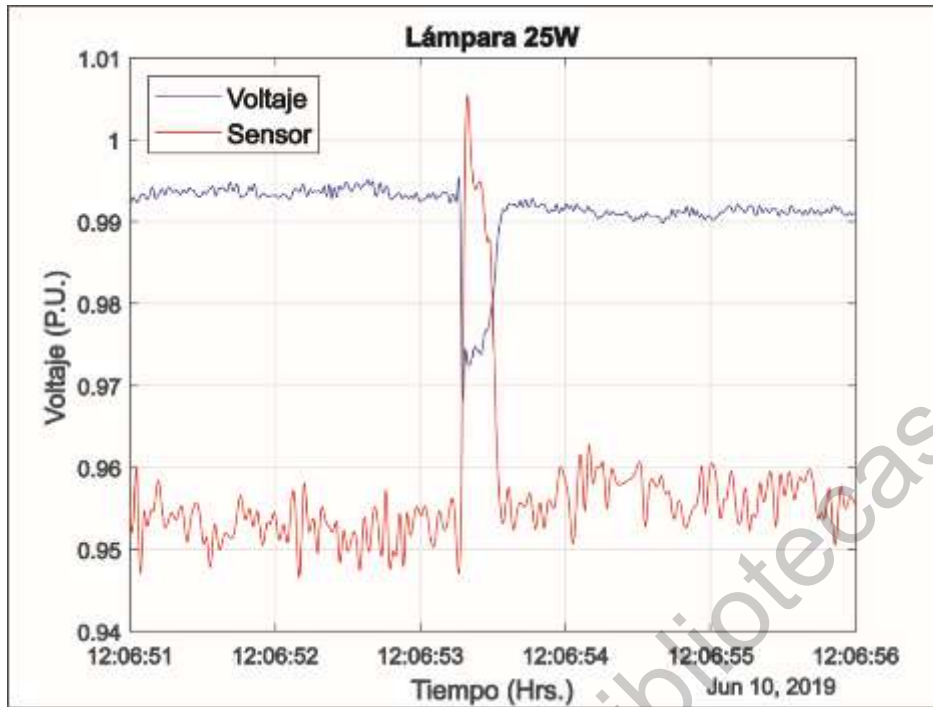


Figura 4.15 Envolventes de las señales de la lámpara de 25W en el caso 1.

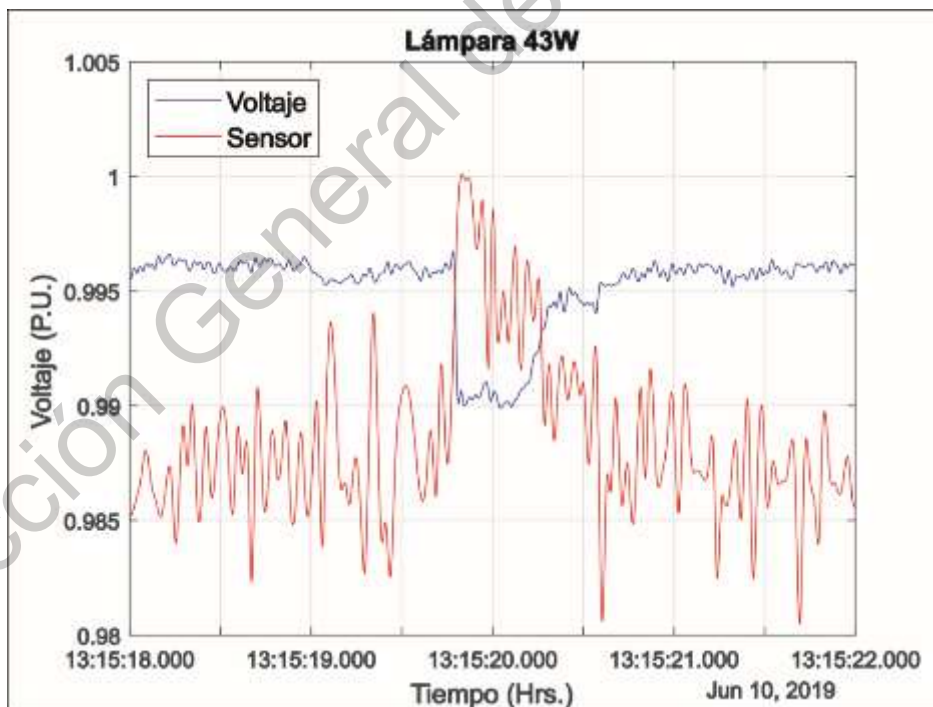


Figura 4.16 Envolventes de las señales de la lámpara de 43W en el caso 1.

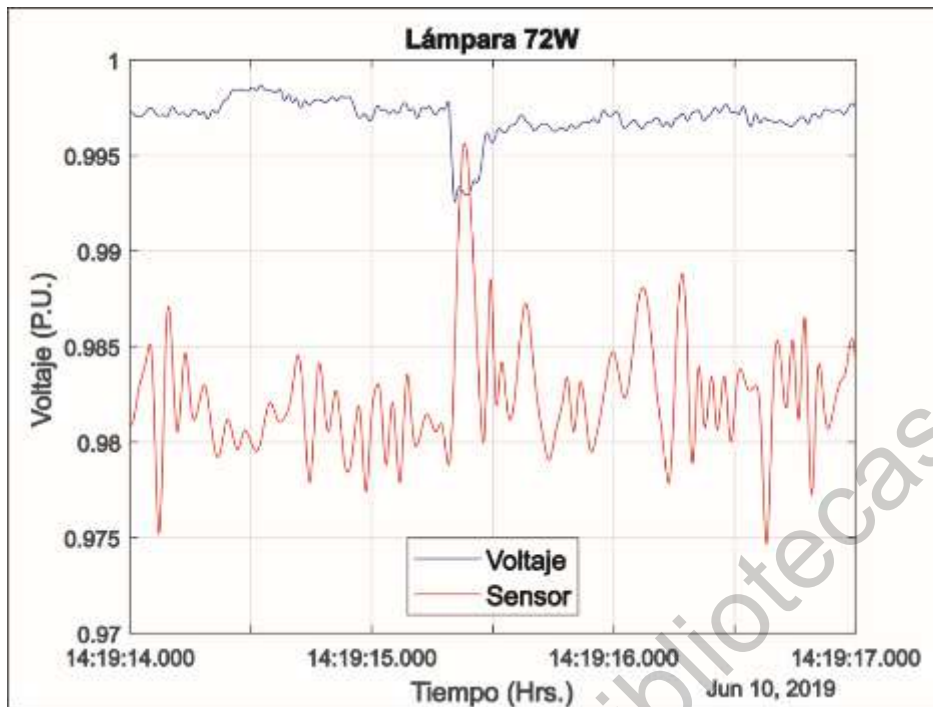


Figura 4.17 Envolventes de las señales de la lámpara de 72W en el caso 1.

Finalmente, las figuras 4.18, 4.19 y 4.20 muestran los espectros en frecuencias de las envolventes de las 2 señales de cada una de las lámparas. Se realiza el análisis por una ventana de 30 segundos en cada una de las envolventes, para encontrar que frecuencias de la envolvente de voltaje se ven reflejadas en la envolvente de la señal del sensor. La figura 4.18 muestra los resultados obtenidos para las señales de voltaje y de iluminación de la lámpara de 25 Watts, en la cual se observan algunas componentes de baja frecuencia de la envolvente de la señal de voltaje que se ven reflejadas en la envolvente de la señal del sensor, solo que con una amplitud mayor en la señal del sensor. Casos similares se muestran en las figuras 4.19 y 4.20, solo que en ellas se muestran diferentes componentes de frecuencia ya que las pruebas no se realizaron al mismo tiempo e indican que las frecuencias en las envolventes de las señales van cambiando con el tiempo y no son estacionarias.

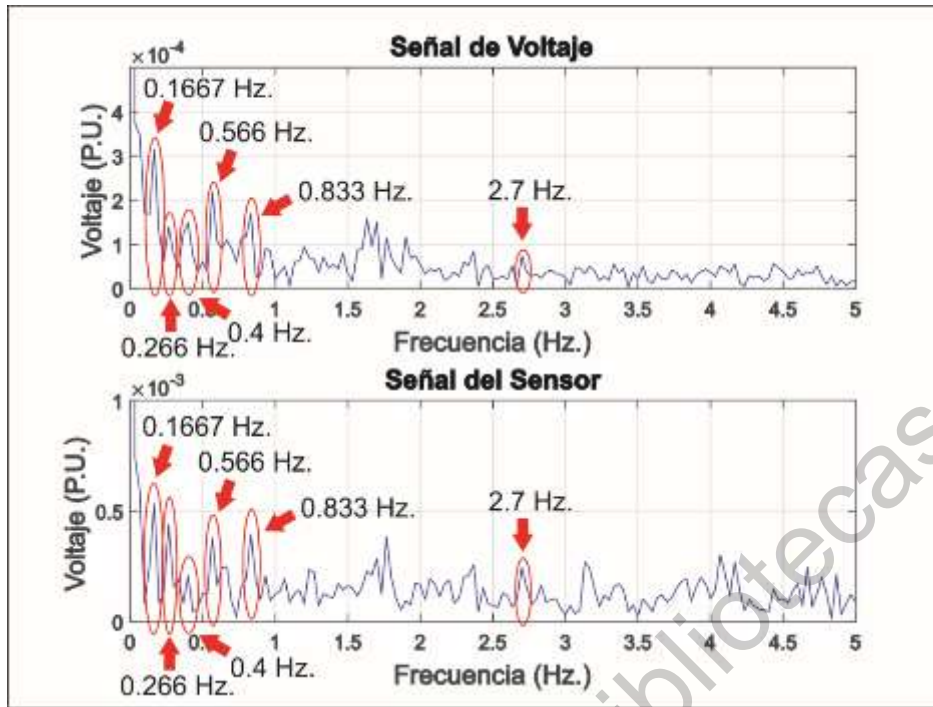


Figura 4.18 Espectro en frecuencia de las envolventes de la lámpara de 25W en el caso 1.

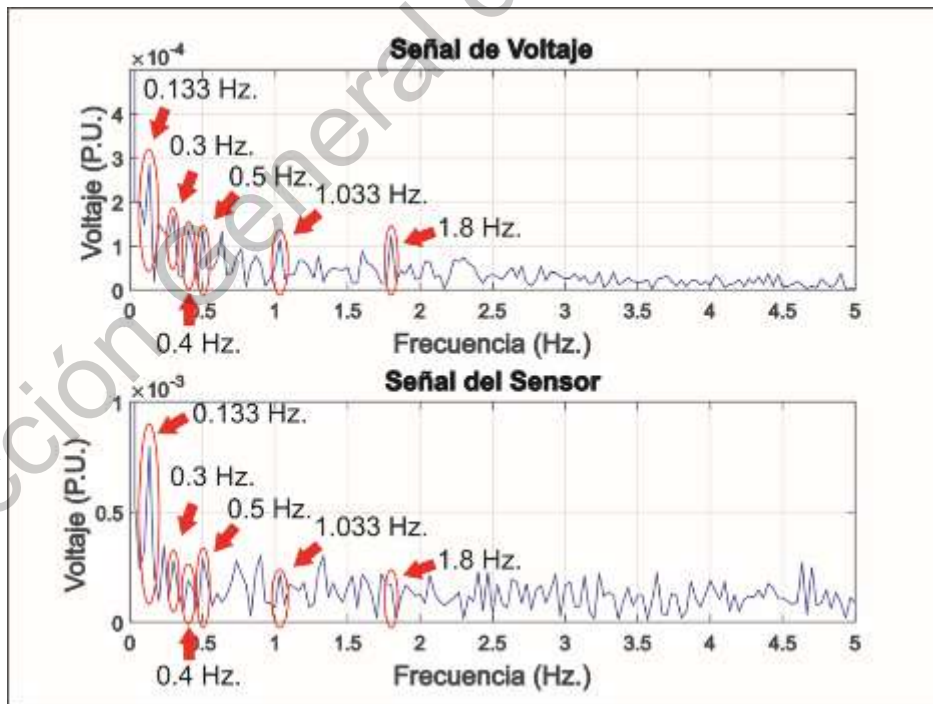


Figura 4.19 Espectro en frecuencia de las envolventes de la lámpara de 43W en el caso 1.

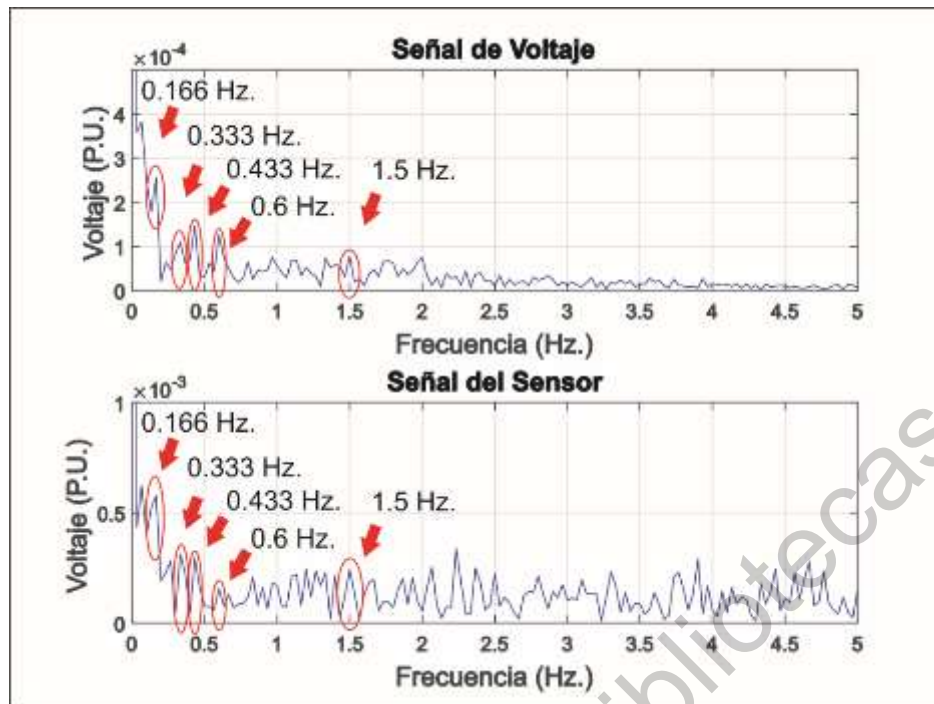


Figura 4.20 Espectro en frecuencia de las envolventes de la lámpara de 72W en el caso 1.

