

**EVALUACIÓN DEL PERFIL DE CARGA DE UN CIRCUITO ELÉCTRICO A PARTIR DE LAS
FIRMAS DE CONSUMO DE UNA CARGA INSTALADA**



Paula Andrea Bolaños Vega

Gisselle Alejandra Palomino Dorado

Universidad del Cauca

Facultad de Ingeniería Electrónica y Telecomunicaciones

Departamento de Electrónica, Instrumentación y Control

Línea de investigación en Sistemas de Potencia

Popayán, junio de 2019

**EVALUACIÓN DEL PERFIL DE CARGA DE UN CIRCUITO ELÉCTRICO A PARTIR DE LAS
FIRMAS DE CONSUMO DE UNA CARGA INSTALADA**



**Trabajo de grado presentado como requisito para obtener el título de
Ingeniero en Automática Industrial**

Paula Andrea Bolaños Vega

Gisselle Alejandra Palomino Dorado

Director: Mg. Francisco Franco Obando Díaz

Universidad del Cauca

Facultad de Ingeniería Electrónica y Telecomunicaciones

Departamento de Electrónica, Instrumentación y Control

Línea de investigación en Sistemas de Potencia

Popayán, junio de 2019

Nota de Aprobación

Director

Jurado

Jurado

Fecha:

Agradecimientos

A Dios gracias por cada detalle y momento durante la realización de nuestra tesis, gracias a él porque nos permitió continuar con salud, fuerzas y empeño para culminar nuestro proyecto.

A nuestra familia, y en particular a nuestros padres y hermanos por el apoyo y la paciencia brindados durante el recorrido de este camino.

A nuestro director, Francisco Franco, por su acompañamiento a lo largo de la investigación.

A la Universidad del Cauca por su apoyo y brindarnos las bases que permitieron lo aquí presente.

Índice general

1. FIRMAS DE CONSUMO EN UN CIRCUITO DE POTENCIA	12
1.1. Características De Las Firmas De Consumo	12
1.2. Procedimiento Para La Identificación De Las Firmas De Consumo	13
1.3. Métodos Matemáticos y de Aplicación En Ambientes Controlados	14
2. Descripción del Procedimiento Propuesto.	39
3. APLICACIÓN DEL PROCEDIMIENTO PROPUESTO	50
3.1. Implementación del Sistema Hardware - Software	50
3.1.1. Búsqueda de sensores	56
3.2. Criterios de Identificación para Determinar el Perfil de Carga	59
4. VALIDACIÓN Y RESULTADOS DEL PROCEDIMIENTO PROPUESTO	66
4.1. Resultados	66
4.1.1. Motor Jaula de Ardilla	66
4.1.2. Circuito RLC	69
4.1.3. Circuito RC	71
4.1.4. Circuito RL	73
4.1.5. Transformador	75
4.1.6. Transformador Elevador	77
4.1.7. Transformador Reductor	79
4.2. Validación del Procedimiento Propuesto	81

<i>ÍNDICE GENERAL</i>	2
5. CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS	92
5.1. Conclusiones	92
5.2. Trabajos Futuros	93

Índice de figuras

1.1. Perfil de carga en un apartamento- Fuente [3]	15
1.2. Perfil de carga en diferentes horas del día - Fuente [3]	15
1.3. Interfaz gráfica del usuario. Fuente: [3]	17
1.4. La forma de onda de corriente modificada de la televisión y la trayectoria correspondiente. (a) La forma de onda actual se desplaza hacia la derecha para que los picos de la forma de onda actual no estén alineados con los picos de la forma de onda de voltaje. (b) Nueva trayectoria. Las áreas de los segmentos izquierdo y derecho aumentan. Fuente: [4]	18
1.5. El dendrograma para agrupar los aparatos. La línea de puntos horizontal superior divide los aparatos en 13 grupos. Los tres grupos se dividen en subgrupos por las tres líneas de puntos inferiores. Fuente [4]	19
1.6. Vectores elegidos en las formas de onda actuales. Fuente [4]	20
1.7. Ejemplo ajuste de curva de probabilidad de microondas de acuerdo con el estándar de permanencia. Fuente [5]	21
1.8. Firma eléctrica tipo pulso. Fuente [5]	22
1.9. Firma eléctrica tipo pico positivo. Fuente [5]	22
1.10. Firma eléctrica tipo pico negativo. Fuente [5]	22
1.11. Firma eléctrica tipo múltiples picos. Fuente [5]	23
1.12. Firma eléctrica tipo ruido. Fuente [5]	23
1.13. Red de distribución residencial típica brasileña. Fuente [5]	24
1.14. Ejemplo de circuito residencial detallado. Fuente [5]	24
1.15. Modelo de dispositivos lineales. Fuente [5]	24
1.16. Modelo de dispositivos no lineales. Fuente [5]	26

1.17. Diagrama del método de simulación propuesto. Fuente [5]	28
1.18. Perfil de tensión. Fuente [5]	29
2.1. Diagrama de flujo del procedimiento propuesto. Fuente: Propia	39
2.2. Esquemas de Conexión. (a) Configuración Delta. (b) Configuración Estrella. Fuente: Propia.	40
2.3. Curvas características de voltaje y corriente. (a) Ambiente controlado. (b) Ambiente no controlado. Fuente: Propia.	40
2.4. Curvas características de voltaje y corriente con 12 ciclos a 60 Hz Fuente: Propia	41
2.5. Plantilla de identificación para las cargas ya analizadas. Fuente: Propia	48
3.1. Planta Lab-Volt EMS 8341-2. Fuente: Propia.	51
3.2. Placa Arduino Mega 2560. Fuente: Propia	52
3.3. Tiempo de muestreo placa Arduino. Fuente: Propia	53
3.4. Placa PSoC 5 CY8CKIT-059	53
3.5. Diagrama de bloques elaborado en el Software PSoC Creator 4.2 para adquisición de la señal. Fuente: Propia	54
3.6. Diagrama en bloques de LabView para adquisición de la señal. Fuente: Propia	54
3.7. Panel Frontal en LabView para observar las señales obtenidas. Fuente: Propia	55
3.8. Esquema de conexión para comprobación de tiempo muestreo. Fuente: Propia	55
3.9. Cambio registrado en simultaneo de la prueba de tiempo de muestreo. Fuente: Propia	55
3.10. Esquema de conexión y configuración de pines del sensor MAZX471. Fuente: [24]	56
3.11. Curva de corriente obtenida del sensor MAX471 al conectarlo a la fuente AC de la planta Lab-Volt EMS 8341-2. Fuente: Propia	57
3.12. Esquemático sensor ZMPT101B. Fuente: [22]	57
3.13. Curva de voltaje obtenida del sensor ZMPT101B al conectarlo a la fuente AC de la planta Lab-Volt EMS 8341-2. Fuente: Propia	58
3.14. Sistema DAQ sensor CASSY 2 - 524 013. (a) Esquema de conexión para medir la curva característica de corriente. (b) Esquema de conexión para medir la curva característica de voltaje. Fuente: Propia.	59
3.15. Parámetros con mas presencia en las curvas de voltaje y corriente obtenidas del Motor rotor jaula de ardilla en delta. Fuente: Propia.	60

3.16. **Curvas de corriente, referencia más carga (motor) y el diferencial. Fuente: Propia.** 61

3.17. **Promedio de los parámetros obtenidos de la carga y del diferencial correspondientes a un Motor rotor jaula de ardilla en delta. Fuente: Propia.** 61

3.18. **Esquema de conexión para un motor rotor jaula de ardilla. Fuente Propia.** 61

3.19. **Diagrama en SIMULINK correspondiente a un motor rotor jaula de ardilla indicando los valores de voltaje y corriente correspondientes. Fuente: Propia** 62

3.20. **Señales de voltaje y corriente medidas para el motor rotor jaula de ardilla con sensor CASSY 2. Fuente: Propia** 62

3.21. **Parámetros mas relevantes de las 7 cargas de estudio en conexión delta y estrella. Fuente: Propia** 64

3.22. **Pesos establecidos para las cargas de estudio en conexión delta y estrella. Fuente: Propia** 65

4.1. **Esquema de conexión para el motor rotor jaula de ardilla. Fuente: Propia** 66

4.2. **Curvas características de voltaje y corriente para el Motor rotor jaula de ardilla. Fuente Propia.** 67

4.3. **Identificación del Motor rotor jaula de ardilla en el entorno MATLAB. Fuente: Propia** 67

4.4. **Esquema de conexión para el circuito RLC. Fuente Propia** 69

4.5. **Curvas características de voltaje y corriente para el circuito RLC. Fuente: Propia** . . . 69

4.6. **Identificación del circuito RLC en el entorno MATLAB. Fuente: Propia** 69

4.7. **Esquema de conexión para el circuito RC. Fuente Propia** 71

4.8. **Curvas características de voltaje y corriente para el circuito RC. Fuente: Propia** 71

4.9. **Identificación del circuito RC en el entorno MATLAB. Fuente: Propia** 71

4.10. **Esquema de conexión para el circuito RL. Fuente Propia** 73

4.11. **Curvas características de voltaje y corriente para el circuito RL. Fuente: Propia** 73

4.12. **Identificación del circuito RL en el entorno MATLAB. Fuente: Propia** 73

4.13. **Esquema de conexión para los Transformadores. Fuente Propia** 75

4.14. **Curvas características de voltaje y corriente para el Transformador 120 V / 120 V. Fuente: Propia** 75

4.15. **Identificación del Transformador 120 V / 120 V en el entorno MATLAB.. Fuente: Propia** 75

4.16. Curvas características de voltaje y corriente para el Transformador Elevador 120 V / 180 V. Fuente: Propia	77
4.17. Identificación del Transformador Elevador 120 V / 180 V en el entorno MATLAB. Fuente: Propia	77
4.18. Curvas características de voltaje y corriente para el Transformador Reductor 120 V / 60 V. Fuente: Propia	79
4.19. Identificación del Transformador Reductor 120 V / 60 V en el entorno MATLAB. Fuente: Propia	79
4.20. Registros de las curvas de corriente y voltaje correspondientes al motor rotor jaula de ardilla. Fuente: Propia	81
4.21. Archivo de datos dado por el sensor CASSY 2 correspondientes las curvas características de voltaje y corriente. Fuente: Propia	82
4.22. Resultado de identificación del motor rotor jaula de ardilla en conexión delta realizada en el entorno MATLAB. Fuente: Propia	83
4.23. Matriz resultante de la comparación entre parámetros obtenidos y rangos establecidos. Fuente: Propia	84
4.24. Esquema de conexión para el motor rotor jaula de ardilla con el electro-dinamometro. Fuente: Propia	85
4.25. Registros de las curvas de corriente y voltaje correspondientes al motor rotor jaula de ardilla con carga. Fuente: Propia	85
4.26. Archivo de datos dado por el sensor CASSY 2 correspondientes las curvas características de voltaje y corriente. Fuente: Propia	86
4.27. Resultado de identificación del motor rotor jaula de ardilla con carga en conexión delta realizada en el entorno MATLAB. Fuente: Propia	87
4.28. Registros de las curvas de corriente y voltaje correspondientes al motor rotor jaula de ardilla con carga. Fuente: Propia	88
4.29. Archivo de datos dado por el sensor CASSY 2 correspondientes las curvas características de voltaje y corriente. Fuente: Propia	88
4.30. Resultado de identificación del motor rotor jaula de ardilla con carga en conexión delta realizada en el entorno MATLAB. Fuente Propia	90