4.2.2 Caso 2: Casa-habitación

En esta sección se presentan los resultados del caso de estudio 2. Las figuras 4.21, 4.22 y 4.23 muestran las señales del sensor, y las figuras 4.24, 4.25 y 4.26 muestran las señales de voltaje adquiridas para cada una de las lámparas. Cada una de las figuras muestran uno de los archivos de 10 minutos que la tarjeta guardó durante la adquisición de las señales. A diferencia del caso número 1 donde no se puede apreciar cambios evidentes en la amplitud de la señal, las figuras del caso número 2 muestran claramente que las señales tienen cambios bruscos en la amplitud y más largos a lo largo de los 10 minutos de lectura, con lo que se puede inferir que la calidad de la energía de la red en casa es mala.

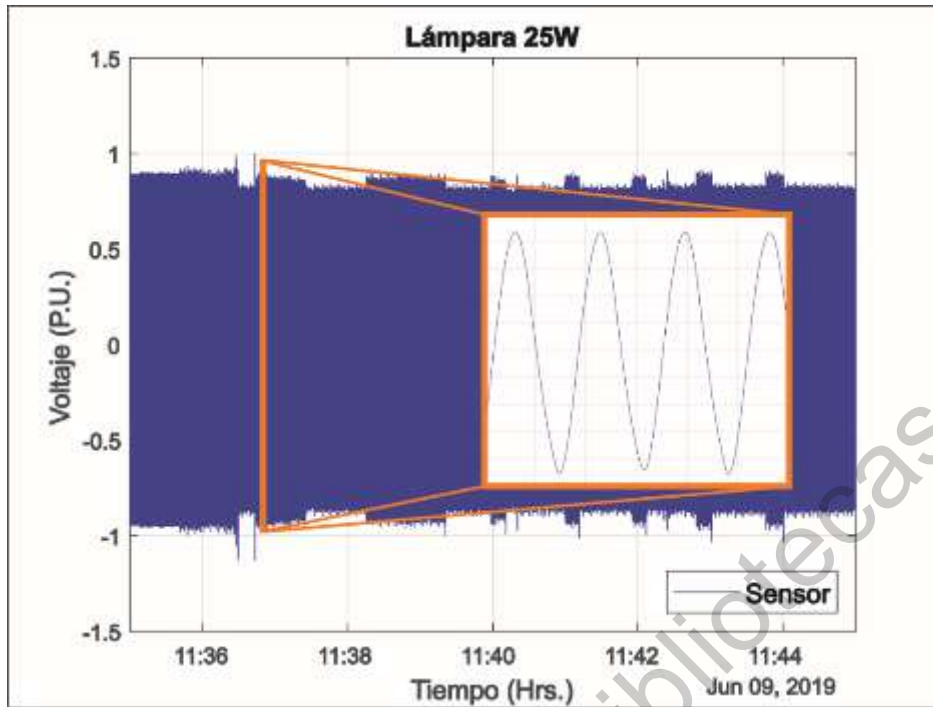


Figura 4.21 Señal del sensor normalizada de la lámpara de 25W en el caso 2.

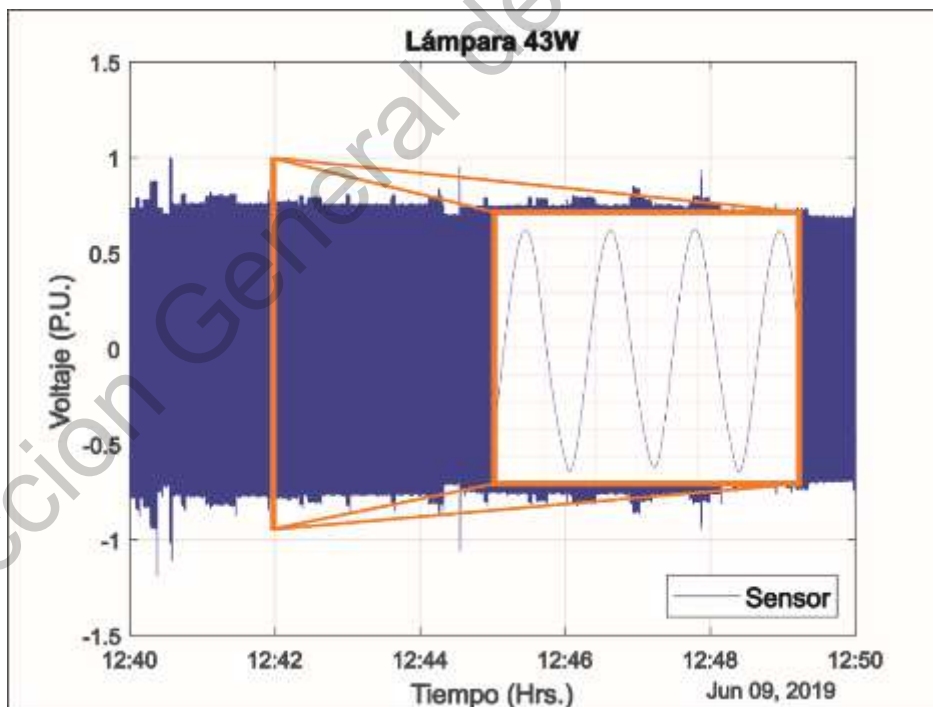


Figura 4.22 Señal del sensor normalizada de la lámpara de 43W en el caso 2.

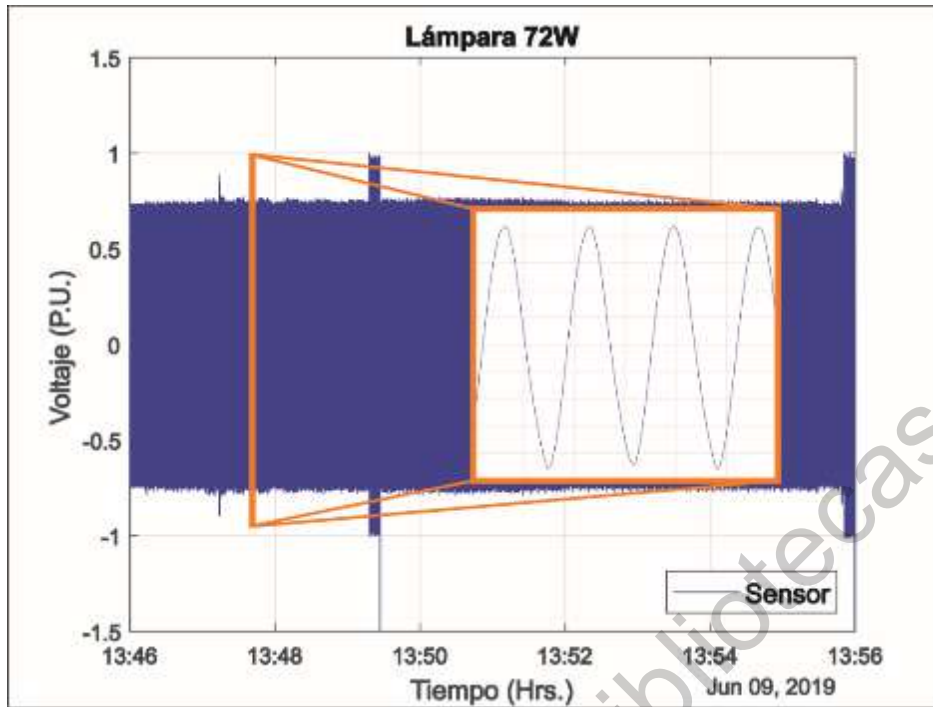


Figura 4.23 Señal del sensor normalizada de la lámpara de 72W en el caso 2.

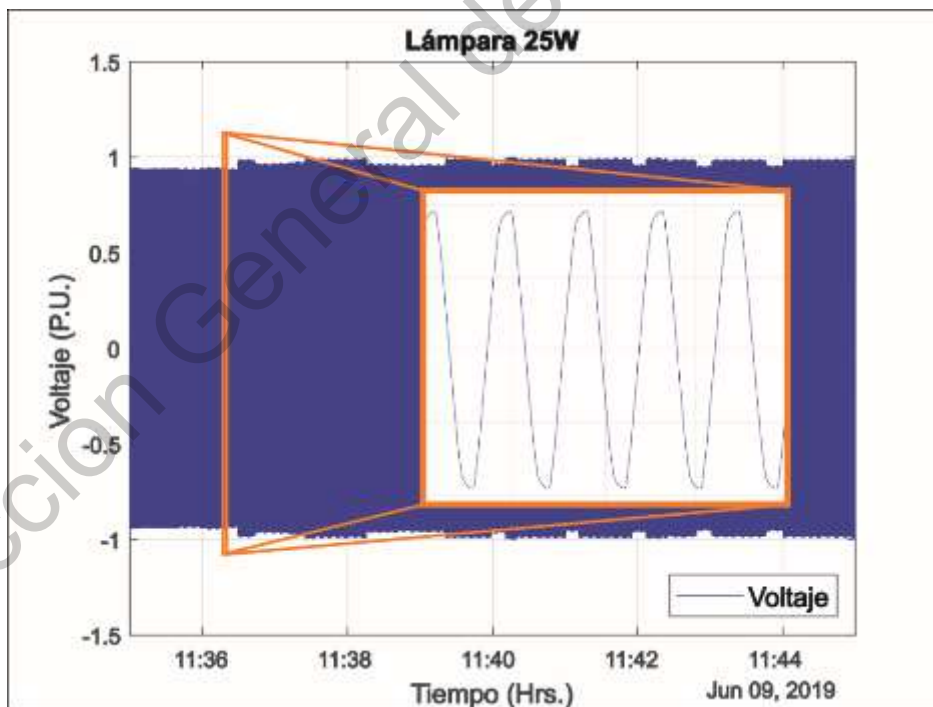


Figura 4.24 Señal de voltaje normalizada de la lámpara de 25W en el caso 2.

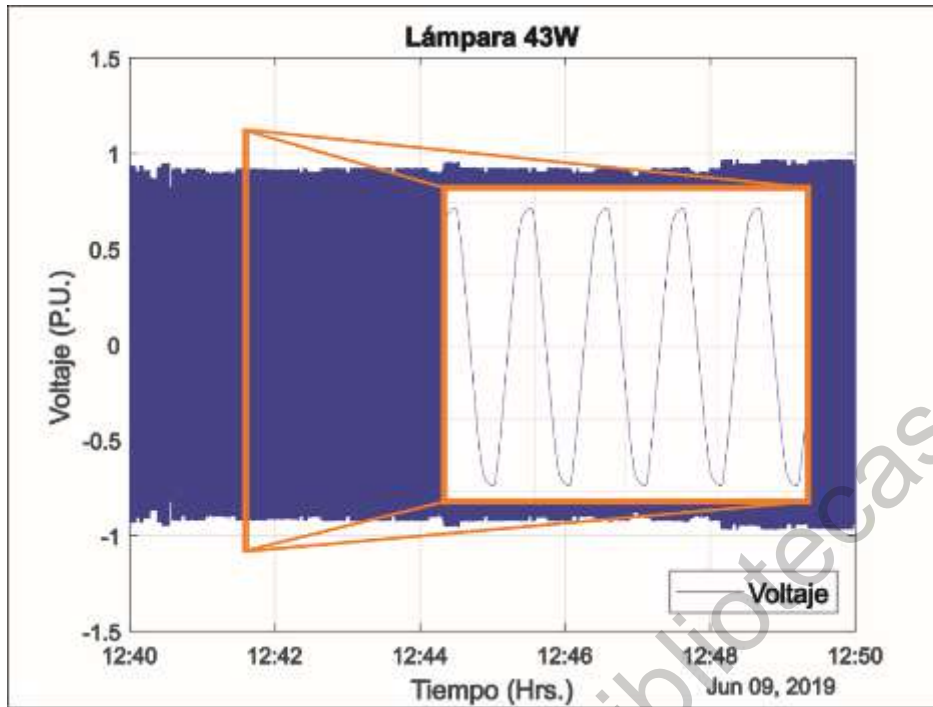


Figura 4.25 Señal de voltaje normalizada de la lámpara de 43W en el caso 2.

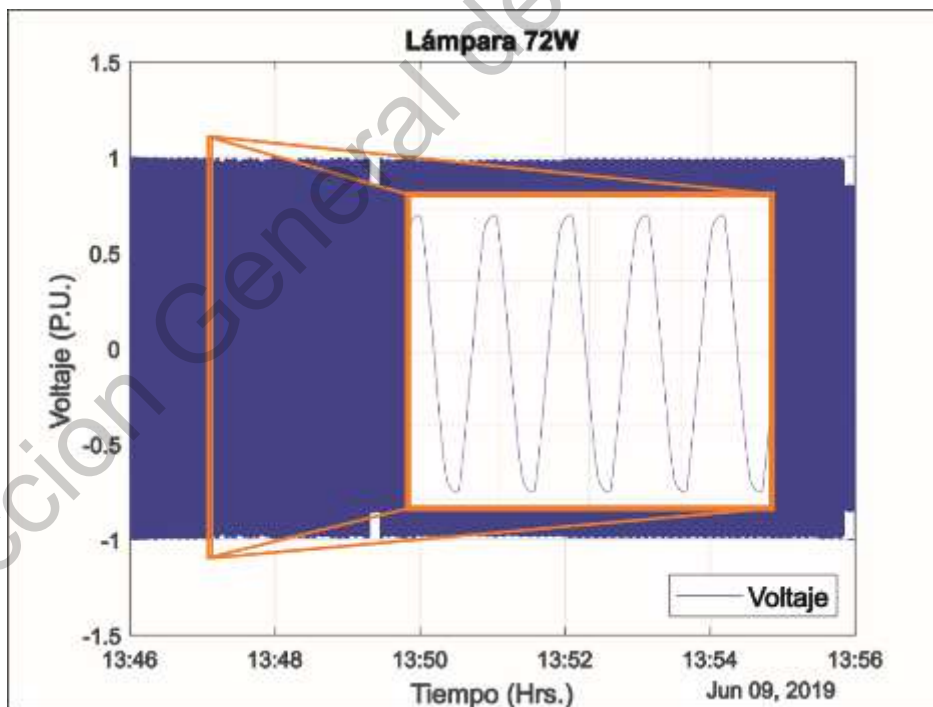


Figura 4.26 Señal de voltaje normalizada de la lámpara de 72W en el caso 2.

Como siguiente paso se tiene el cálculo de las envolventes. Las figuras 4.27, 4.28 y 4.29 muestran el comportamiento de las envolventes junto con las señales de iluminación obtenida con el sensor, y las figuras 4.30, 4.31 y 4.32 muestran las envolventes junto con la señal de voltaje de alimentación, para cada una de las lámparas. En este caso se puede apreciar de una forma más clara que en el caso 1 cambios más evidentes en la amplitud de las señales debido a el uso de algunos electrodomésticos conectados a la red en casa. La figura 4.27 correspondiente a la lámpara de 25W muestra pequeños incrementos en la amplitud de la señal del sensor y la figura 4.30 correspondiente a la misma lámpara muestra pequeñas caídas en la amplitud de la señal de voltaje. En cambio, en las figuras correspondientes a las lámparas de 43W y 72W se muestran incrementos más bruscos en amplitud de la señal del sensor, así como caídas más pronunciadas en la amplitud de señal de voltaje. Además, en zonas donde la amplitud del voltaje es cercana a la unidad en su valor máximo, la amplitud de la señal del sensor de la lámpara de 25W es más grande que las amplitudes de las señales del sensor de las lámparas de 43W y 72W. Ya que la lámpara de 25W ilumina menos que las otras dos lámparas, se puede inferir que la amplitud de la señal del sensor depende de la potencia de la lámpara y mientras más pequeña sea la potencia de la lámpara, más grande es la amplitud de la señal del sensor. Por otro lado, el cálculo de la envolvente en este caso de estudio es bueno, cubre perfectamente los cambios en la amplitud de las señales sin ningún problema.

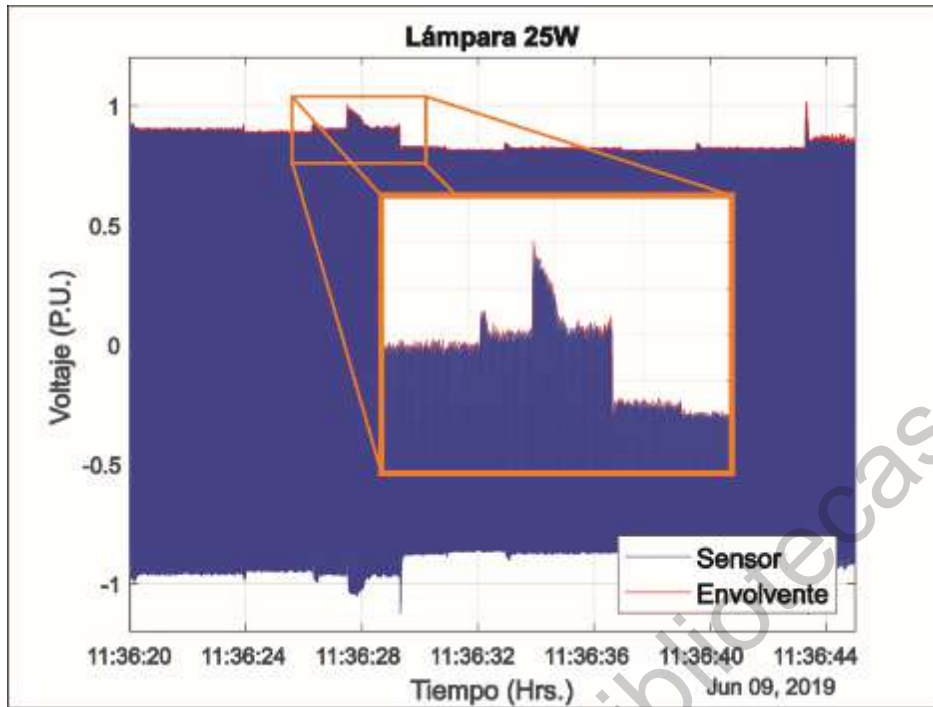


Figura 4.27 Señal del sensor con su envolvente calculada de la lámpara de 25W en el caso 2.

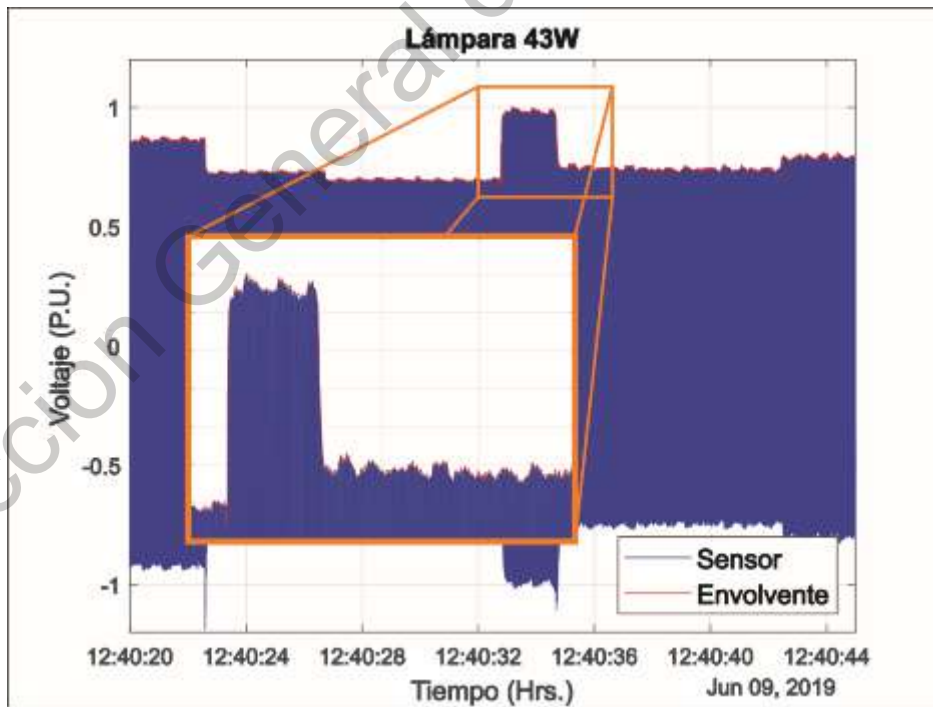


Figura 4.28 Señal del sensor con su envolvente calculada de la lámpara de 43W en el caso 2.

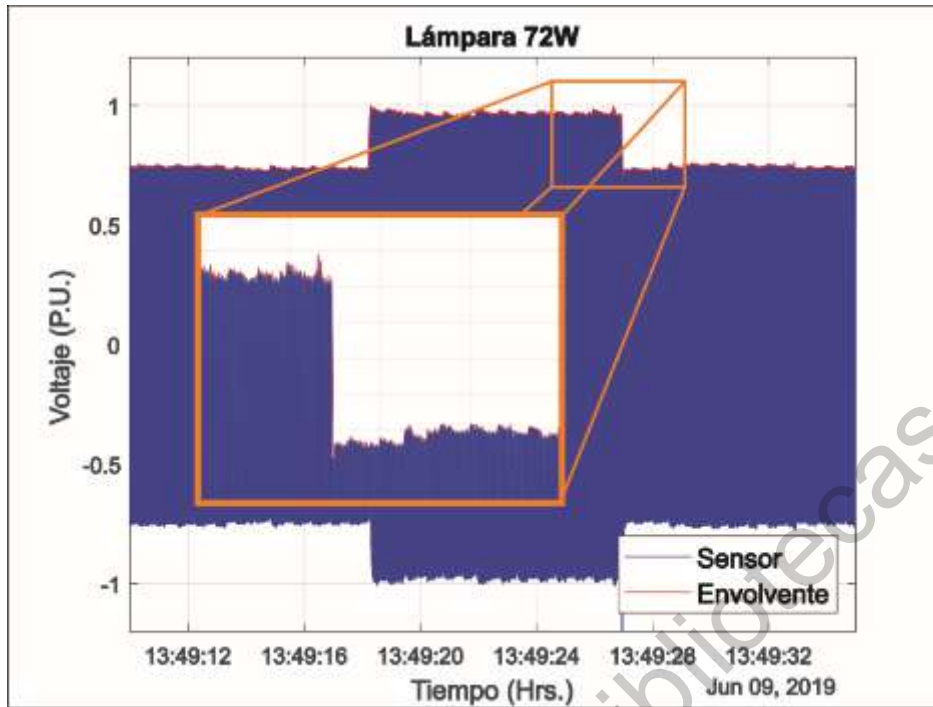


Figura 4.29 Señal del sensor con su envolvente calculada de la lámpara de 72W en el caso 2.

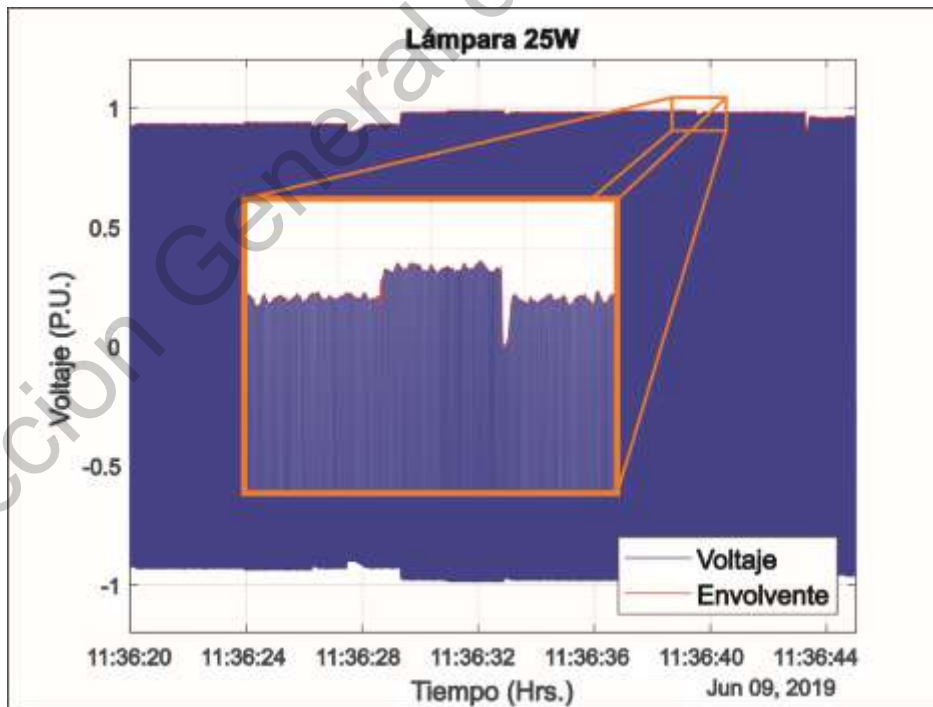


Figura 4.30 Señal de voltaje con su envolvente calculada de la lámpara de 25W en el caso 2.

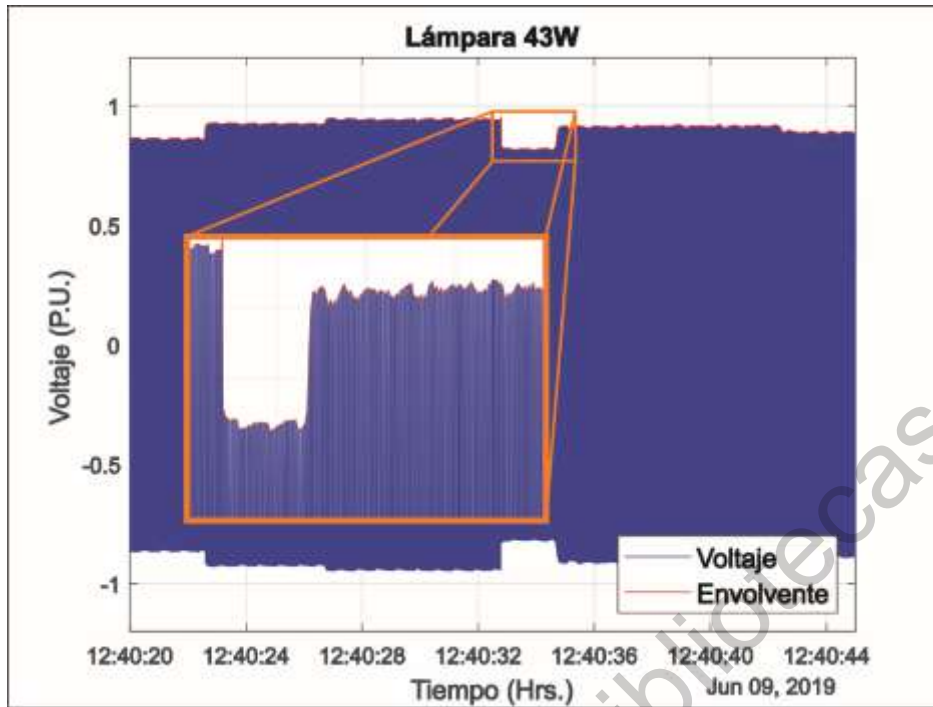


Figura 4.31 Señal de voltaje con su envolvente calculada de la lámpara de 43W en el caso 2.