4.31. **Matriz resultante de la comparación entre parámetros obtenidos y rangos establecidos.**

Fuente: Propia 90

Índice de cuadros

1.1. Secuencia de electrodomésticos encendidos/apagados- Fuente: [3]	14
1.2. Métricas de energía tradicionales- Fuente: [4]	19
1.3. Características y parámetros encontrados para análisis de firmas de consumo de la búsqueda sistemática. Fuente: Propia	37
1.4. Características y parámetros encontrados para análisis de firmas de consumo de la búsqueda sistemática. Fuente: Propia	38
2.1. Parámetros de Evaluación del Perfil de Carga- Fuente: Propia	42
2.2. Parámetros que presentan mayor efecto al hacer un tratamiento de las curvas de voltaje y corriente. Fuente: Propia.	43
2.3. Fórmulas utilizada para métodos de correlación y estadística. Fuente:[25], [26]	45
2.4. Pesos definitivos para las diferentes cargas. Fuente: Propia	46
2.5. Valor error muestral. Fuente: Propia	47
2.6. Tag de identificación. Fuente: Propia	48
3.1. Cargas disponibles en la planta Lab-Volt EMS 8341-2 para caso de Estudio	51
3.2. Características relevantes del sensor MAX471. Fuente: [24]	56
3.3. Características sensor ZMPT101B. Fuente:[22]	57
3.4. Parámetros obtenidos para las 7 cargas de estudio y establecer su perfil de carga. Fuente: Propia	63
4.1. Criterios establecidos para el perfil de carga del motor rotor jaula de ardilla, conexión delta. Fuente: Propia	68

4.2. Criterios establecidos para el perfil de carga del motor rotor jaula de ardilla, conexión estrella. Fuente: Propia	68
4.3. Criterios establecidos para el perfil de carga del circuito RLC, conexión delta. Fuente: Propia	70
4.4. Criterios establecidos para el perfil de carga del circuito RLC, conexión estrella. Fuente: Propia	70
4.5. Criterios establecidos para el perfil de carga del circuito RC, conexión delta. Fuente: Propia	72
4.6. Criterios establecidos para el perfil de carga del circuito RC, conexión estrella. Fuente: Propia	72
4.7. Criterios establecidos para el perfil de carga del circuito RL, conexión delta. Fuente: Propia	74
4.8. Criterios establecidos para el perfil de carga del circuito RL, conexión estrella. Fuente: Propia	74
4.9. Criterios establecidos para el perfil de carga del Transformador 120 V / 120 V, conexión delta. Fuente: Propia	76
4.10. Criterios establecidos para el perfil de carga del Transformador 120 V / 120 V, conexión estrella. Fuente: Propia	76
4.11. Criterios establecidos para el perfil de carga del Transformador Elevador 120 V / 180 V, conexión delta. Fuente: Propia	78
4.12. Criterios establecidos para el perfil de carga del Transformador Elevador 120 V / 180 V, conexión estrella. Fuente: Propia	78
4.13. Criterios establecidos para el perfil de carga del Transformador Reductor 120 V / 180 V, conexión delta. Fuente: Propia	80
4.14. Criterios establecidos para el perfil de carga del Transformador Reductor 120 V / 180 V, conexión estrella. Fuente: Propia	80
4.15. Parámetros resultantes para el motor rotor jaula de ardilla en conexión Delta. Fuente: Propia	82
4.16. Rangos propuestos para el motor rotor jaula de ardilla en conexión Delta. Fuente: Propia	83
4.17. Características correspondientes a el electro-dinamómetro	84

4.18. Parámetros resultantes para el motor rotor jaula de ardilla con carga en conexión	
Delta. Fuente Propia	86
4.19. Nuevos rangos establecidos para el motor rotor jaula de ardilla con carga. Fuente: Propia	87
4.20. Parámetros obtenidos de las curvas de voltaje y corriente nuevamente sensadas. Fuente: Propia	89
4.21. Rangos establecidos para el motor rotor jaula de ardilla con carga. Fuente: Propia . . .	89

INTRODUCCIÓN

La calidad de potencia se ha ido convirtiendo en un aspecto muy importante en el sector eléctrico, lo que implica un mayor interés en registrar y conocer las características de las señales de las cargas conectadas a la red eléctrica, para obtener un perfil de la carga, es decir, conocer las características de la misma, junto con las perturbaciones que se producen en la red (hundimiento armónicos, sobre-tensiones, flicker, etc.) [1], estableciendo una incidencia que vaya ligada a la actuación de un elemento de la red permitiendo relacionar episodios y eventos para determinar el origen de esto, así, se podría definir de qué manera afecta el funcionamiento de los equipos eléctricos incluso de todo el sistema de potencia [2]. Ante esta situación, se plantea un procedimiento, que permite la asociación del perfil de carga de un circuito eléctrico conectado a la red trifásica de baja tensión, en un ambiente controlado de laboratorio, obteniendo la identificación de las firmas de consumo de las cargas instaladas. El desarrollo de este procedimiento establece criterios y soportes obtenidos por correlación de datos, asignando un peso a los parámetros encontrados de las formas de onda de corriente y voltaje según su comportamiento, seguido a esto, con la implementación del sistema hardware – software y a la aplicación de dichos criterios, se logra evaluar el perfil de carga de cada circuito eléctrico conectado asociándolo a la firma de consumo, por último, se realizaron pruebas de validación a cargas de tipo RLC, RC, RL, Motor, Transformadores o cargas desconocidas, para comprobar los criterios establecidos por el procedimiento propuesto.

Capítulo 1

FIRMAS DE CONSUMO EN UN CIRCUITO DE POTENCIA

Esta sección introduce conceptos sobre firmas de consumo presentes en un circuito o red de potencia, se mencionaran métodos utilizados para la desagregación, monitorización e identificación de las mismas en ambientes controlados y la forma de correlación de los datos medidos. La firma de consumo, es una expresión eléctrica que un dispositivo posee cuando se conecta a una red de potencia. Se puede definir de varias maneras, lo más simple es usar curvas de potencia o corriente en el dominio de tiempo, sin embargo, casi todos los parámetros eléctricos son derivados del voltaje y la corriente ya que son cantidades comúnmente utilizadas para definir y destacar el perfil de carga [3].

1.1. Características De Las Firmas De Consumo

El rendimiento de la red de potencia depende de cuatro componentes principales, las características de la línea eléctrica, como: tensión de servicio nominal, frecuencia de servicio y numero de fases, las características de la fuente de alimentación, los condensadores de corrección del factor de potencia y, lo más importante, la carga [4]. Es por ello que la obtención y medición del evento presentado en la red de potencia incluyendo la carga, presentan las particularidades que definen las firmas de consumo, dichas medidas incluyen: forma de onda de corriente en el dominio del tiempo, esta medida proporciona uno de los conjuntos de información más completos de la carga, ya que una alta resolución de la señal puede reflejar las características detalladas de un dispositivo, por otra parte, las potencias activa / reactiva (PQ) son las mediciones

más utilizadas para conocer el comportamiento de una carga, por lo que se pueden agrupar de acuerdo al consumo de potencia, factor de potencia o según la distorsión armónica generada [7], otras medidas importantes son, forma de onda de admitancia instantánea, forma de onda de potencia, valores propios y forma de onda transitoria de conmutación [5]. Es preciso resaltar que las características se pueden definir respecto a los datos que se puedan obtener en la medición del voltaje, corriente y potencia de la red, ya que los patrones de carga fluctúan y dependen de diversos factores que cambian dinámicamente [6].

1.2. Procedimiento Para La Identificación De Las Firmas De Consumo

De acuerdo con lo planteado en el proyecto, para identificar varios dispositivos con diferentes características eléctricas, es beneficioso y necesario clasificarlos, es decir, construir una base de datos que contenga las firmas de carga medidas individualmente y poder agruparlas por características similares. Después, para lograr la desagregación de la carga es necesario plantear componentes claves que trabajen juntos para, adquirir información, analizar, tomar decisiones e implementar un software que contenga la solución, es decir, dividir el procedimiento de identificación en partes [8], por ejemplo;

Adquisición de datos: captura y almacenamiento de información crucial relacionada con individuos o grupos de cargas. Por supuesto, muchos datos de campo pueden ser monitoreados y registrados. Sin embargo, las aplicaciones pueden dictar el tipo de datos necesarios y las decisiones que deben tomarse [8].

Base de Datos: La base de datos debe incluir una amplia variedad de muestras de cargas, pero no es práctico recopilar las firmas de carga de todas las cargas diferentes, ya que hay una cantidad enorme de ellas [8].

Análisis: los métodos de análisis, obtención de conocimientos útiles y sugerencias de alternativas para obtener mejores resultados. Debido a la naturaleza estocástica de las cargas para sistemas grandes, ciertos análisis pueden requerir recursos computacionales intensivos y modelos analíticos sofisticados para tomar una carga compuesta y dividirla en un conjunto de firmas de carga de dispositivos identificables [8]. Analíticamente, un método de mayor uso es la correlación de datos. Es la forma numérica en la que la estadística ha podido evaluar la relación de dos o más variables. La cuál, entrega un coeficiente de correlación que es un valor cuantitativo de la relación entre dichas variables y puede variar desde $-1,00$ hasta $1,00$. La correlación de proporcionalidad directa o positiva se establece con los valores $+1,00$ y de proporcionalidad inversa o negativa, con $-1,00$. No existe relación entre las variables cuando el coeficiente es de $0,00$ [9].

Interfaz: La presentación de datos de carga, resultados de análisis, alternativas de control ya sean gráficos o analíticos son una parte fundamental del sistema para mostrar los resultados obtenidos [8].

1.3. Métodos Matemáticos y de Aplicación En Ambientes Controlados

En esta sección del capítulo, se presentan métodos para la identificación de las cargas eléctricas, es decir, medición de datos y patrones utilizados de acuerdo a las firmas de consumo resultantes. En la práctica, muchas cargas se conectan al circuito, por lo tanto, la forma de onda obtenida puede exhibir características muy diferentes de las cargas individuales. La figura 1.1 muestra un perfil de carga muestreado por 24 horas, con diferentes mediciones eléctricas, en un apartamento del estado de California. El gráfico presenta, el voltaje (voltios), la corriente (amperios) y la potencia (kW), respectivamente. La ventana de expansión del segundo gráfico muestra una forma instantánea de cómo se ve una carga compuesta. En este caso, uno de los acondicionadores de aire acaba de comenzar un ciclo de enfriamiento a las 3 pm (B). También, se tomaron muestras instantáneas similares, indicadas desde A hasta F, en diferentes momentos, como se muestra en la tabla 1.1. Las formas de onda de carga compuesta se muestran en la figura 1.2. Estos comportamientos, se pueden analizar para identificar y rastrear el uso de un dispositivo [3].

Cuadro 1.1: Secuencia de electrodomésticos encendidos/apagados- Fuente: [3]

Etiquetas	Hora	Actividades
A	9 a.m.	Lavadora.
B	3 p.m.	Lavadora en ciclo de secado con dos aires acondicionados.
C	6 p.m.	Aire acondicionado.
D	9 p.m.	Refrigerador.
E	11 a.m.	Tres aires acondicionados, plancha, calentador de agua, luces y televisión.
F	6 a.m.	Calentador de agua.

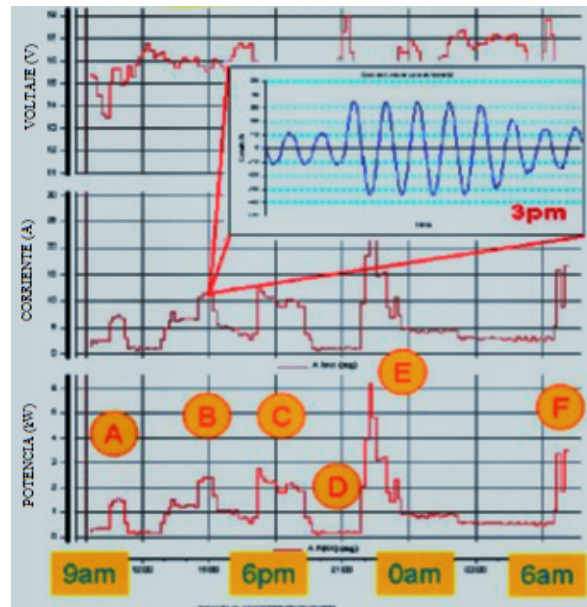


Figura 1.1: Perfil de carga en un apartamento- Fuente [3]

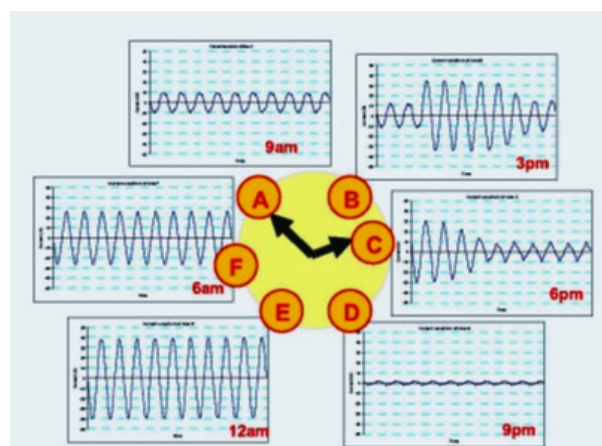


Figura 1.2: Perfil de carga en diferentes horas del día - Fuente [3]

De modo que la desagregación de las ondas mostradas anteriormente, consiste en tomar una carga compuesta y dividirla en un conjunto de firmas de carga de dispositivos identificables. Una vez que sea posible la identificación se diseñan esquemas de optimización adecuados para mejorar el rendimiento. El objetivo es encontrar el mejor "ajuste" a una carga compuesta con un conjunto de firmas de carga dadas. Matemáticamente, un modelo puede ser considerado de la siguiente manera.

Suponga que la firma de carga de estado estable de un dispositivo donde i es conocida y representada por un vector, $\{a_i(t) = |t = 1 \dots n\}$, donde n es el número total de muestras que comprende una firma [3]. Para

obtener cualquier carga compuesta, denotada $\{y(\hat{t}) = |t = 1 \dots n\}$, se puede escribir en forma de matriz:

$$\hat{y}(t) = A^T x \quad (1.1)$$

donde x es un vector que representa el número individual de aparatos. Para encontrar el ajuste más cercano entre la carga compuesta ($\hat{y}(t)$) y la señal real indicada por $\{y(t)|k = 1 \dots n\}$, se puede minimizar el error, entre $\hat{y}(t)$ y $y(t)$:

Minimizar,

$$\varepsilon = \sum (\hat{y}_k - y_k)^2 \quad (1.2)$$

sujeto a:

$$A^T x = \hat{y}$$

$$0 \leq x_i \leq \hat{x}_i$$

x_i es el número máximo de electrodomésticos permitidos. Con esta formulación se puede obtener una solución de acuerdo al perfil de carga de las firmas de consumo [3]. En este artículo utilizan la información y datos reunidos, para crear un simulador basado en firmas con una Interfaz Gráfica de Usuario (GUI) que se muestra en la figura 1.3. Este simulador utiliza el método de superposición para sumar o restar firmas de carga de estado estable para formar cualquier carga compuesta deseada. Como tal, se pueden generar y estudiar diferentes combinaciones de firmas de carga. Por ejemplo, se puede usar para generar casos para probar la precisión y la eficiencia de diferentes algoritmos de desagregación.

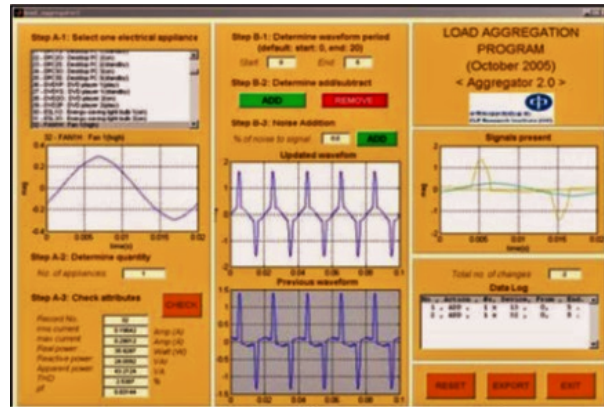


Figura 1.3: Interfaz gráfica del usuario. Fuente: [3]

Por otra parte, en [4] se recomienda una forma bidimensional para caracterizar las firmas de consumo, es decir, se definen trayectorias de voltaje-corriente (V-I) para representar los electrodomésticos. Para ello, se empleó un método de agrupamiento jerárquico para clasificar los dispositivos y construir dicha taxonomía. En la práctica, las cargas se pueden agrupar observando las características eléctricas similares entre sí, a pesar de que pueden cumplir diferentes funciones desde el punto de vista del usuario. Las cargas estudiadas en esta investigación fueron electrodomésticos o aparatos como, resistivos, de motor, de bomba, electrónicos e iluminación fluorescente.

Para cada aparato, se utiliza el voltaje y la corriente de estado estable en un ciclo de larga duración para trazar la trayectoria $V - I$. Y para el mismo tipo de dispositivos, es decir, los mismos dispositivos de diferentes marcas o modelos, las formas de las formas de onda actuales son similares, pero las magnitudes pueden ser diferentes debido a la diferencia en los consumos de energía de los dispositivos, por ello la magnitud del voltaje y la corriente se normalizan de modo que las trayectorias de todos los aparatos tengan la misma escala. Entonces, las características de la forma de onda que se emplearon son: a simetría, estudia las relaciones entre cada una de las características de la forma y las de los aparatos; dirección de bucle, está relacionada con el ángulo de fase entre la tensión y la corriente; área, es la trayectoria encerrada y se calcula directamente a partir de las coordenadas de los puntos de la misma; curvatura de la línea media, mide la distorsión de la línea media de la trayectoria desde una línea recta, la cual representa la no linealidad de la carga; auto intersección, sucede cuando las trayectorias se cruzan entre sí; pendiente del segmento medio, mide la pendiente del segmento medio de la trayectoria; área de los segmentos izquierdo y derecho está relacionada con el desplazamiento de tiempo entre los picos de las formas de onda de voltaje y corriente [6].

Entonces, se estudia las relaciones entre cada una de las características de las formas y las de los aparatos, para definir la distancia de las trayectorias se aplica la teoría de Hausdorff¹ [4]. En la figura 1.4 se presenta la corriente desplazada contra el voltaje para producir una nueva trayectoria que tiene segmentos más anchos hacia la izquierda y hacia la derecha, por lo que el área de los segmentos izquierdo y derecho de la nueva trayectoria es más grande.

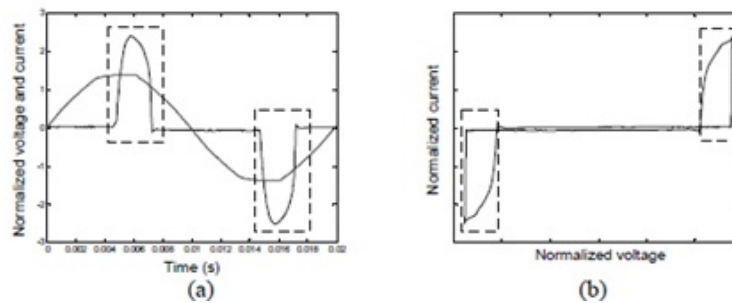


Figura 1.4: La forma de onda de corriente modificada de la televisión y la trayectoria correspondiente. (a) La forma de onda actual se desplaza hacia la derecha para que los picos de la forma de onda actual no estén alineados con los picos de la forma de onda de voltaje. (b) Nueva trayectoria. Las áreas de los segmentos izquierdo y derecho aumentan. Fuente: [4]

El siguiente paso es realizar el método de agrupamiento jerárquico, para esto los objetos que se necesitan agrupar se organizan en un dendrograma². En [4], la distancia euclidiana³ se utilizó para medir la distancia entre los aparatos para vincular los objetos. Entonces, se define n niveles si se necesitan n objetos para agruparse. Luego, cada dispositivo se caracteriza y es asociado a los grupos de clasificación.

La figura 1.5 presente en [4] muestra el dendrograma para agrupar los dispositivos al final se formaron 13 grupos con las formas de ondas medidas.

¹Distancia de Hausdorff: mide la distancia de dos subconjuntos compactos de un espacio métrico.

²Dendrograma: Representación gráfica o diagrama de datos en forma de árbol que organiza los datos en subcategorías que se van dividiendo en otros hasta llegar al nivel de detalle deseado.

³Distancia Euclidiana: se trata de una función no negativa usada en diversos contextos para calcular la distancia entre dos puntos, primero en el plano y luego en el espacio.

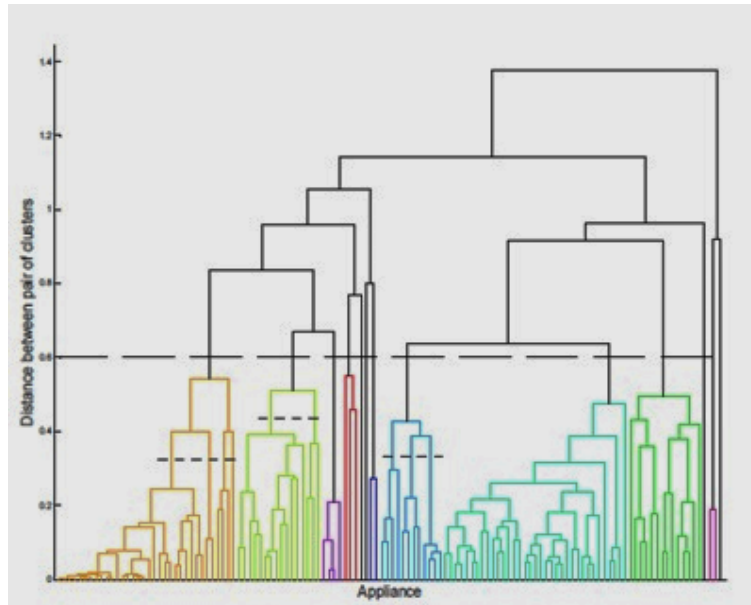


Figura 1.5: El dendrograma para agrupar los aparatos. La línea de puntos horizontal superior divide los aparatos en 13 grupos. Los tres grupos se dividen en subgrupos por las tres líneas de puntos inferiores. Fuente [4]

Ahora bien, son calculados parámetros de potencia los cuales determinan características de clasificación de los aparatos. Dichos parámetros son: I_{rms} , Q , PF , $TOHDi$ y $TEHDi$ como se muestra en la Tabla 1.2. Y se calculan a partir de la corriente y la potencia de estado estable [8].