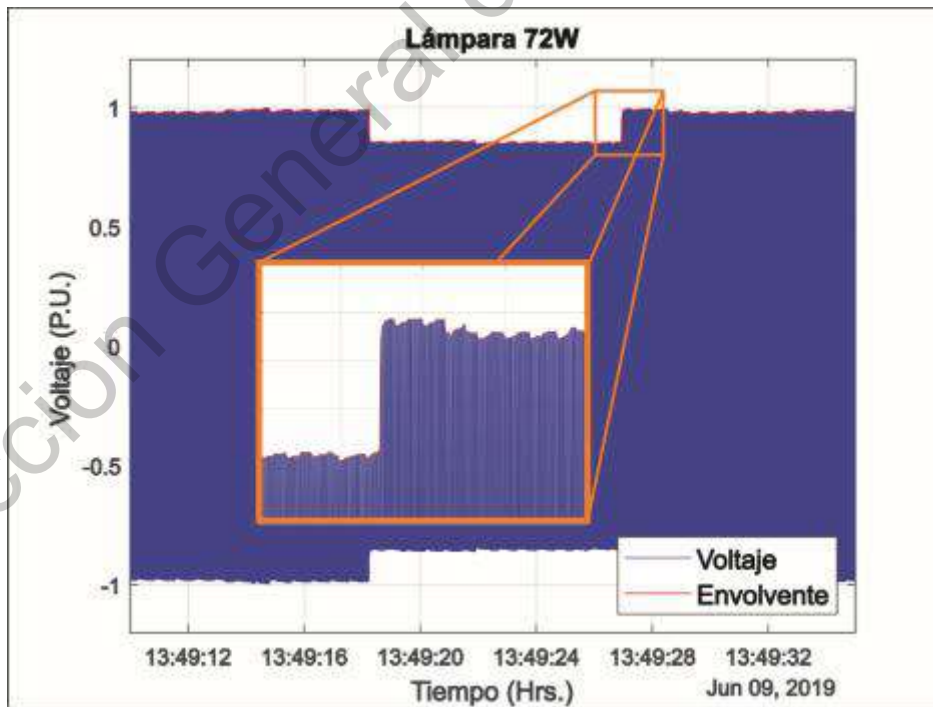


Figura 4.32 Señal de voltaje con su envolvente calculada de la lámpara de 72W en el caso 2.

Como siguiente paso, las figuras 4.33, 4.34 y 4.35 muestran una comparación entre las envolventes de la señal del sensor y la señal de voltaje, para cada una de las respectivas lámparas. En las figuras se observa que las envolventes tienen un comportamiento similar al encontrado en las envolventes del caso 1: si la envolvente de la señal del voltaje de alimentación disminuye, se ve reflejado con un aumento en la envolvente de la señal del sensor, y viceversa. Se aprecia claramente en las figuras que la envolvente de la señal del sensor de la lámpara de 25W tiene valores más grandes que las envolventes del sensor de las lámparas de 43W y 72W respectivamente, en zonas donde la envolvente del sensor toma valores cercanos a la unidad en su valor máximo. Este comportamiento fue previsto anteriormente y no se pudo observarse claramente en el caso 1. Por lo tanto, con esto se corrobora que la amplitud de la señal del sensor depende de la potencia de la lámpara.

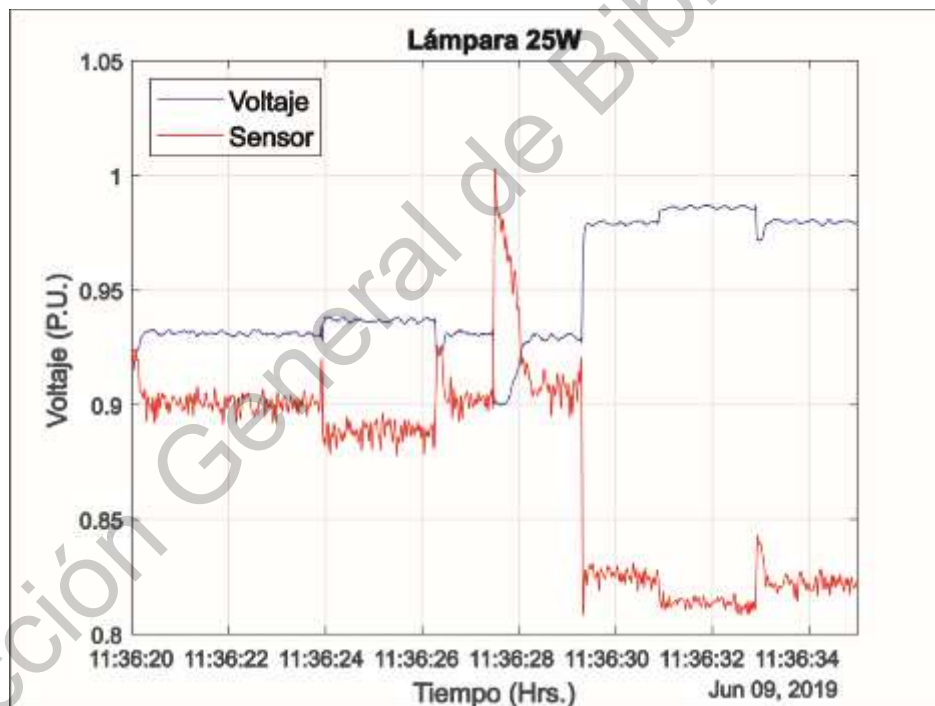


Figura 4.33 Envolventes de las señales de la lámpara de 25W en el caso 2.

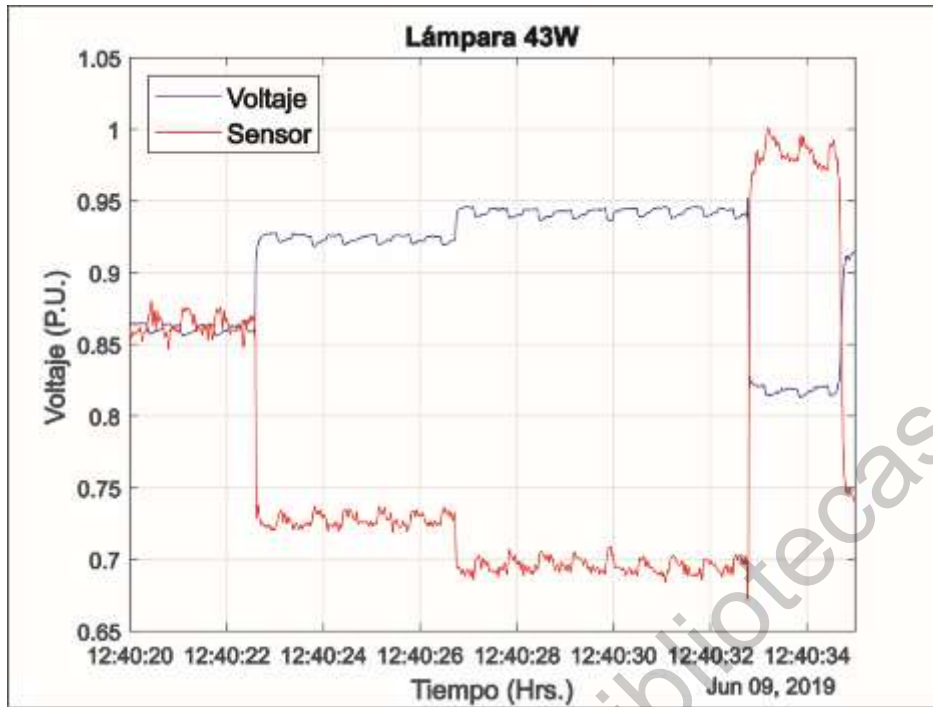


Figura 4.34 Envoltentes de las señales de la lámpara de 43W en el caso 2.

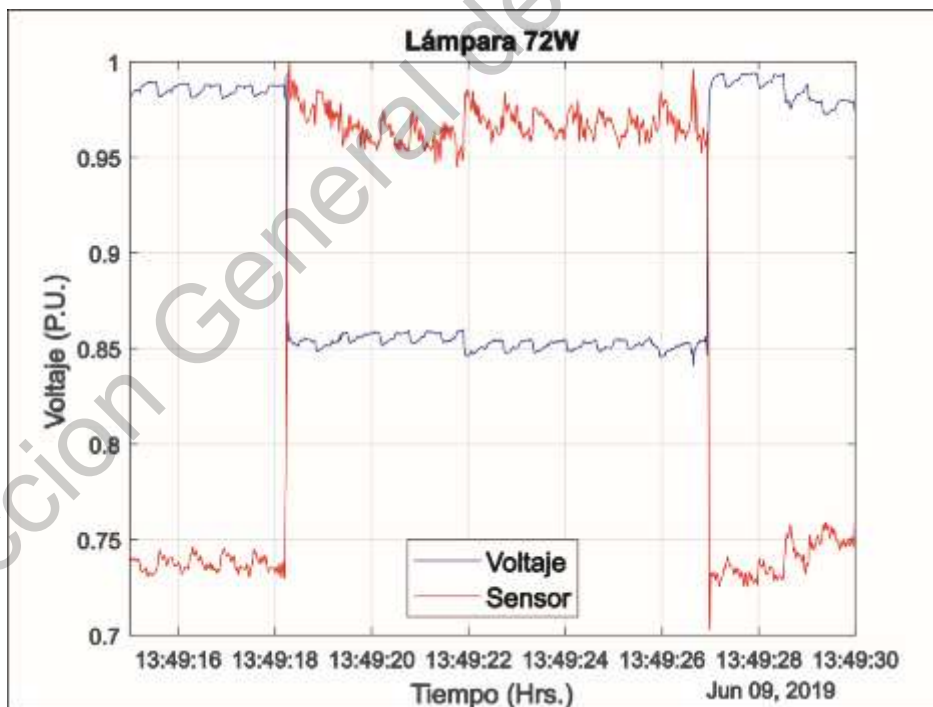


Figura 4.35 Envoltentes de las señales de la lámpara de 72W en el caso 2.

Finalmente, las figuras 4.36, 4.37 y 4.38 muestran los espectros en frecuencias de las envolventes de las señales, para cada una de las lámparas bajo estudio. Se realiza el análisis por una ventana de 30 segundos en cada una de las envolventes. Al igual que en el caso 1, la figura 4.36 muestra que algunas componentes de frecuencia en la envolvente de la señal de voltaje se ven reflejadas en la envolvente de la señal del sensor, con una amplitud mayor en la envolvente del sensor. Casos similares se muestran en los espectros de las otras lámparas en las figuras 4.37 y 4.38, solo que, con diferentes valores de frecuencia, lo que sigue indicando que las componentes de las frecuencias van cambiando a lo largo del tiempo. Sin embargo, a pesar de que el valor de la amplitud de las componentes frecuenciales en ambos casos es pequeño, en el caso 2 las amplitudes fueron más grandes en comparación con las amplitudes de las componentes obtenidas en el caso 1. Estos valores fueron generados por el uso de los distintos equipos de uso doméstico conectados en casa, por lo tanto, pueden ser considerados como una fuente de *flicker* ya que son capaces de ocasionar este fenómeno.

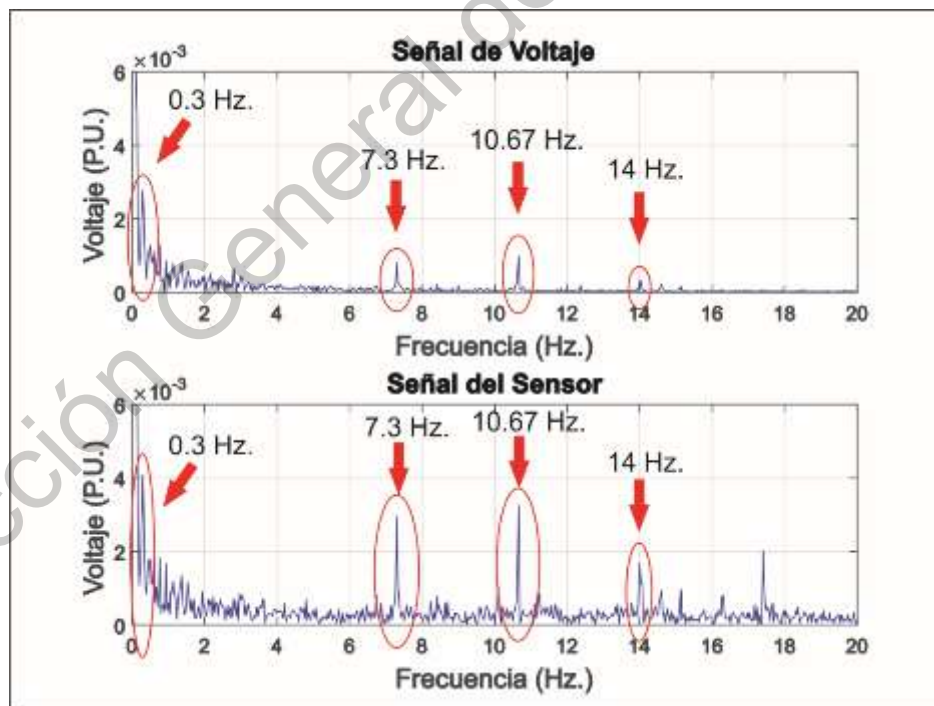


Figura 4.36 Espectro en frecuencia de las envolventes de la lámpara de 25W en el caso 2.