Cuadro 1.2: Métricas de energía tradicionales- Fuente: [4]

Métrica	Definición
I_{rms}	Valor cuadrado medio de la corriente en un ciclo completo.
Q	Potencia reactiva.
PF	Factor de potencia PF: relación entre la potencia activa y la potencia aparente.
$TOHDi$	Distorsión armónica impar total de la corriente.
$TEHDi$	Distorsión total armónica de la corriente.

En la figura 1.6 se muestran los vectores de la clasificación de las ondas actuales, las características de los electrodomésticos seleccionados, las cuales son efectivas para clasificar las cargas [4].

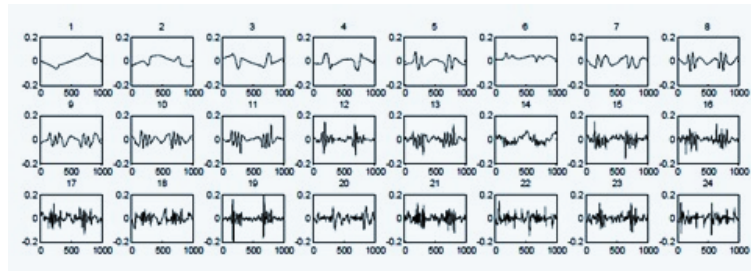


Figura 1.6: **Vectores elegidos en las formas de onda actuales. Fuente [4]**

De otra manera, en [5] desarrollan una plataforma para modelar el perfil de carga aplicando un método probabilístico que modela las incertidumbres involucradas a través de las características de utilización de los electrodomésticos, por lo tanto el perfil de consumo es estimado por tres factores principales, el momento que es conectada la carga, el tiempo de duración de la misma y el comportamiento de la potencia utilizada durante su uso. De manera general el modelo propuesto representa cada dispositivo de forma individual y expone el impacto generado en el sistema.

Los aparatos utilizados en el modelo anteriormente descrito son electrodomésticos típicos en una vivienda brasileña. Las curvas de probabilidad de uso indican la frecuencia de actividad a lo largo del día, son tomadas de encuestas oficiales y datos técnicos de Brasil. De ahí, se toman las curvas de probabilidad de uso y se dividen en 12 categorías, de esta forma se clasificaran los dispositivos que se conecten a la red de distribución de baja tensión. Es importante resaltar que las curvas poseen un muestreo de 1 minuto, por lo tanto, solo es detectado el accionamiento de los dispositivos en dicho tiempo. Entonces, se realizan mediciones de campo de acuerdo a los accionamientos de los dispositivos en el día para sacar el tiempo de utilización mensual y la duración del ciclo de operación.

La cantidad medida de accionamientos diarios (m) se calcula con la siguiente expresión:

$$m = \frac{(\text{promediomensualdeuso}) \times 60}{(\text{promediodeduración}) \times 30} \quad (1.3)$$

La cantidad de personas en las residencias influyen directamente a la cantidad de accionamiento de los dispositivos, por lo tanto, es necesario incluir un factor k , que corresponde al número de personas que residen en la vivienda. Por lo cual, con los valores del factor k , es posible determinar la probabilidad del electrodoméstico para ser accionado (P), en determinado instante del día, esta probabilidad está dada por la ecuación (1.4) en donde t es el instante de simulación, $P_r(t)$ es la probabilidad de uso en el ese instante

obtenida a través de la curva de probabilidad de uso, c es el factor de correlación de la curva de probabilidad de uso y m es el número medido de accionamientos de cada dispositivo por día [7].

$$P(t) = P_r(t) \times c \times m \times k \tag{1.4}$$

En la ecuación anterior, el factor c se relaciona con el estándar de permanencia en las residencias (PP), donde PP es una variable binaria que indica si la residencia esta ocupada o no en cada instante del día, además el análisis de correlación se aplica para mostrar el impacto del uso de cada electrodoméstico. Con esto P_r representa los instantes que la residencia está ocupada y ($PP(t) = 1$) será igual a 1 al iniciar el conteo, entonces se tiene qué:

$$\sum P_r(t) \times PP(t) \times c = 1 \tag{1.5}$$

Donde, c puede ser calculado de la siguiente manera:

$$c = \left\{ \frac{0;1}{\sum P_r(t) \times PP(t)}, PP(t) = 0; PP(t) = 1 \right\} \tag{1.6}$$

Así, la figura 1.7 ilustra un ejemplo del procedimiento de ajuste de curva de probabilidad de uso de un microondas, para este ejemplo, el factor c fue calculado con la ecuación (1.6).

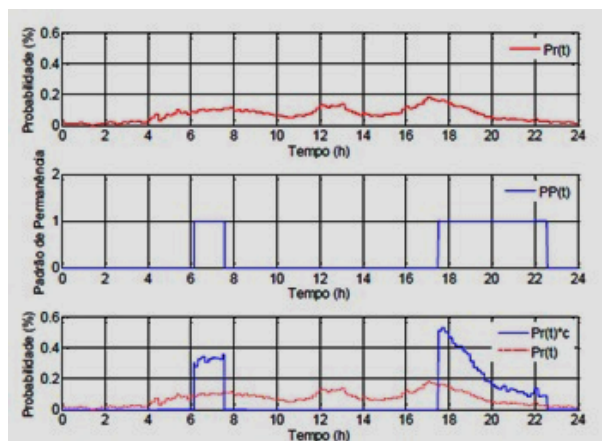


Figura 1.7: Ejemplo ajuste de curva de probabilidad de microondas de acuerdo con el estándar de permanencia. Fuente [5]

La mayoría de los dispositivos presentan las características conductuales multi-estados y multi-nivel, es decir, con varias etapas de operación y varios niveles de demanda a lo largo de su utilización. Los electro-

domésticos en [5] son clasificados en seis diferentes tipos de firma eléctrica, los cuales son:

Pulsos: Diversos electrodomésticos que poseen funciones de calentamiento presentan perfiles de demanda en forma de pulsos, los cuales se caracterizan por poseer repetidos ciclos de operación en el estado de encendido y apagado. La figura 1.8 muestra la firma eléctrica de pulso.

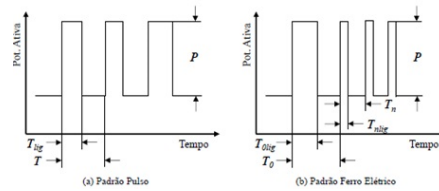


Figura 1.8: Firma eléctrica tipo pulso. Fuente [5]

Pico Positivo: los picos de demanda son causados por la corriente de arranque de los motores, que, a su vez, es modelada analíticamente ejecutando una subrutina explicada más adelante. La figura 1.9 muestra la firma eléctrica de tipo pico positivo.

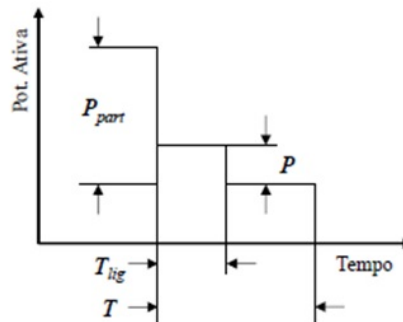


Figura 1.9: Firma eléctrica tipo pico positivo. Fuente [5]

Pico Negativo: en la figura 1.10 se representa la forma de esta firma eléctrica.

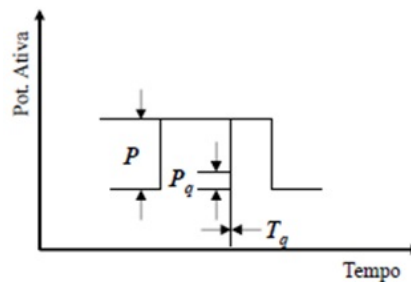


Figura 1.10: Firma eléctrica tipo pico negativo. Fuente [5]

Múltiples Picos: en la siguiente figura 1.11 se puede apreciar la forma de como se encuentra esta firma eléctrica,

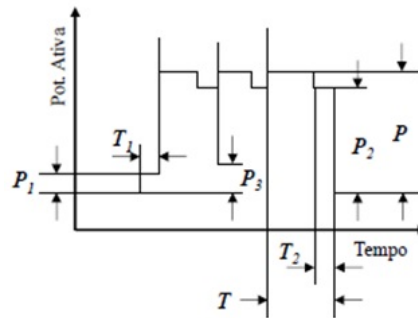


Figura 1.11: Firma eléctrica tipo múltiples picos. Fuente [5]

Ruido: algunos electrodomésticos poseen ruidos de alta frecuencia, en la figura 1.12 describe la firma eléctrica de uno de ellos durante la utilización del dispositivo y es adicionada un ruido blanco al perfil del mismo.

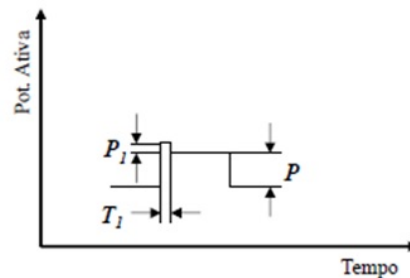


Figura 1.12: Firma eléctrica tipo ruido. Fuente [5]

Red de Distribución

En Brasil, la red de distribución primaria es trifásica, con tres conductores de fase, conectando la subestación al transformador de distribución MT/BY. Este transformador, normalmente posee una conexión delta-estrella a tierra (13,8/0,22 kV) y configuración Dyn1, alimentación de diversos consumidores por medio de la red secundaria, generalmente, trifásica con cuatro conductores, siendo tres conductores de fase y un conductor neutro a tierra del transformador y los consumidores [5]. Esta red de distribución tiene características similares con la red colombiana, para transportar la electricidad, se usan tres conductores llamados fases, a nivel de distribución, se puede usar una fase (monofásico), dos fases (bifásico) ó tres (trifásico) con un conductor adicional denominado neutro. Los centros de transformación de distribución reducen la tensión de 20 kV a 125/220 V ó 220/380 V, para el suministro del cliente final [6].

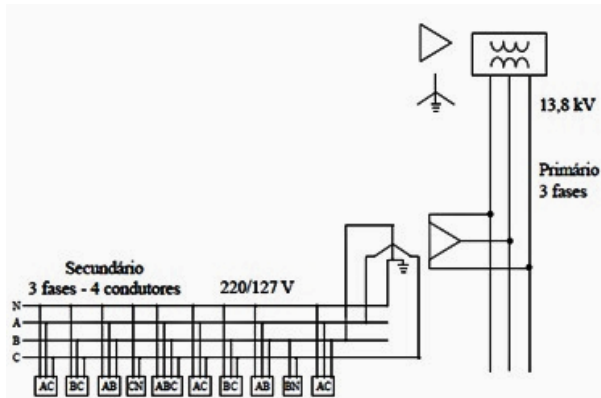


Figura 1.13: Red de distribución residencial típica brasileña. Fuente [5]

Las residencias en la red secundaria, son representadas por un circuito interno detallado, compuesto por los electrodomésticos conectados entre sí, haciendo diversos subcircuitos como se representa en la figura 1.14:

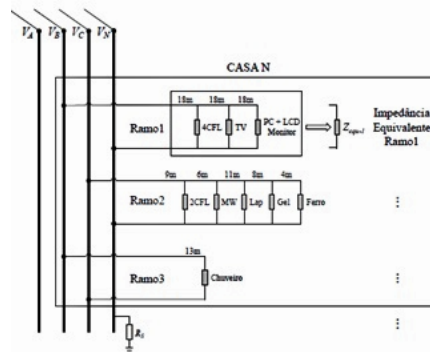


Figura 1.14: Ejemplo de circuito residencial detallado. Fuente [5]

Con esta distribución, los dispositivos en la red son clasificados en lineales y no lineales. Siendo los dispositivos no lineales fuentes de corrientes armónicas y los lineales son modelos con potencia constante en la frecuencia fundamental, con impedancia en las frecuencias armónicas.

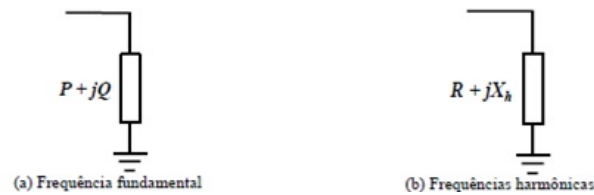


Figura 1.15: Modelo de dispositivos lineales. Fuente [5]

Los valores de P e Q pueden ser modelados con potencia constante, puesto que no tienen autonomía para mantener la tensión en un valor específico. Los parámetros para las frecuencias armónicas son calculados con las ecuaciones (1.7) y (1.8), donde V es la tensión aplicada al dispositivo [7].

$$R = \frac{P \times \|V\|^2}{P^2 + Q^2} \quad (1.7)$$

$$X_h = h \times \frac{Q \times \|V\|^2}{P^2 + Q^2} \quad (1.8)$$

Por último, este procedimiento realiza al asignación de las firmas eléctricas para los diversos electrodomésticos simulados y así es posible definir la curva de carga para todas las residencias simuladas, a fin de que la plataforma propuesta posea un alto nivel de detalle y posibilite un amplio alcance en estudios de redes de baja tensión, los perfiles de demanda de los electrodomésticos poseen una resolución de 1 segundo. En las simulaciones, sólo el pico de demanda causado por la partida de los motores es modelado analíticamente. Los demás parámetros de las firmas son modelados por un conjunto de variables aleatorias, sin embargo, la potencia nominal y el factor de potencia para cada dispositivo son proporcionados por el usuario dado el caso de que no tenga esa información, se utilizan los valores típicos predefinidos en la plataforma. Una vez definidos los períodos de operación de las cargas, la plataforma propuesta genera los perfiles de demanda para cada electrodoméstico, a través de un conjunto de variables aleatorias que poseen distribución normal y uniforme, las cuales se definieron a través de mediciones y estudios realizados en los diferentes electrodomésticos [5].

Después de determinar los perfiles de demanda y generación de los dispositivos presentes en la red, el escenario de simulación es definido, o sea, el problema se vuelve determinístico. Para el escenario definido se realiza el cálculo del flujo de carga en la frecuencia fundamental (60Hz) y las frecuencias armónicas. Para esto, antes de calcular el estado de operación de la red, es necesario conocer los modelos eléctricos utilizados para los dispositivos de la red secundaria [5].

Fue sugerido por [9], que los dispositivos no lineales, también sean modelados con potencia constante en la frecuencia fundamental, y con fuente de corriente en las frecuencias armónicas como se muestra a continuación,

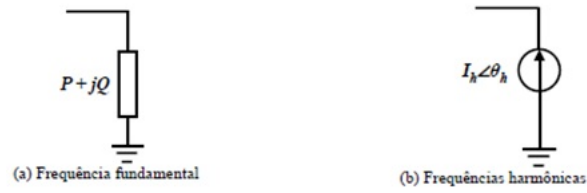


Figura 1.16: **Modelo de dispositivos no lineales.** Fuente [5]

Según [6], una de las formas para determinar las inyecciones de armónicos es utilizar mediciones realizadas en campo, por lo tanto, la magnitud y el ángulo de las fuentes de corriente ($I_h < \theta_h$) son calculadas de acuerdo con las ecuaciones (1.9) y (1.10). La corriente aplicada a los dispositivos es obtenida a través de la resolución de flujo de carga en la frecuencia fundamental, y h es el orden de armónicos analizada.

$$I_h = I_{h-spec} \times \frac{I_i}{I_{i-spec}} \quad (1.9)$$

$$\theta_h = \theta_{h-spec} + h \times (\theta_i - \theta_{i-spec}) \quad (1.10)$$

El prefijo *spec* se refiere al espectro medido para los diversos dispositivos en las diferentes frecuencias armónicas. El objetivo de estas ecuaciones es hacer una relación entre los parámetros calculados de los dispositivos ($I_h < \theta_h$), y los medidos.

Debido a que diversos aparatos eléctricos son constituidos por motores de inducción, se debe realizar el modelado de la partida de los motores que producen picos de corriente característicos, siendo estos picos de gran importancia en la detección de algún electrodoméstico, el pico de potencia consumida durante la partida de motores de inducción es modelado y explicado a continuación de acuerdo a su comportamiento dinámico,

$$J \frac{d\omega}{dt} = T_E - T_L \quad (1.11)$$

Donde J es el coeficiente de inercia del motor ($kg.m^2$), ω es la velocidad angular del motor (rad/seg), T_E es el torque electromagnético producido por el motor ($N.m$) y T_L es el troque de la carga aplicada en el exterior del motor ($N.m$) [7].

Inicialmente son utilizados valores típicos de los parámetros de los motores, como, impedancia, coefi-

ciente de inercia, deslizamiento (s_r) y eficiencia (η_r). Con eso, se calcula el torque nominal de acuerdo a la ecuación (2.12), donde ω_{sinc} es la velocidad angular síncrona del rotor (rad/seg) y P_{ent} es la potencia consumida por el motor (*Watts*) [6].

$$T_L = \frac{P_{salida}}{\omega_{mec-nom}} = \frac{\eta_r \times P_{ent}}{\omega_{sinc} \times (1 - s_r)} \quad (1.12)$$

La relación entre el torque y la velocidad del rotor depende del tipo de carga. Como la velocidad angular del motor varia suavemente del proceso dinámico, puede ser linealizada y representada por la siguiente expresión discreta, donde el paso de integración (t) es de 1 ciclo (16,7 ms para 60 Hz) [6].

$$\omega(t + \Delta t) = \omega(t) + \frac{\Delta t}{J} \times [T_E(t) - T_L(t)] \quad (1.13)$$

El instante exacto de partida del motor (t_0) ocurre dentro del intervalo de 1 segundo (resolución del tiempo de simulación de la plataforma). Este instante es determinado por un numero aleatorio con distribución uniforme entre 1 y 0.

$$t_0 = U(0, 1)seg \quad (1.14)$$

Una vez que el instante de partida del motor fue alcanzado, su velocidad angular y su correspondiente rozamiento deben ser utilizados para resolver la ecuación (1.13). Es importante resaltar que el deslizamiento inicial es 1, debido a la velocidad angular que es nula. Por último, cuando (1.15) sea satisfecha, la potencia demandada por el motor es alcanzada.

$$t + \Delta t = n \times 1 \quad (1.15)$$

Estructura de simulación: inicialmente, son cargados los datos de entrada, estos se dividen en dos archivos. El primero contiene los parámetros de la red, o sea, información de la red de distribución, tales como parámetros del transformador, parámetros de la línea de distribución, impedancias de tierra y los equivalentes de la red primaria. Cada parámetro posee un valor típico. El segundo archivo contiene la información de las conexiones internas de las residencias. El usuario apenas necesita informar cuales son los elementos existentes en cada compartimiento de la residencia. La única información eléctrica necesaria de los elementos son la potencia nominal y el factor de potencia. En el caso que el usuario no tenga la información se

utiliza los valores típicos. En seguida, se determina la solución comportamental de los elementos existentes en la red, es decir, el perfil de consumo y generación para un periodo de 24 horas [7].

Con esto, para cada instante (1 segundo) es obtenido de la red de frecuencia fundamental y posteriormente en las frecuencias armónicas, los resultados de la plataforma para dicho periodo. Toda esta estructura mencionada fue desarrollada en el software MATLAB. Dicho procedimiento es indicado en la figura 1.17 indicando un diagrama de los pasos sugeridos para realizar la estructura de simulación.

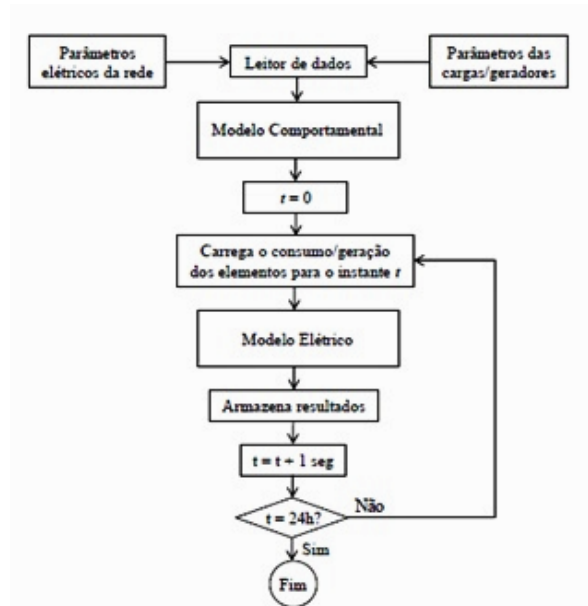


Figura 1.17: Diagrama del método de simulación propuesto. Fuente [5]

La simulación del flujo de carga armónica revela una enorme cantidad de resultados, tales como parámetros relacionados con la calidad de energía en la frecuencia fundamental y en las frecuencias armónicas. Este estudio permite analizar los siguientes parámetros:

- Perfil de Tensión;
- Perfil de Corriente;
- Perfil de Demanda;
- Consumo;
- Perfil de tensión y corriente en Neutro;
- Espectro Armónico;

- Perfil de Tensión y Corriente de neutral Armónica;
- Distorsión Armónica Individual de Tensión de Orden h (DIT_h);

$$DIT_h(\%) = \frac{V_h}{V_i} \times 100 \quad (1.16)$$

Donde V_h es la tensión armónica de orden h y V_i es la tensión fundamental.

- Distorsión Armónica total de tensión (DTC):

$$DTC(\%) = \sqrt{\frac{\sum I_h^2}{I_L}} \times 100 \quad (1.17)$$

De esta forma, DIT_h y DTC son calculados en relación al nivel de la carga en el sistema, con fin de formar una mejor visión sobre el impacto de los armónicos en la red. Esto evita interpretaciones erróneas de la misma, en la figura 1.18 se presenta un perfil de tensión de una residencia a lo largo de 24 horas, este perfil es transformado a una curva de probabilidad acumulativa.

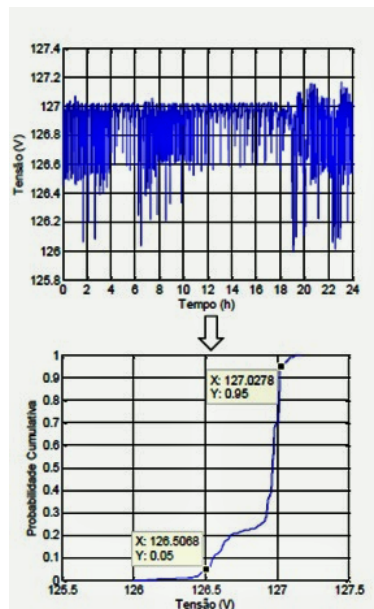


Figura 1.18: Perfil de tensión. Fuente [5]

Ahora bien, a nivel de panel de medición, en [10] se utiliza el método de encendido y apagado para la identificación de los dispositivos y sus parámetros en el tiempo de funcionamiento. Por lo tanto, se requiere información sobre el uso con respecto a las condiciones del dispositivo, por lo cual, el proceso de monitoreo debe consistir de tres etapas:

- Aprendizaje de las características de la carga;
- Adquisición de eventos;
- Identificación de cargas.