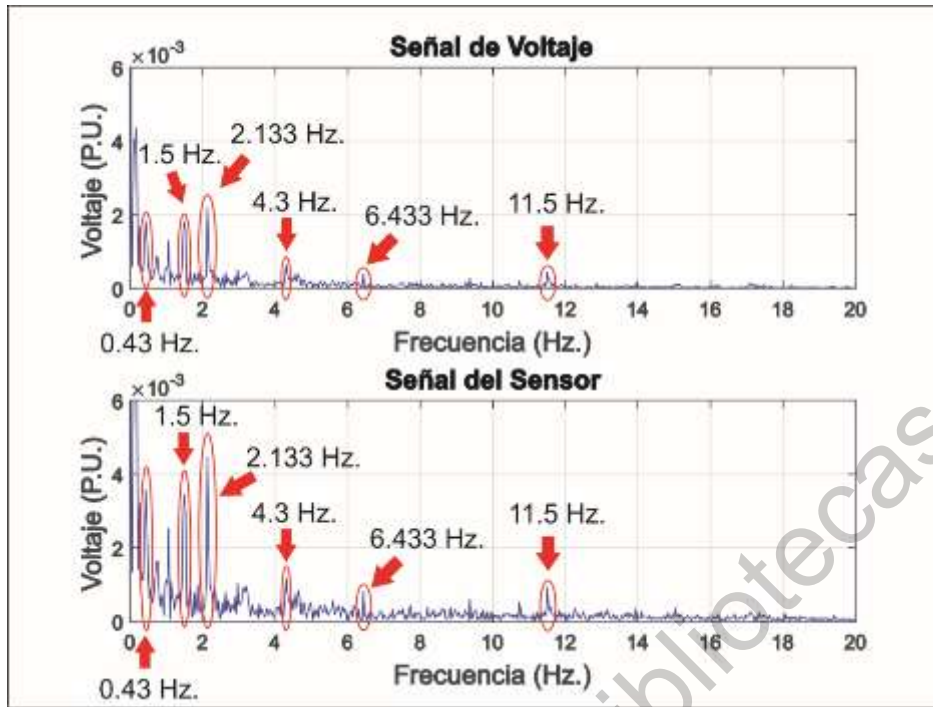


Figura 4.37 Espectro en frecuencia de las envolventes de la lámpara de 43W en el caso 2.

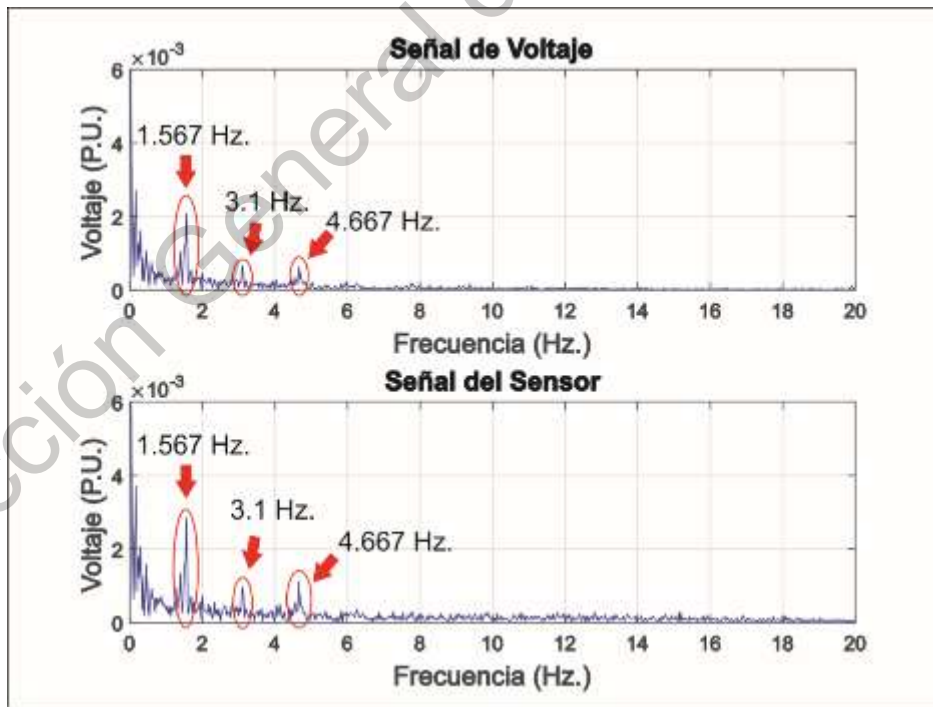


Figura 4.38 Espectro en frecuencia de las envolventes de la lámpara de 72W en el caso 2.

4.2.3 Caso 3: Panel Fotovoltaico y un inversor

A continuación, se presentan los resultados del caso de estudio 3. Las figuras 4.39, 4.40 y 4.41 muestran uno de los archivos de 10 minutos de las mediciones realizadas de las señales de iluminación y, las figuras 4.42, 4.43 y 4.44 muestran las señales de voltaje de alimentación de cada lámpara, respectivamente. Se muestra claramente en las figuras que la señal de voltaje tiene una forma de onda diferente a la onda de la red eléctrica, debido a el uso de un inversor de onda modificada. De la misma forma, se muestra una forma de onda distinta en la señal obtenida con el sensor.

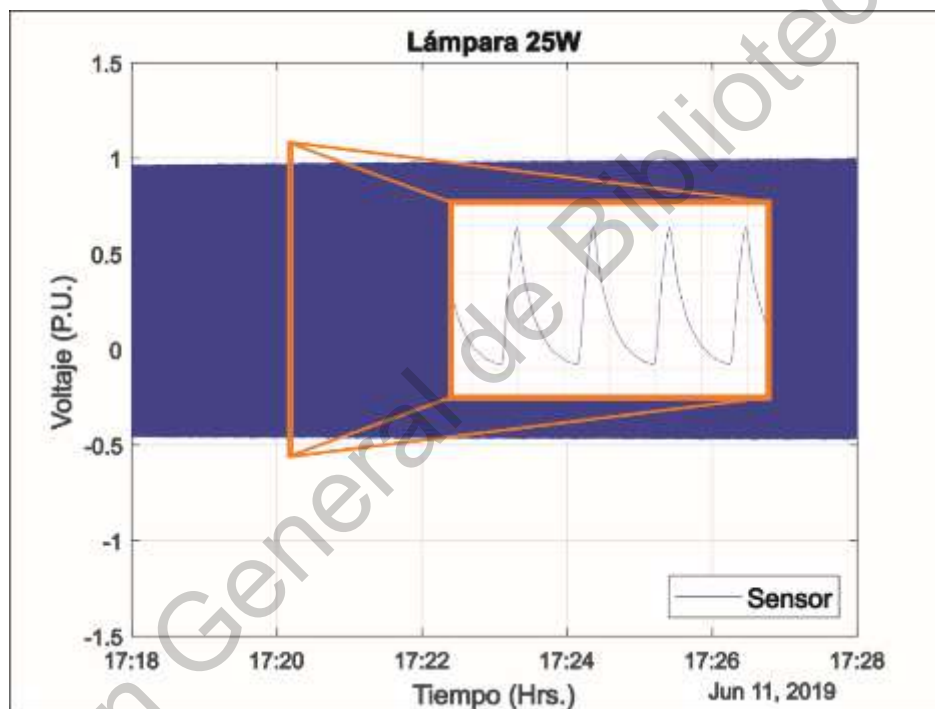


Figura 4.39 Señal del sensor normalizada de la lámpara de 25W en el caso 3.

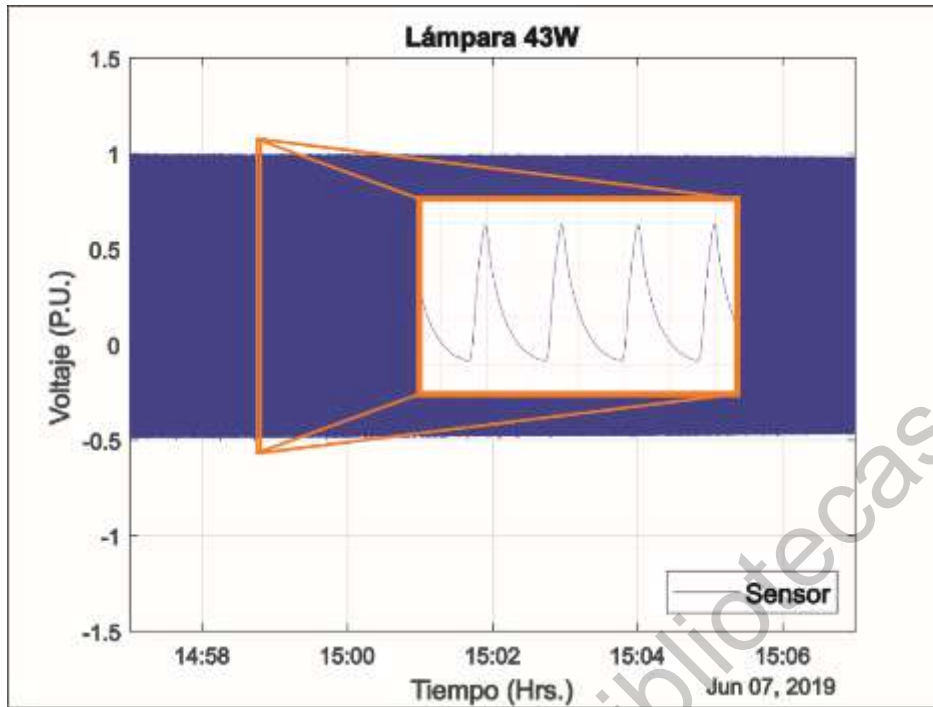


Figura 4.40 Señal del sensor normalizada de la lámpara de 43W en el caso 3.

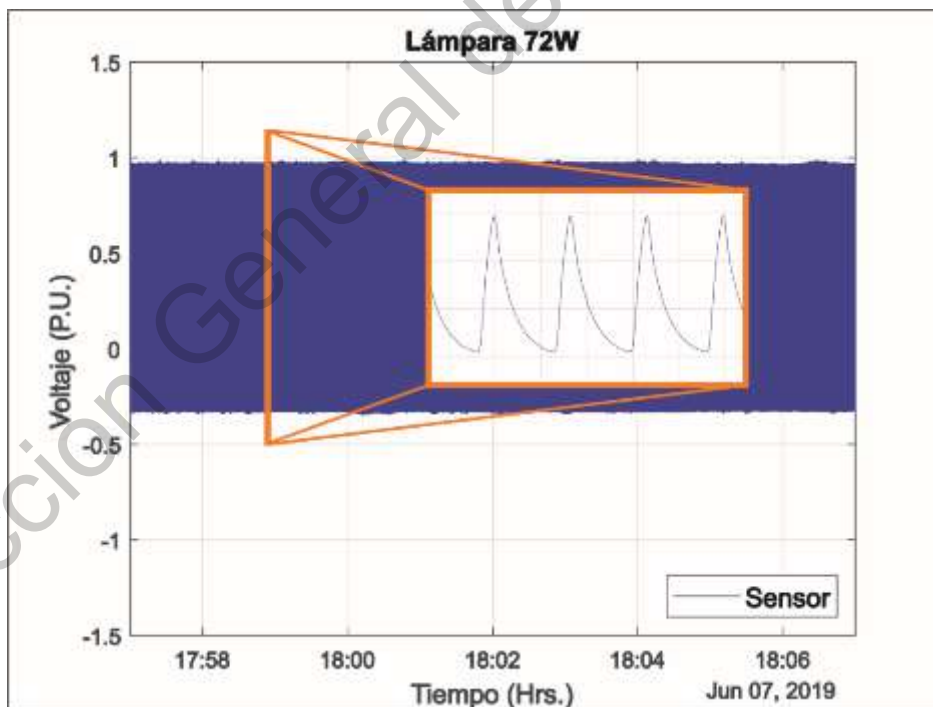


Figura 4.41 Señal del sensor normalizada de la lámpara de 72W en el caso 3.

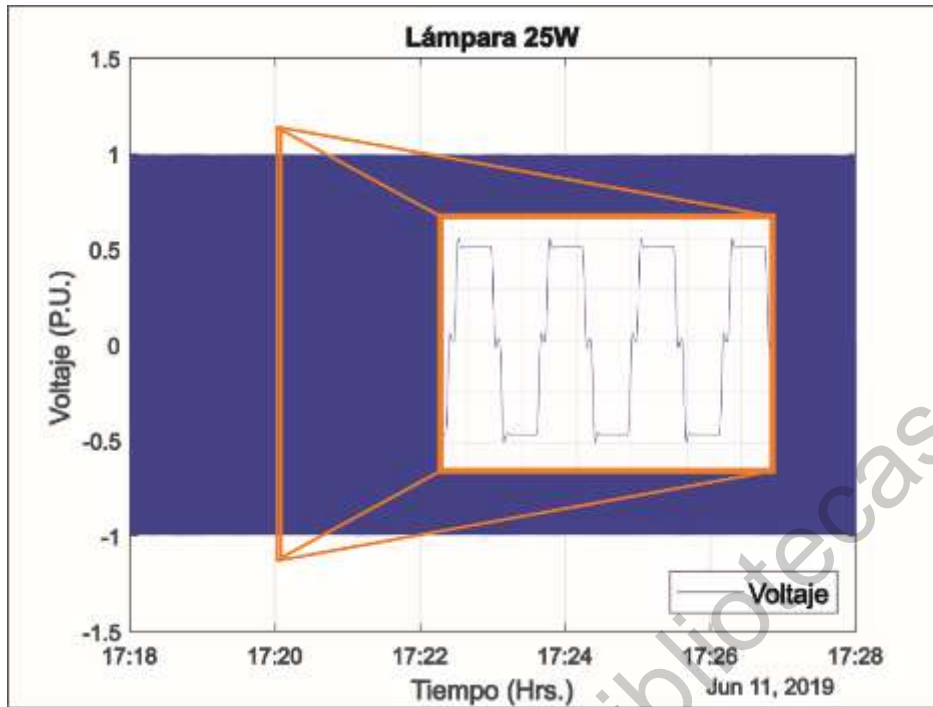


Figura 4.42 Señal de voltaje normalizada de la lámpara de 25W en el caso 3.