Entonces, se desarrolla un medidor de eventos, que su única función sea memorizar eventos en forma de parámetros de identificación para que después sean leídas y procesadas por una unidad computacional, estos parámetros corresponden a una variación actual del evento presente. Este tipo de detección es difícil de realizar con un dispositivo puramente analógico porque el problema es detectar variaciones de nivel, no un nivel nominal. Se pueden contemplar dos tipos de procedimientos de medición numérica:

Medición asíncrona: consiste en medir P y Q cíclicamente a intervalos regulares (12 ciclos), lo que reduce la visualización de una curva de carga. Sin embargo, la experiencia muestra que los eventos pueden ocurrir con diferencias de tiempo del orden de mili segundos. Esta probabilidad es grande cuanto mayor sea el número de aparatos en el sitio o cuando un aparato de ciclo corto esté funcionando. En estas condiciones, varios escenarios pueden hacer que la interpretación de la medición sea muy difícil, en particular: si ocurren varios eventos entre dos lecturas sucesivas, como por ejemplo, la medida incluye el momento en que ocurre el evento o comprende un tiempo transitorio mayor. Para evitar esto, se debe acortar el intervalo entre las mediciones, lo que conduce finalmente al método de medición continua que se describe a continuación.

Medición continua: Consiste en realizar una medición continua de la señal actual integrándola en un pequeño número de periodos (5 a 12 periodos) y comparando cada medición con la anterior. Si se detecta una variación, se puede analizar y los parámetros de identificación se pueden calcular localmente. Este método tiene dos ventajas, una de ellas es que la detección de eventos puede ser precisa ya que puede involucrar pruebas numéricas complejas, por otro lado, un cierto número de mediciones anteriores se pueden almacenar en la memoria, lo que permite que el evento se identifique localmente (la señal antes, durante y después de el evento está disponible), permite analizar los transitorios. Este último método ha sido utilizado para el prototipo experimental. Con dicha información finalmente se desarrolla un algoritmo de identificación basado en un sistema experto para formar una base de datos que enumera los parámetros de identificación de los diversos electrodomésticos y una base de datos de hechos que asocia un determinado método de identificación con cada tipo de aparato, explotando sus características más notables [10]. Las principales magnitudes que se pueden adquirir son, el valor de corriente efectivo, el valor de voltaje efectivo y la potencia (activa, reactiva y aparente). Dado que el módulo de tensión puede fluctuar con el tiempo, las potencias

pueden reducirse a una tensión de referencia fija U_{ref} , que se toma igual a la tensión nominal de la red. Otros datos que se pueden utilizar como firma de un dispositivo son, la forma de onda del tiempo transitorio cuando está encendido y los armónicos actuales producidos por el dispositivo.

Otro aspecto importante en el desarrollo del método es la resolución de la medición ya que, para identificar un aparato, su potencia debe ser claramente superior a la resolución mínima del dispositivo de medición. Además, la diferencia de potencia entre los dispositivos del sitio debe ser mayor que la misma resolución para no confundir este dispositivo con otro. En la práctica, los valores de U e i se derivan de una medida numérica, por ello una resolución mínima de 12 bits parece ser necesaria [13].

Teniendo en cuenta el hecho de que la potencia de un dispositivo es el resultado de dos mediciones, una antes de que se haya encendido y otra después, se puede demostrar que, con 12 bits, la precisión de la medición es aproximadamente 0.15 %, es decir, 15 vatios. Para un dispositivo calibrado a 10 KW máximo se requiere una mayor resolución para medir los armónicos [13]. La precisión con la que se miden también depende considerablemente de la tasa de armónicos, preexistente en el voltaje. El sistema de detección diseñado expuesto anteriormente, es satisfactorio para permitir que los eventos se detecten de manera efectiva, incluso los de baja amplitud (inferior al 0.2 % del umbral de calibración). Los problemas surgen básicamente cuando el umbral de detección es muy bajo (inferior a 50 W). Las fluctuaciones de la corriente y la deriva a veces conducen a un disparo repentino de la medición. También, se observó que la medición de la longitud del transitorio no siempre es confiable y se sostiene la creencia de que estos fenómenos pueden atribuirse a los arcos de contacto en los interruptores o los termostatos. En estos casos, también se ha medido a menudo la potencia reactiva distinta de cero [11]. Por último, cuando los valores de referencia y los márgenes de clasificación están bien seleccionados, se identifican más del 95 % de los eventos debido a dispositivos con ciclos de operación simples, como los que se presentan en las figuras anteriores [12].

De acuerdo con los métodos probabilistas en [14] desarrollan tres aplicaciones para transformar los datos de monitoreo de calidad de potencia (PQ) en información útil. Con el aumento del volumen de datos de PQ , extraer los valores de los datos es muy importante para las operaciones del sistema de energía. En primer lugar, la probabilidad acumulada de datos se aplica para certificar los límites de PQ de acuerdo a las normas nacionales de China. En segundo lugar, los datos de monitoreo de PQ cuentan tres tipos de bajadas de voltaje para mostrar las fallas de voltaje en la red local. Y en tercer lugar, el análisis de correlación se aplica para mostrar el impacto del problema de PQ del mal funcionamiento. Los fallos de funcionamiento de los condensadores/inductores son relevantes para la desviación de voltaje y la distorsión armónica, lo que

obviamente se muestra mediante los coeficientes de correlación. Es un buen intento de traducir los datos de monitoreo para ayudar a los operadores de red.

El coeficiente de correlación, muestra la correlación lineal de dos variables, el mayor coeficiente muestra la correlación más fuerte sin embargo no puede ser mayor que 1 y esta definido por:

$$\rho_{x,y} = \frac{\sigma(X,Y)}{\sigma_x \sigma_y} \quad (1.18)$$

donde:

- $\sigma(X,Y)$ es la covarianza de X,Y .
- σ_x es la desviación estándar de la variable X .
- σ_y es la desviación estándar de la variable Y .

Ahora bien, uno de los métodos más conocido y confiable para el análisis de señales es la transformada de Fourier, porque descompone una señal en sinusoides constitutivos de diferentes frecuencias, en [16] se emplean técnicas basadas en la comparación punto por punto de los valores *rms* de la señal distorsionada con su señal pura correspondiente y/o la transformación de los datos en el dominio de la frecuencia a través de la transformada de Fourier (FT). Matemáticamente, la FT es la suma de la señal $x(t)$ multiplicado por un exponencial complejo como se muestra a continuación:

$$X(\omega) = \int x(t)e^{-j\omega t} dt \quad (1.19)$$

Para un señal muestreada, la FT discreta se define como:

$$X(k) = \sum x(n) \exp\left(\frac{-j2\pi kn}{N}\right) \quad (1.20)$$

Donde, $x(n)$ es una secuencia de muestras de una señal de tiempo continuo $x(t)$ tomada cada t segundos para N muestras.

De acuerdo con las perturbaciones presentes en un sistema de potencia, para obtener más información de las señales, se requiere, la medición *rms* de las mismas como se define en la siguiente ecuación:

$$V_{rms} = \sqrt{\frac{1}{T} \int V^2 dt} \quad (1.21)$$

Sin embargo, la forma de onda descompuesta proporciona bandas de frecuencias no uniformes de octavo orden, por lo tanto, no es adecuado medir los valores *rms* con los armónicos individuales, sino descomponer en dos señales la distorsión presente, es decir, versiones detalladas y suavizadas mediante el uso del algoritmo FT propuesto.

El método consiste en:

1. La señal de entrada se descomponen en coeficientes de aproximación.
2. Los coeficientes se transforman el dominio de tiempo mediante el uso de FT.
3. Con el resultado obtenido, se definen las siguientes características:
 - Componente DC (V_{dc}).
 - Valor *rms* del componente fundamental (V_t).
 - Relación de la distorsión armónica total (*THD*).
 - Cambio de frecuencia fundamentas ΔF .

Para clasificar las variaciones de corta duración, se investigan las características de las perturbaciones midiendo y comparando los espectros de frecuencia antes y después de la transición de la perturbación. En resumen, el sistema de reconocimiento puede realizar tanto la extracción de la información de tiempo requerida como la medición *rms* de la señal distorsionada [16].

Dentro de este marco, el artículo [15] presenta un sistema de identificación de carga armónica en $P - Q$ para los diferentes tipos de cargas no lineales, para las cuales se utilizan técnicas de procesamiento de señales empleando el fractal y los análisis rápidos de la transformada de Fourier para caracterizar las firmas armónicas.

Extracción de características de firmas armónicas.

Las mejores características se pueden extraer directamente de un dominio seleccionado de frecuencia de tiempo, las características derivadas de la FFT y los análisis de la carga no lineal se basen en lo siguiente:

Distorsión armónica total (THD):

Esta medida es aplicable tanto al voltaje como a la corriente, THD corresponde para definir la importancia del contenido armónico de una señal alternativa. Matemáticamente en términos de corriente, está dado por,

$$THD_I = \frac{\sqrt{\sum I_h^2}}{I_1} \times 100\% \quad (1.22)$$

Donde, I_1 es la medida fundamental del componente de corriente y I_h es el componente de los armónicos.

Para voltaje se define de la misma manera, es decir:

$$THD_V = \frac{\sqrt{\sum V_h^2}}{V_1} \times 100\% \quad (1.23)$$

Estas ecuaciones son equivalentes a la que se muestra a continuación, la cuál es más directa y fácil de utilizar cuando se conoce el valor eficaz total [14]:

$$THD_I = \sqrt{\left(\frac{I_{rms}}{I_1}\right)^2 - 1} \times 100\% \quad (1.24)$$

Para armónicos individuales se tiene [14]:

$$IHD_n = \frac{V_n}{V_1} \times 100 \quad (1.25)$$

en donde V_n se define como el voltaje armónico de orden n .

Factor de Cresta:

Es la relación entre el pico de una forma de onda y su valor *rms*, generalmente para la corriente este valor es mayor que 1.41 y para el voltaje menor que 1,3 [13]. El factor de corriente para una forma de onda actual está dado por:

$$CFI = \frac{I_{pico}}{I_{rms}} \quad (1.26)$$

$$CFV = \frac{V_{pico}}{V_{rms}} \quad (1.27)$$

Forma o factor de distorsión:

Es la relación del valor *rms* de una forma de onda al *rms* del valor fundamental de la forma de onda, I_1 , y está dada por la ecuación (2.28). Normalmente, para una forma de onda sinusoidal, el factor de forma es típicamente 1,0. Sin embargo, los valores de factor de forma para cargas no lineales son generalmente

mayores que 1.5 [13].

$$DF = \frac{I_1}{I_{rms}} \quad (1.28)$$

Potencia de distorsión

En presencia de armónicos, la relación $S^2 - P^2 - Q^2 = 0$ no es válida, por lo tanto se define de la siguiente forma:

$$D = \sqrt{S^2 - P^2 - Q^2} \quad (1.29)$$

Factor de Potencia

El factor de potencia se define como la relación entre la potencia activa P y la potencia aparente S .

$$FP = \frac{P}{S} = \frac{P}{V_{rms} \times I_{rms}} \quad (1.30)$$

Para finalizar y de acuerdo a la literatura científica encontrada, los métodos para reconocer las cargas eléctricas marcan tendencia en predicción de eventos, análisis estadísticos de uso de los electrodomésticos, y análisis de formas de ondas de voltaje y corriente, pero se encuentran fallas en el momento de realizar la medición y no se tiene en cuenta problemas en la forma de adquisición de las señales por variaciones en las condiciones del sistema de potencia. En la literatura también se encontró que los problemas más frecuentes en la red actualmente son para ciertos tipos de cargas, ya que en los sistemas eléctricos existen cargas industriales y comerciales representativas que afectan el funcionamiento y características de operación, además, la distorsión armónica en las formas de onda de tensión y de corriente, afectan la calidad de la potencia eléctrica. Por ello, las fallencias comúnmente encontradas en la depuración de la información son las mencionadas a continuación, cambios dinámicos de las formas actuales de onda de voltaje y corriente debido a las fluctuaciones de las cargas conectadas en un mismo punto de medición, además, las formas de ondas resultantes presentan características diferentes a las características individuales de cada carga, esto se debe a que los estudios realizados analizan el comportamiento de las cargas de tres maneras, primero se estudia la red sin encender los electrodomésticos para relacionar los cambios que generan en la red en el instante que se encienda la carga, segundo se analizan las formas de onda de acuerdo al tiempo de uso de cada aparato y por último, de acuerdo al consumo de potencia de dichos aparatos, por lo cual el ambiente generalmente no

está del todo controlado además se cuenta con un punto común de medición donde están varios dispositivos funcionando simultáneamente, asimismo, las ventanas de tiempo de muestreo utilizados en la mayoría de la literatura son muy largos hasta de 24 horas con una frecuencia de muestreo de 1 s, por lo que no se puede obtener información adecuada de las cargas en estudio ya que las ondas resultantes pueden tener alteraciones por escasez de datos. Así pues, el proyecto aquí presentado se basa en un procedimiento que permita la asociación del perfil de carga de un circuito eléctrico en un ambiente controlado de laboratorio, a partir de identificación de las firmas de consumo de una serie de cargas instaladas. Para ello es necesario involucrar algunas características de los métodos encontrados, las tablas 1.3 y 1.4 muestran los parámetros y características para analizar las firmas de consumo encontradas en la búsqueda sistemática de los 30 artículos usados para fundamentar el desarrollo del proyecto.

Cuadro 1.3: Características y parámetros encontrados para análisis de firmas de consumo de la búsqueda sistemática. Fuente: Propia

Parámetros y características	Descripción	Número de menciones	Artículos
Características de la fuente.	- Tensión de alimentación.	1	[4].
Características de la carga.	- Características eléctricas de los equipos o electrodomésticos.	1	[4].
Características de la línea eléctrica.	- Tensión del servicio. - Frecuencia del servicio. - Número de fases.	3	[4], [5], [6] y [7].
Forma de onda de voltaje y corriente.	- Curvas espectrales de la señal de voltaje y corriente.	25	[1]-[18], [23], y [25]-[30].
Factor de potencia.	- Relación de fase de la curva de voltaje y de corriente.	12	[1]-[12].
Forma o factor de distorsión.	-Es la relación del valor <i>rms</i> de una forma de onda al <i>rms</i> del valor fundamental de la forma de onda.	18	[2]-[20].
Consumo de potencia, activa, reactiva y aparente.	- El consumo de potencia permite rastrear la forma de onda de consumo para seguir algunos equipos.	12	[3]-[15].
Distorsión armónica total.	- Definir la importancia del contenido armónico de una señal periódica y su nivel de contaminación.	25	[1]-[18], [23], y [25]-[30].
Desagregación de curvas.	- Se refiere a descomponer las señales obtenidas en partes identificables.	4	[4], [5], [6] y [7].

Cuadro 1.4: Características y parámetros encontrados para análisis de firmas de consumo de la búsqueda sistemática. Fuente: Propia

Continuación de la tabla 1.3			
Parámetros y características	Descripción	Número de menciones	Artículos
Varianza.	- Es una medida de dispersión para analizar la variabilidad de datos.	2	[21] y [22].
Factor de cresta.	- Es la relación entre el pico de una forma de onda y su valor <i>rms</i> de una señal periódica.	18	[2]-[18] y [30].
Correlación estadística.	- Entrega un coeficiente de correlación que es un valor cuantitativo de la relación entre dichas variables	3	[20], [22] y [24].
Probabilidad de incertidumbre.	- Se refiere a la probabilidad de error.	3	[4], [5], [6].
Ventana de muestreo de 12 ciclos para frecuencias de 60 Hz.	- De acuerdo a los estudios de forma de onda es necesario una ventana de tiempo de 200 ms.	2	[6], [10].
Resolución de medición.	- Se refiere a la resolución que debe tener el sistema de adquisición, en este caso de 12 bit.	1	[13]
Transformada de Fourier.	- Ayudan al estudio de los armónicos presentes en la señal.	10	[15], [16], [17] y [23]-[30]

Las tablas anteriores presentan los parámetros usados más frecuentemente para estudiar las firmas de consumo de acuerdo al análisis de las formas de onda tanto de voltaje y de corriente, los cuales serán evaluados mediante experimentos de laboratorio para determinar la importancia de cada uno de ellos, asociándolos al perfil de carga para evaluar la firma de consumo, esto se hará mediante un procedimiento propuesto que se explicara paso a paso en el capítulo 2, en este procedimiento se estudiarán las características encontradas para el análisis de las formas de consumo y se implementará un sistema hardware-software que permitirá evaluar dichos criterios mediante un entorno de MATLAB estableciendo pautas que permitan la identificación de cargas en un ambiente controlado.

Capítulo 2

Descripción del Procedimiento Propuesto.

Después de que se plantearon las bases teóricas dentro del método, se procedió a la aplicación de dichas técnicas de forma contextual al caso a investigar, en un principio se señalan los pasos a seguir en cada técnica figura 2.1, de cómo se va a hacer y cómo se va a trabajar.

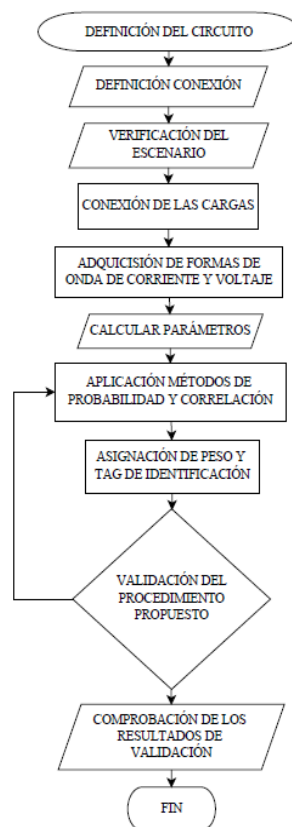


Figura 2.1: Diagrama de flujo del procedimiento propuesto. Fuente: Propia

Inicialmente, se define el circuito eléctrico de acuerdo a las características del mismo, donde se presentan los valores dados por el fabricante, esto con el fin de establecer límites para evitar cualquier contratiempo con las cargas seleccionadas. Además de tener en cuenta la conexión de la fuente y de las cargas, es decir, el tipo de conexión, delta o estrella, los esquemáticos de dichas configuraciones se muestran en la figura 2.2.

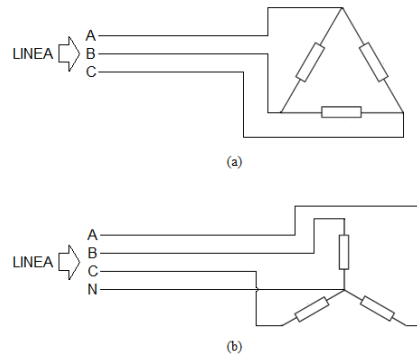


Figura 2.2: Esquemas de Conexión. (a) Configuración Delta. (b) Configuración Estrella. Fuente: Propia.

Igualmente se deben tener en cuenta las condiciones de la fuente de alimentación verificando que sólo se encuentren conectadas las cargas en estudio, además de esto, también se verifica por medio de simulación, que los valores de voltaje y corriente no excedan los límites establecidos por las cargas, el sensor y la planta, igualmente se plantea que es necesario que el escenario sea un ambiente controlado, para evitar pérdida de datos, que pueden afectar los resultados al establecer el perfil de carga, en la figura 2.3 se indican las curvas características de voltaje y corriente tomadas en un ambiente controlado y en un ambiente no controlado.

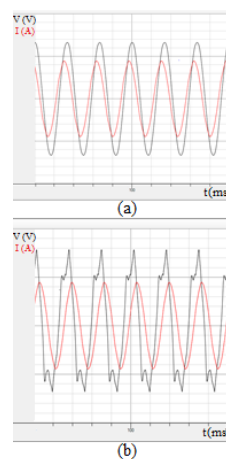


Figura 2.3: Curvas características de voltaje y corriente. (a) Ambiente controlado. (b) Ambiente no controlado. Fuente: Propia.

Seguidamente, se realiza la conexión del dispositivo de adquisición de datos para obtener las señales de voltaje y corriente, considerando si el sistema es monofásico, línea-neutro, o trifásico, tres fases y neutro. Para este proyecto se realizaron las mediciones en un sistema trifásico obteniendo las formas de onda de voltaje y corriente de una sola fase, con una frecuencia de 60 Hz , es recomendable por literatura que para el estudio se tomen 12 ciclos de la señal, esto equivale a una ventana de tiempo de 200 ms , así también, se define un tiempo de muestreo $20\text{ }\mu\text{s}$ esto equivale aproximadamente a 10.000 datos por señal, un ejemplo de las curvas de voltaje y corriente tomadas con estas condiciones se presenta en la figura 2.4.

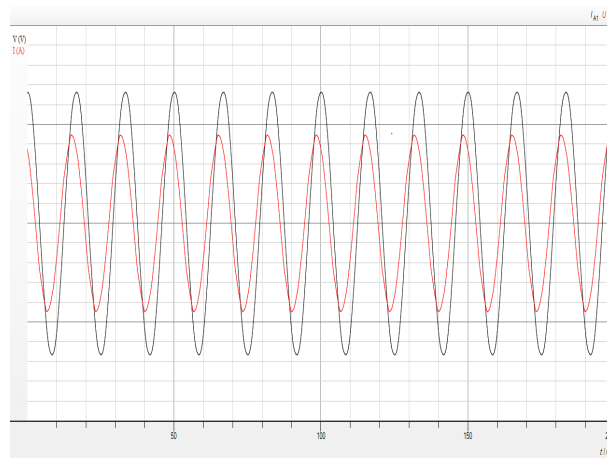


Figura 2.4: **Curvas características de voltaje y corriente con 12 ciclos a 60 Hz Fuente: Propia**

Después, con estos datos se calculan parámetros como, potencia activa, reactiva y aparente, factor de potencia, distorsión total armónica de corriente y voltaje, forma o distorsión de onda, valores *rms* tanto de corriente y voltaje, armónicos impares de la señal, y factor de cresta, dichos parámetros con sus respectivas formulas están presentes en la tabla 2.1, los cuales se analizan aplicando la correlación estadística con la fórmula (2.18), obteniendo el coeficiente de correlación encontrando la relación entre datos cuantificables significativos.