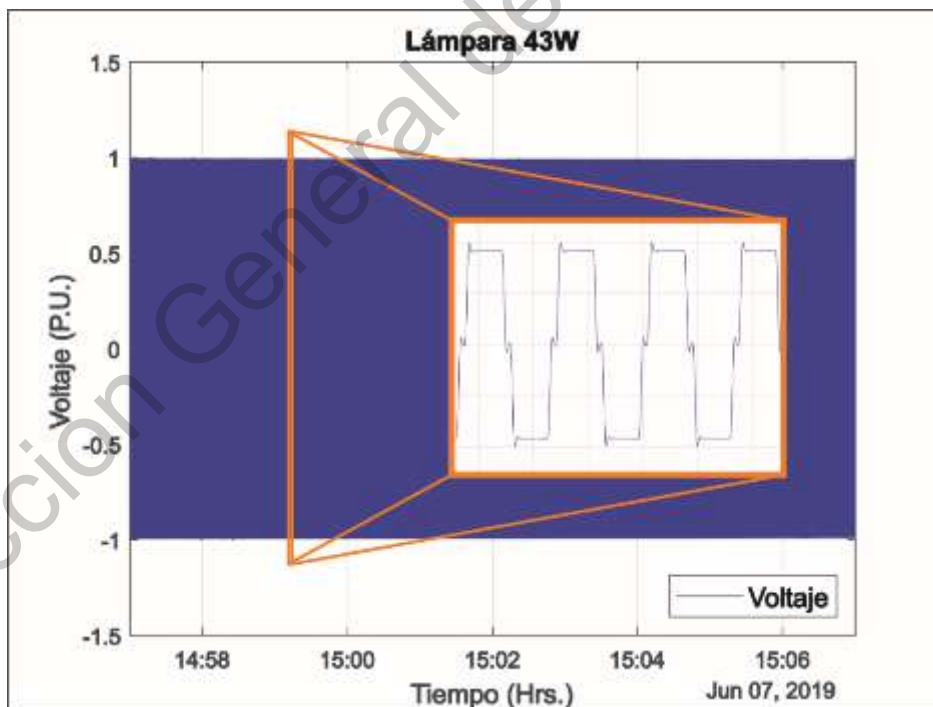


Figura 4.43 Señal de voltaje normalizada de la lámpara de 43W en el caso 3.

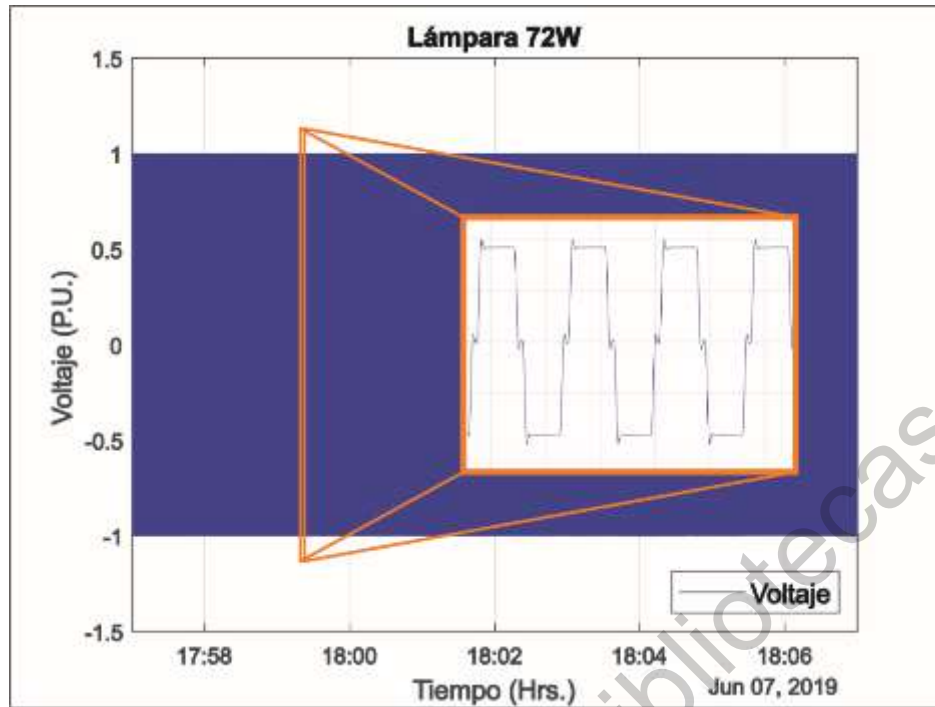


Figura 4.44 Señal de voltaje normalizada de la lámpara de 72W en el caso 3.

Como siguiente paso se tiene el cálculo de las envolventes. Las figuras 4.45, 4.46 y 4.47 muestran las envolventes calculadas junto con las señales de iluminación adquiridas con el sensor, y las figuras 4.48, 4.49 y 4.50 muestran las envolventes junto con las señales de voltaje de cada una de las lámparas. Sin embargo, en las señales de iluminación del sensor no se puede obtener una buena aproximación de la envolvente, debido a la naturaleza de las señales adquiridas ya que cuentan con algunos picos o pequeños aumentos en zonas donde tiene puntos o valores mínimos la señal, que son tomados en cuenta en el cálculo y que ocasionan que este no sea bueno. Caso contrario ocurre en las señales de voltaje, donde el cálculo de las envolventes es bueno.

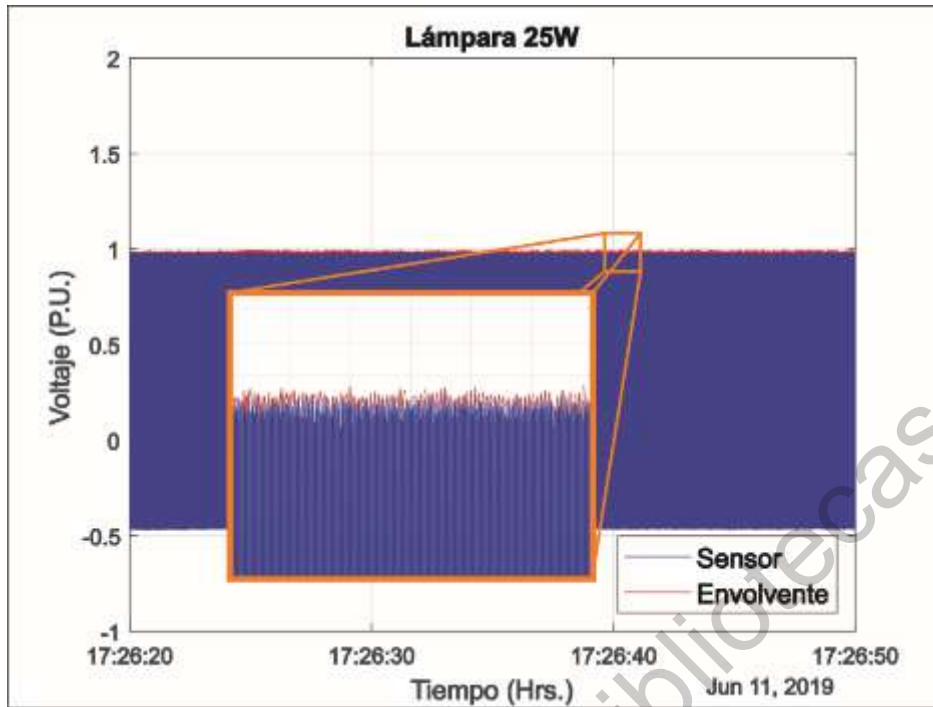


Figura 4.45 Señal del sensor con su envolvente calculada de la lámpara de 25W en el caso 3.

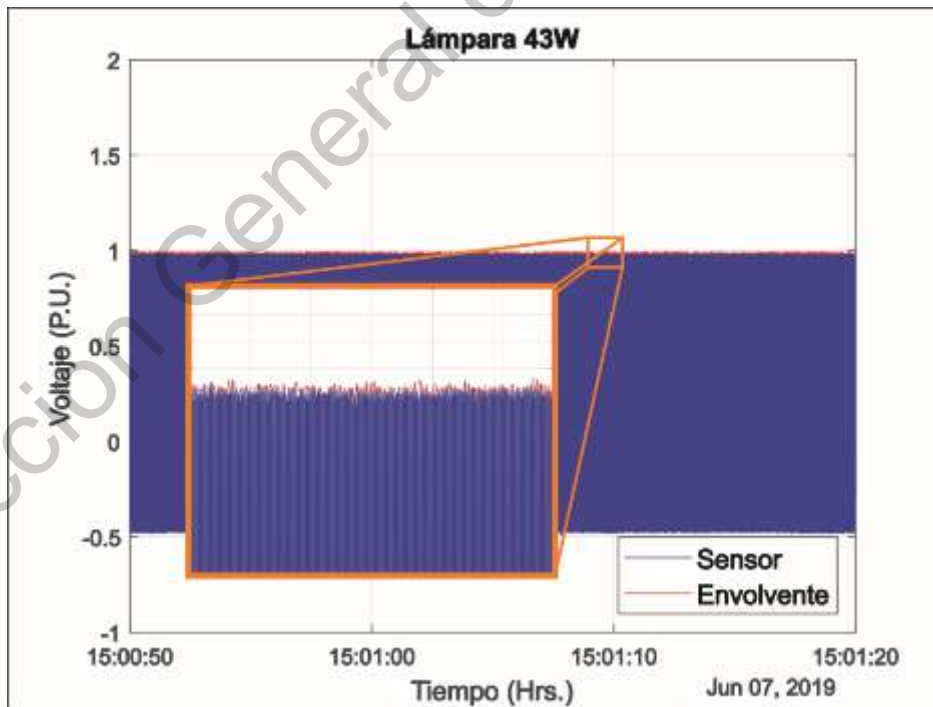


Figura 4.46 Señal del sensor con su envolvente calculada de la lámpara de 43W en el caso 3.

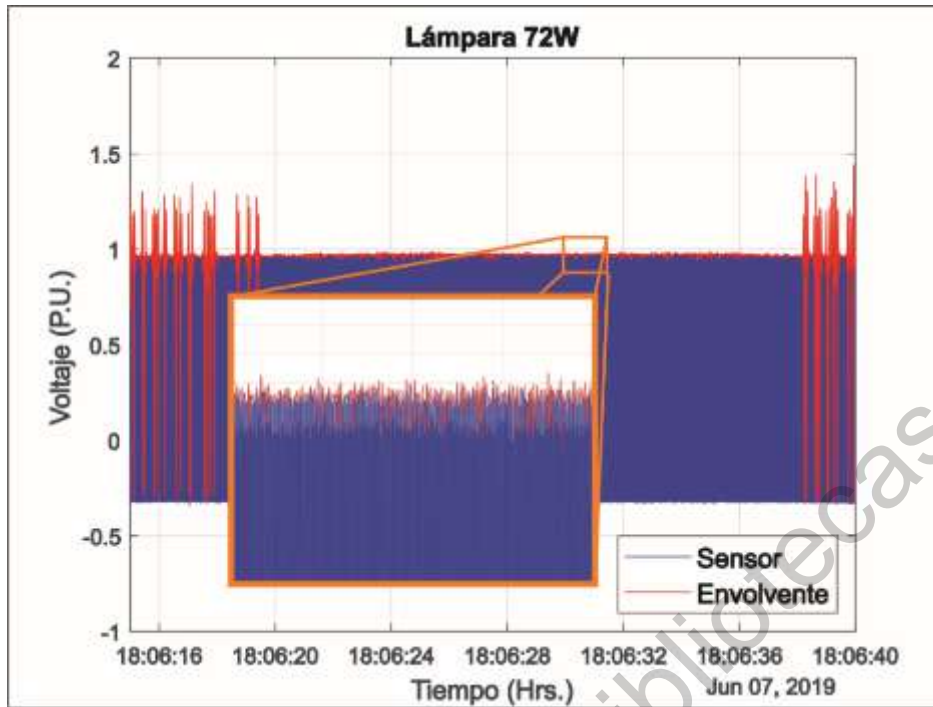


Figura 4.47 Señal del sensor con su envolvente calculada de la lámpara de 72W en el caso 3.

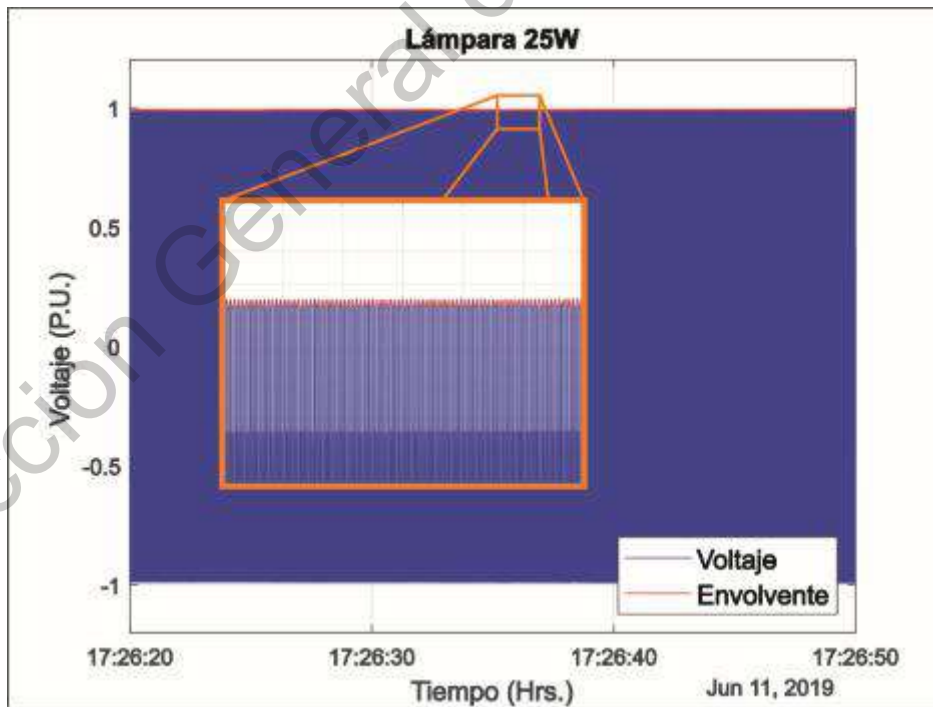


Figura 4.48 Señal de voltaje con su envolvente calculada de la lámpara de 25W en el caso 3.

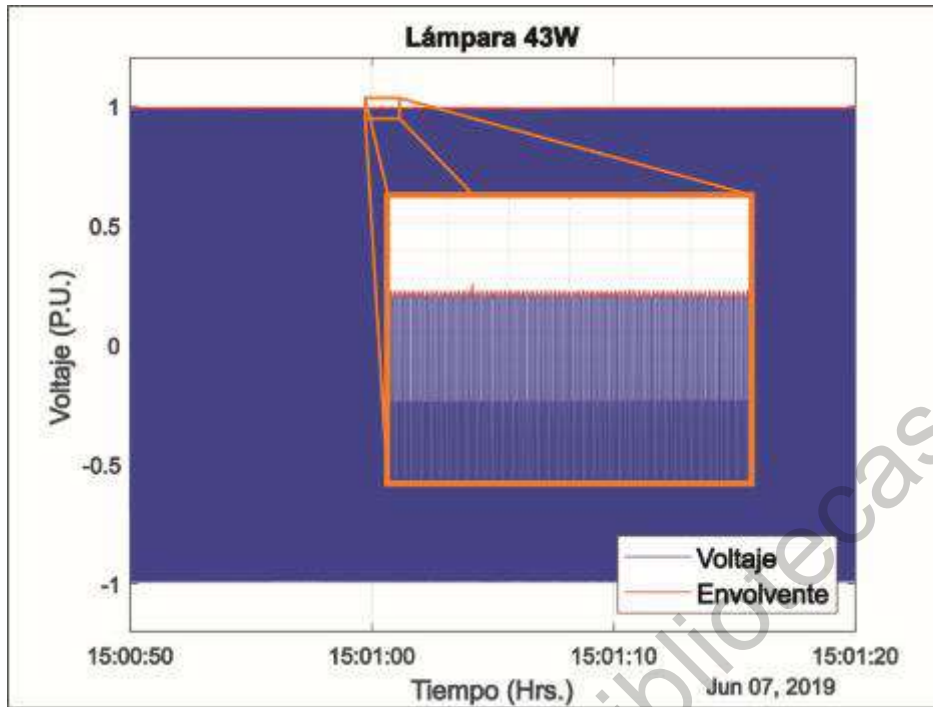


Figura 4.49 Señal de voltaje con su envolvente calculada de la lámpara de 43W en el caso 3.

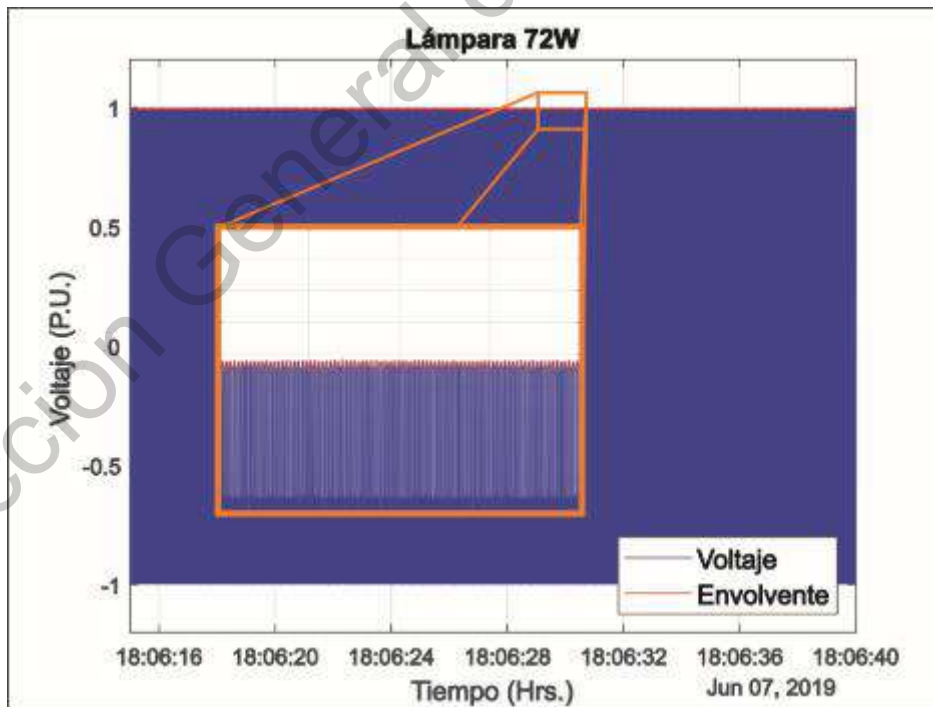


Figura 4.50 Señal de voltaje con su envolvente calculada de la lámpara de 72W en el caso 3.

Como siguiente paso, las figuras 4.51, 4.52 y 4.53 muestran una comparación entre el comportamiento de las envolventes de las señales para cada una de las lámparas. Sin embargo, la envolvente de la señal del sensor tiene algunas variaciones grandes ya que la señal del sensor original tiene algunos puntos o picos que son tomados en cuenta en el cálculo y que no permiten obtener una buena aproximación de su envolvente. Debido a esto, no se puede ver de manera clara el comportamiento que se obtiene en los casos 1 y 2. También se puede apreciar que estas variaciones en las envolventes aparecen de una manera más frecuente en la lámpara de 72W que en las otras 2 lámparas restantes.

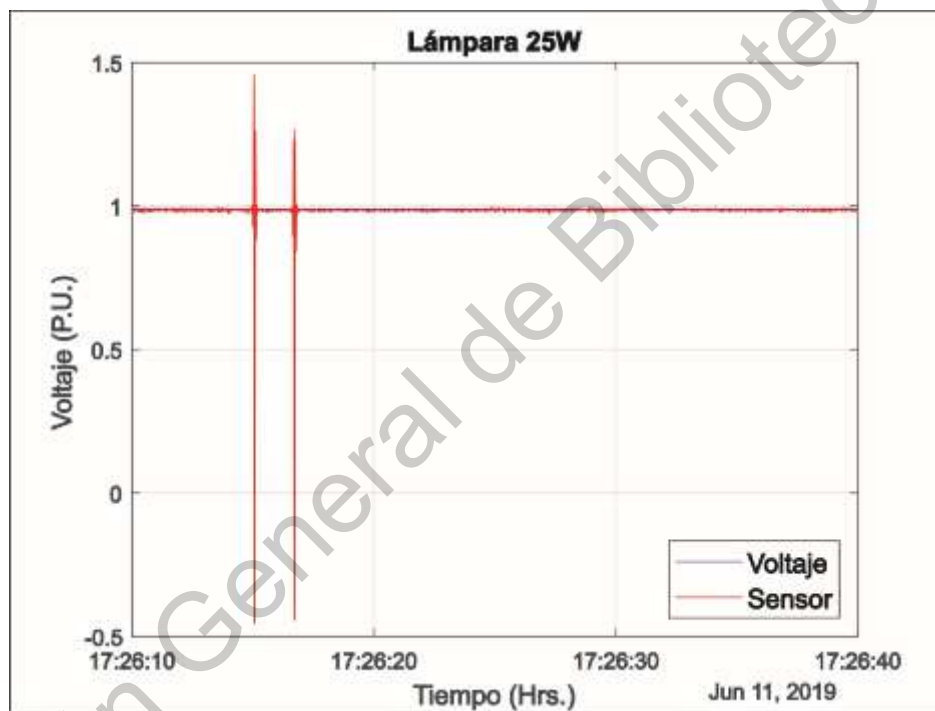


Figura 4.51 Envolventes de las señales de la lámpara de 25W en el caso 3.

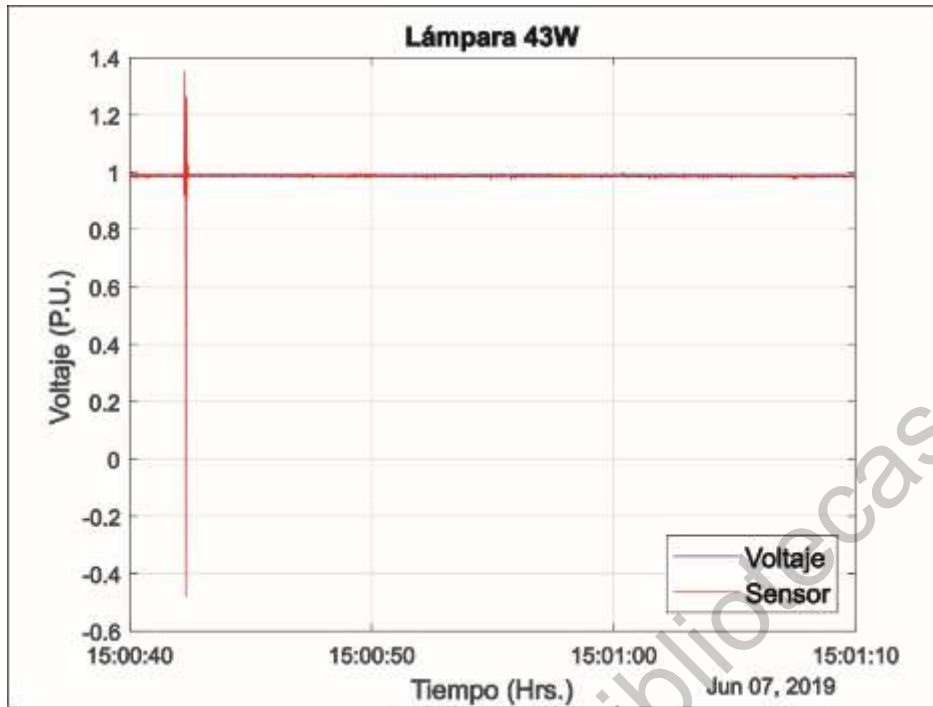


Figura 4.52 Envoltentes de las señales de la lámpara de 43W en el caso 3.

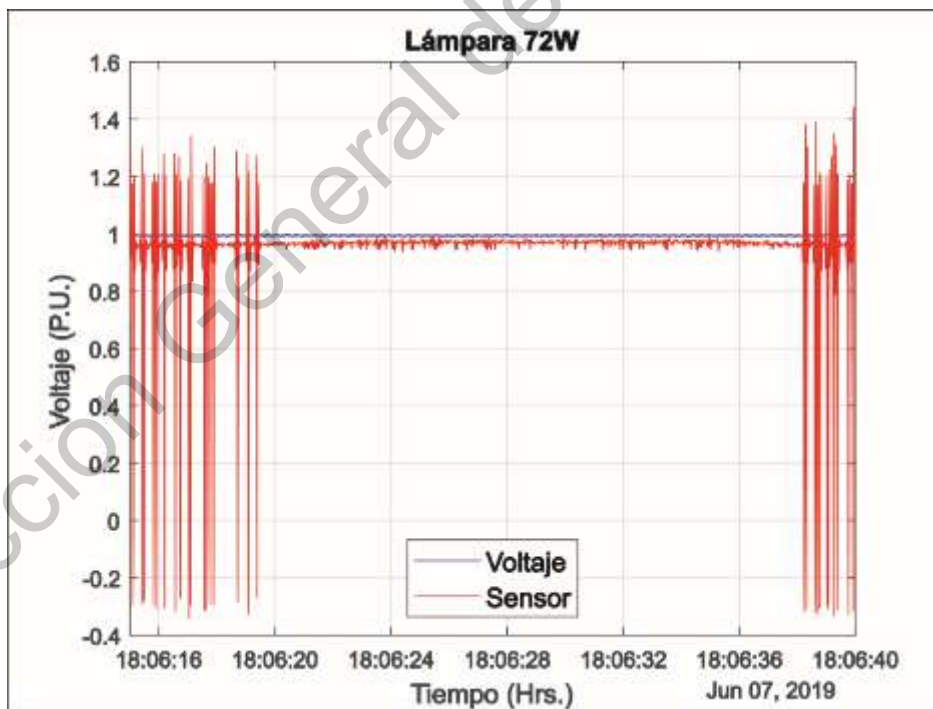


Figura 4.53 Envoltentes de las señales de la lámpara de 72W en el caso 3.

Finalmente, las figuras 4.54, 4.55 y 4.56 muestran los espectros en frecuencias de las envolventes de las señales para cada una de las lámparas. Se realiza el análisis por una ventana de 30 segundos en cada una de las envolventes. Cabe mencionar que, en los espectros de las figuras 4.55 y 4.56 no se puede observar, a simple vista, si algunas componentes de frecuencia de la señal de alimentación se ven reflejadas en la señal del sensor, debido a que no es bueno el cálculo de la envolvente de la señal del sensor, principalmente en la lámpara de 72W. Pero si se hace un pequeño acercamiento, se encuentra que si existen componentes de frecuencia de la envolvente de la señal de voltaje reflejadas en la envolvente de la señal del sensor. En la figura 4.54 se puede ver de manera más clara que si existen componentes de frecuencia reflejadas.

De estas figuras se puede concluir que la transformada de Fourier no ayuda, a simple vista, a conocer el valor de las frecuencias de *flicker*. Sin embargo, el espectro de Fourier indica que existe *flicker* en las señales.

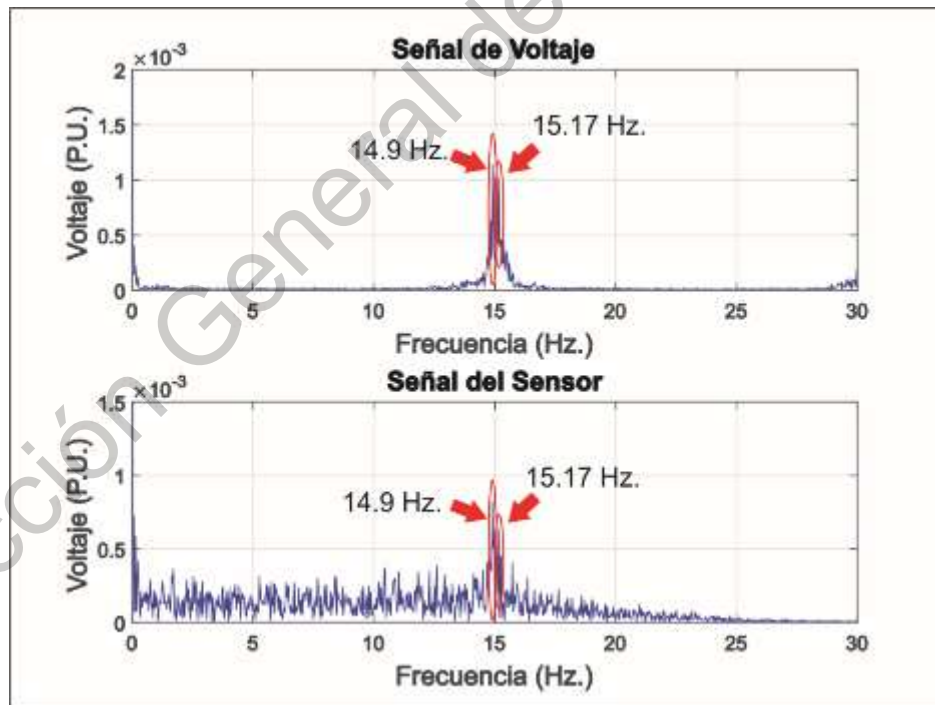


Figura 4.54 Espectro en frecuencia de las envolventes de la lámpara de 25W en el caso 3.

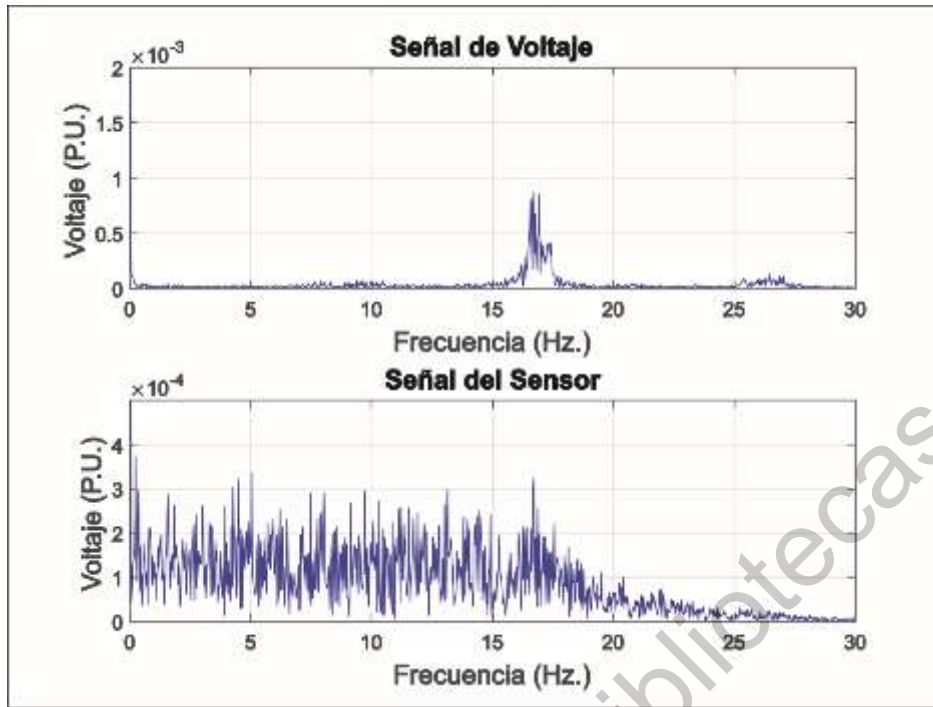


Figura 4.55 Espectro en frecuencia de las envolventes de la lámpara de 43W en el caso 3.

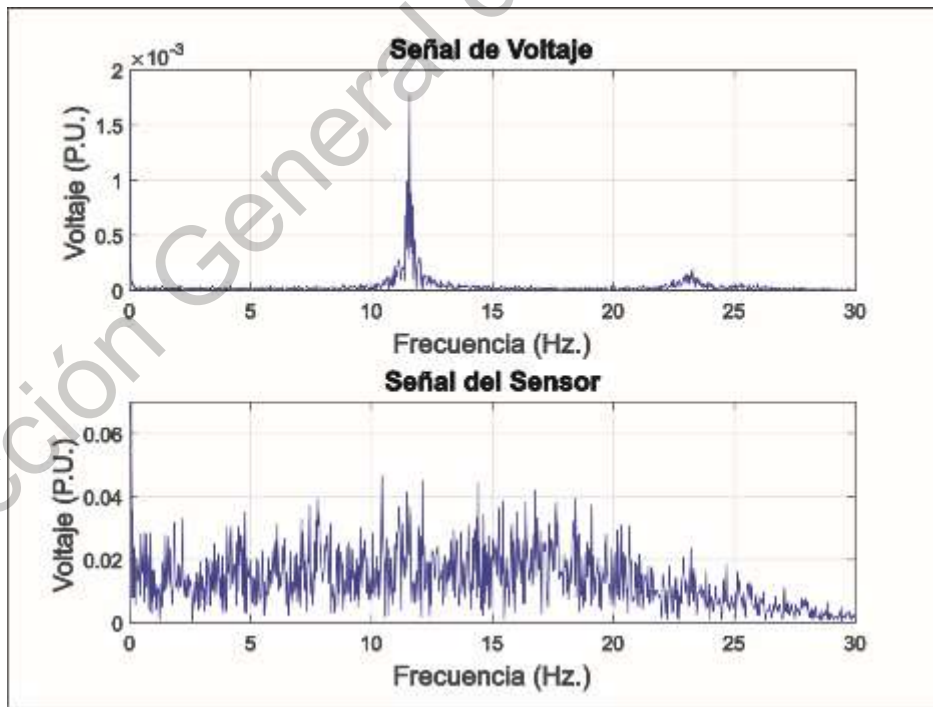


Figura 4.56 Espectro en frecuencia de las envolventes de la lámpara de 72W en el caso 3.

4.3 Correlación

A continuación, se presentan los resultados del coeficiente de correlación para los diferentes casos de estudio. Para realizar el cálculo del coeficiente de correlación, se utiliza la envolvente calculada de la señal de voltaje y la envolvente calculada de la señal del sensor.

Caso 1: Espacio de maquinado

- Para la lámpara de 25W, se tiene un coeficiente de correlación de -81.78%.
- Para la lámpara de 43W, se tiene un coeficiente de correlación de -76.42%.
- Para la lámpara de 72W, se tiene un coeficiente de correlación de -54.45%.

Caso 2: Casa-habitación

- Para la lámpara de 25W, se tiene un coeficiente de correlación de -99.05%.
- Para la lámpara de 43W, se tiene un coeficiente de correlación de -98.41%.
- Para la lámpara de 72W, se tiene un coeficiente de correlación de -99.57%.

Caso 3: Panel Fotovoltaico y un inversor.

- Para la lámpara de 25W, se tiene un coeficiente de correlación de -4.47%.
- Para la lámpara de 43W, se tiene un coeficiente de correlación de 3.24%.
- Para la lámpara de 72W, se tiene un coeficiente de correlación de -1.63%.

El signo negativo indica que la relación entre las envolventes es inversa, comportamiento que se analiza y se nota claramente en figuras de la sección 4.2, donde se comparan las envolventes. Los valores del coeficiente de correlación son altos o cercanos al 100% para el caso de estudio 2, lo que indica que hay una alta relación entre las envolventes. Resultados similares o cercanos se observan en el caso de estudio número 1. Sin embargo, los valores obtenidos del coeficiente de correlación del caso de estudio número 3 son bajos debido a que se utiliza un inversor de onda modificada el cual introduce alteraciones en la forma de onda de la señal de voltaje que hacen que el comportamiento de la carga sea diferente al de los casos 1 y 2.

CAPÍTULO 5

CONCLUSIONES

En este trabajo de tesis, se presenta una metodología basada en el estudio y monitoreo de señales de alimentación y de iluminación de lámparas incandescentes, para evaluar y estudiar como la calidad de la energía puede afectar la existencia de *flicker*.

Adicionalmente, se obtiene un prototipo para la medición de iluminación de las lámparas bajo estudio en esta investigación, el cual está basado en un sensor fotorresistivo. El sistema propuesto funciona de manera eficiente ya que entrega una señal de voltaje con valores dentro del rango de medición de la tarjeta PQ-UAQ para cualquier lámpara incandescente. Además, al realizar la medición de señales de voltaje, corriente e iluminación con la tarjeta PQ-UAQ, permite hacer la detección de *flicker*, facilitando el ahorro de recursos.

Al realizar la comparativa de las envolventes de las señales, se obtiene que hay una relación que es inversa una de la otra. Esto coincide con el signo negativo obtenido en el cálculo del coeficiente de correlación. Además, los resultados del coeficiente de correlación indican que hay un alto grado de relación entre la calidad de la energía y la señal adquirida con la fotorresistencia, lo que prueba que una mala calidad de la energía de la red eléctrica puede ser una fuente de *flicker*. Esto se puede ver claramente en los valores cercanos al 100% obtenidos en el caso 2, caso donde hay más variaciones de voltaje. Además, en los espectros en frecuencia se observa que las componentes frecuenciales en las señales no son las mismas para cada lámpara, lo que indica que las componentes no son las mismas a lo largo del tiempo.

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

Areny, R. P. (2004). *Sensores y acondicionadores de señal*. Marcombo.

Azcarate, I., Gutierrez, J. J., Saiz, P., Lazkano, A., Leturiondo, L. A., & Redondo, K. (2014). Flicker characteristics of efficient lighting assessed by the IEC flickermeter. *Electric Power Systems Research*, 107, 21-27.

Bollen, M. H. (2003). What is power quality?. *Electric Power Systems Research*, 66(1), 5-14.

Bollen, M. H., & Gu, I. Y. (2006). *Signal processing of power quality disturbances* (Vol. 30). John Wiley & Sons.

Chang, W. N., Wu, C. J., & Yen, S. S. (1997, May). The influence of voltage flicker on residential lamps. In *Proceedings of Second International Conference on Power Electronics and Drive Systems* (Vol. 1, pp. 392-396). IEEE.

Clemente, M., & Jonathan, M. (2013). *Desarrollo e implementación de un analizador de calidad de energía con base en FPGA para motores trifásicos* (Doctoral dissertation).

Drapela, J., Langella, R., Slezinger, J., & Testa, A. (2018). Generalized lamp model for light flicker studies. *Electric Power Systems Research*, 154, 413-422.

Dzul Ayala, W. A. (2016). *Software de procesamiento de señales eléctricas trifásicas* (Doctoral dissertation).

Elvira-Ortiz, D. A., Morinigo-Sotelo, D., Duque-Perez, O., Jaen-Cuellar, A. Y., Osornio-Rios, R. A., & Romero-Troncoso, R. D. J. (2018). Methodology for flicker estimation and its correlation to environmental factors in photovoltaic generation. *IEEE Access*, 6, 24035-24047.

- Fernández Negroe, B. (2016). *Metodología de calibración para equipo de monitoreo eléctrico propietario PQ-UAQ* (Doctoral dissertation).
- Gil-de-Castro, A., Rönnerberg, S. K., & Bollen, M. H. (2017). Light intensity variation (flicker) and harmonic emission related to LED lamps. *Electric Power Systems Research*, 146, 107-114.
- Granados Lieberman, D. (2013). *Análisis en maquinaria CNC ante variaciones de bajo voltaje y sus efectos en la calidad de la energía* (Doctoral dissertation).
- Gutierrez, J. J., Saiz, P., Azcarate, I., Leturiondo, L. A., Redondo, K., de Gauna, S. R., & Gonzalez-Otero, D. M. (2017). Sensitivity of modern lighting technologies at varying flicker severity levels. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 92, 34-41.
- IEEE Recommended Practice for Monitoring Electric Power Quality*, IEEE Standard 1159, Institute of Electrical and Electronic Engineers, Jun. 2009.
- Martínez Robles, J. M. (2014). *Implementación de un sistema de celdas fotovoltaicas para el alumbrado del laboratorio de automatización de la Facultad de Ingeniería de la UAQ* (Doctoral dissertation).
- Mejía Barrón, A. (2013). *Monitoreo remoto vía ethernet de la calidad de la energía en sistemas de baja tensión* (Doctoral dissertation).
- Romero-Troncoso, R. J., Cabal-Yepez, E., Garcia-Perez, A., Osornio-Rios, R. A., Alvarez-Salas, R., & Granados-Lieberman, D. (2011, September). Reconfigurable instrument for power quality monitoring in 3-phase power systems. In *8th IEEE Symposium on Diagnostics for Electrical Machines, Power Electronics & Drives* (pp. 186-191). IEEE.
- Rodriguez, M. V., Hernandez, L. A. M., Rangel, J. P. B., & Gonzalez, A. D. (2016). Real-time monitoring of voltage variations using mathematical morphology. *IEEE Latin America Transactions*, 14(5), 2138-2145.

Testing and Measurement Techniques - Flickermeter - Functional and Design Specifications, IEC International Standard 61000-4-15, International Electrotechnical Commission, Geneva, Switzerland, 2010.

Valtierra-Rodriguez, M., de Jesus Romero-Troncoso, R., Osornio-Rios, R. A., & Garcia-Perez, A. (2013). Detection and classification of single and combined power quality disturbances using neural networks. *IEEE transactions on industrial electronics*, 61(5), 2473-2482.

Valtierra-Rodriguez, M., Granados-Lieberman, D., Torres-Fernandez, J. E., Rodríguez-Rodríguez, J. R., & Gómez-Aguilar, J. F. (2016). A new methodology for tracking and instantaneous characterization of voltage variations. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 65(7), 1596-1604.

Yoshimoto, S., Garcia, J., Jiang, F., Wilkins, A. J., Takeuchi, T., & Webster, M. A. (2017). Visual discomfort and flicker. *Vision research*, 138, 18-28.