Cuadro 2.1: Parámetros de Evaluación del Perfil de Carga- Fuente: Propia

Parámetro	Definición	Ecuaciones
P	Potencia activa.	$P = \sqrt{3} * V * I * \cos(\varphi) \quad (2.1)$
Q	Potencia reactiva.	$Q = \sqrt{3} * V * I * \sen(\varphi) \quad (2.2)$
S	Potencia aparente.	$S = \sqrt{P^2 + Q^2} \quad (2.3)$
FP	Factor de Potencia.	El valor del factor de potencia se encuentra utilizando la ecuación (2.30).
THD	Distorsión total armónica de corriente y voltaje.	Se implementó las ecuaciones: (2.22) para corriente y (2.23) para voltaje
VP	Valor pico de voltaje.	$V_{pico-pico} = V_{rms} * 2\sqrt{2} \quad (2.4)$
FC	Factor de cresta de corriente y voltaje.	Se utilizaron las ecuaciones (2.26) para corriente y (2.27) para voltaje.
DF	Forma o factor de distorsión de corriente y voltaje.	La ecuación (2.28) fue utilizada para encontrar este parámetro.
ARM_I	Armónicos de corriente más significativos, los impares (1-19) [5].	Para calcular los armónicos se aplica la Transformada de Fourier definida por (2.20).
RMS	Valor rms de la corriente y voltaje.	$V_{rms} = V_{máximo} * \frac{1}{\sqrt{2}} \quad (2.5)$
		$I_{rms} = I_{máxima} * \frac{1}{\sqrt{2}} \quad (2.6)$
ARM_V	Armónicos de voltaje más significativos, los impares (1-19) [5].	Para calcular los armónicos se aplica la Transformada de Fourier definida por (2.20).

Ahora bien, para el desarrollo de selección de parámetros y criterios de mayor importancia se analizo detalladamente cada uno de los datos extraídos de la señal de corriente y voltaje, entonces se sabe que se estudiaron 30 datos de cada carga respectivamente y, se observó que aquellos que denotan mayor informa-

ción de la señal, ya que presentan variaciones significantes en su valor, igualmente, al realizar alteraciones en la carga o al cambiarla, además, durante el estudio de la literatura se encontró que los armónicos 3, 5 y 7 tanto de corriente como de voltaje presentan una importancia notable para definir una carga de acuerdo a su comportamiento, porque se presentan con mayor frecuencia en las formas de onda de corriente y voltaje. Por el contrario, los datos como los armónicos 9, 11, 13, 15, de corriente son valores muy despreciables prácticamente cero, es por ello que no se tienen en cuenta, otros datos como, forma o distorsión de onda comparten el mismo valor en todas las cargas, sus cambios frente a las diferentes muestras son aproximadamente de 0,001 lo cuál no representa importancia para determinar el perfil de carga, su valor en casi todos los casos es aproximadamente 1. Sin embargo, en el momento de realizar la asignación de pesos para cada parámetro se ordenaron los datos de mayor a menor importancia de acuerdo a su valor, y se determinó que los parámetros de corriente no presentan valores representativos para determinar la caracterización de la carga, también es notorio que los armónicos 5, 7 y 3 de voltaje presentan valores de mayor importancia en todas las cargas tanto en la conexión delta como estrella, también se obtuvo que el factor de potencia es muy sensible a los cambios de la carga, es por ello que es de vital importancia obtener dicho valor para determinar una carga, concluyendo así, dichos parámetros mas representativos se encuentran descritos en la tabla 2.2

Cuadro 2.2: Parámetros que presentan mayor efecto al hacer un tratamiento de las curvas de voltaje y corriente. Fuente: Propia.

Parámetro	Definición
FP	Factor de Potencia.
THD_I	Distorsión Armónica total de Corriente.
RMS_I	Valor <i>rms</i> de Corriente.
FC_I	Factor de Cresta Corriente.
ARM_3_I	Tercer Armónico de Corriente.
ARM_5_I	Quinto Armónico de Corriente.
ARM_7_I	Séptimo Armónico de Corriente.
THD_V	Distorsión Armónica total de Voltaje.
FC_V	Factor de Cresta Voltaje.
ARM_3_V	Tercer Armónico de Voltaje.
ARM_5_V	Quinto Armónico de Voltaje.
ARM_7_V	Séptimo Armónico de Voltaje.

También de las formulas establecidas en la tabla 2.3, se calculan la varianza (2.37) y desviación estándar

(2.38), con el fin de identificar el nivel de dispersión y la variabilidad de los parámetros, lo que permite identificar cuales tienen mayor presencia en la señal con menos cambios en su valor con este análisis, se encontró que para realizar el cálculo de los parámetros de identificación se deben medir mínimo 10 muestras de cada carga, para aplicar el procedimiento, debido a que los datos probabilistas deben tener muestras considerables para que los resultados sean confiables. Después, se calcula el error muestral (2.39), con los parámetros de mayor representación para definir rangos de pertenencia de las cargas y otorgar una etiqueta o tag para las mismas. Finalmente, se calcula el promedio o media aritmética (2.40) para determinar el peso de cada parámetro en la señal, es decir, cuánto equivale en valor porcentual los datos que definen la carga, como el valor de los parámetros varía de acuerdo a las características de la carga se obtienen diferentes pesos para las diferentes cargas conectadas, definiendo así el perfil de carga, dichos cálculos determinan el peso definitivo de los datos evaluado el nivel de importancia de cada parámetro en la señal medida.

La tabla 2.4 muestra los pesos de los parámetros calculados que tienen mayor presencia en cada carga, tanto en la conexión delta como estrella, como el valor de los parámetros varía de acuerdo a las características de la carga se obtienen diferentes pesos para las diferentes cargas conectadas, definiendo así el perfil de carga.

Cuadro 2.3: Fórmulas utilizada para métodos de correlación y estadística. Fuente:[25], [26]

Nombre	Fórmula
Varianza	$\alpha = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \quad (2.7)$ <ul style="list-style-type: none"> ■ x_i = cada dato medido. ■ \bar{x} = media de los datos. ■ n = número total de datos.
Desviación estándar	$s = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (2.8)$
Error muestral	$E = Z_{\alpha/2} \frac{s}{\sqrt{n}} \quad (2.9)$ <p>donde,</p> <ul style="list-style-type: none"> ■ s = desviación estándar. ■ n = tamaño de la muestra. ■ $Z_{\alpha/2}$ = valor para determinar el nivel de confianza. ■ α = porcentaje de riesgo.
Promedio o media aritmética	$Promedio = \frac{\sum X_i}{n} \quad (2.10)$ <p>de lo cual se tiene que,</p> <ul style="list-style-type: none"> ■ X_i = todos los datos. ■ n = número total de datos.

Cuadro 2.4: Pesos definitivos para las diferentes cargas. Fuente: Propia

PESOS CARGAS DELTA- 200ms							
Parámetros	Motor	RC	RL	RLC	Transformador	Transformador Reductor	Transformador Elevador
ARM_5_V	23,0%	30,0%	26,0%	24,0%	26,0%	28,0%	26,0%
FC_V	18,0%	22,0%	21,0%	18,0%	20,0%	21,0%	19,0%
FC_I	17,0%	22,0%	20,0%	17,0%	19,0%	20,0%	19,0%
RMS_I	14,0%	1,0%	2,0%	13,0%	3,0%	1,0%	6,0%
ARM_7_V	12,0%	12,0%	13,0%	11,0%	11,0%	10,0%	11,0%
FP	7,0%	4,0%	11,0%	10,0%	12,0%	13,0%	12,0%
ARM_3_V	6,0%	6,0%	5,0%	4,0%	6,0%	5,0%	5,0%
THD_V	1,0%	1,0%	1,0%	1,0%	1,0%	0,8%	0,8%
ARM_5_I	0,7%	0,5%	0,5%	0,8%	0,7%	0,2%	0,2%
THD_I	0,7%	1,0%	0,3%	1,0%	1,0%	0,8%	0,8%
ARM_3_I	0,3%	0,3%	0,1%	0,1%	0,2%	0,1%	0,1%
ARM_7_I	0,3%	0,2%	0,1%	0,1%	0,1%	0,1%	0,1%
PESOS CARGAS ESTRELLA- 200ms							
Parámetros	Motor	RC	RL	RLC	Transformador	Transformador Reductor	Transformador Elevador
ARM_5_V	25,0%	27,0%	24,0%	25,0%	26,0%	27,0%	27,0%
FC_V	21,0%	23,0%	23,0%	23,0%	22,0%	21,0%	21,0%
FC_I	20,0%	22,0%	23,0%	23,0%	21,0%	20,0%	21,0%
ARM_7_V	12,0%	16,0%	12,0%	11,0%	10,0%	11,0%	11,0%
FP	9,0%	4,0%	11,0%	12,0%	13,0%	12,0%	12,0%
ARM_3_V	6,0%	6,0%	4,0%	4,0%	5,0%	7,0%	5,0%
RMS_I	5,0%	0,7%	1,0%	1,0%	2,0%	0,4%	2,0%
THD_I	0,8%	0,7%	1,0%	0,5%	0,5%	1,0%	0,5%
THD_V	0,8%	0,3%	0,5%	0,2%	0,2%	0,2%	0,2%
ARM_3_I	0,2%	0,1%	0,2%	0,1%	0,1%	0,2%	0,1%
ARM_5_I	0,1%	0,1%	0,2%	0,1%	0,1%	0,1%	0,1%
ARM_7_I	0,1%	0,1%	0,1%	0,1%	0,1%	0,1%	0,1%

Por otro lado, el error muestral se define para determinar los rangos de identificación y poder otorgar la etiqueta o tag para cada carga, dicho valor debe ser sumado y restado al parámetro correspondiente al promedio de las 10 muestras tomadas para cada carga, donde la resta corresponde al rango inferior y la

suma corresponde al rango superior, en la tabla 2.5 se presenta el valor del error muestral para todas las cargas tanto en conexión delta como en conexión estrella y en la tabla 2.6 se indica la definición de la etiqueta de identificación.

Cuadro 2.5: Valor error muestral. Fuente: Propia

Error Muestral Cargas en Delta- 200ms							
Parámetros	Motor	RC	RL	RLC	Transformador	Transformador Reductor	Transformador Elevador
FP	9,05795E-17	4,52898E-17	9,05795E-17	9,05795E-17	9,05795E-17	0	9,05795E-17
THD_I	0,000949933	0,000978375	9,36243E-05	0,002144251	0,000802776	0,000685043	0,000127994
RMS_I	0,003851754	0,000165375	0,000123915	0,234480821	0,000282168	9,57627E-05	0,000519708
FC_I	0,002795868	0,005052304	0,000385306	0,00038933	0,004898845	0,009300595	0,002441554
ARM_3_I	0,000964435	5,307E-05	1,41501E-05	3,78738E-05	8,79206E-05	4,31656E-05	9,25718E-05
ARM_5_I	0,001322012	0,000123118	1,77287E-05	1,46387E-05	5,38679E-05	1,57267E-05	3,6631E-05
ARM_7_I	0,000646032	8,68979E-05	8,35694E-06	1,17004E-05	1,11746E-05	7,73029E-06	3,9999E-05
THD_V	0,000785178	0,000748699	0,000408038	0,000278297	0,000381112	0,000638761	0,000236479
FC_V	0,003401685	0,00267474	0,00187852	0,001204199	0,001210585	0,001906273	0,00137732
ARM_3_V	0,134699424	0,025980459	0,01045663	0,070152508	0,038323977	0,034537753	0,026249431
ARM_5_V	0,160578457	0,094173218	0,059412573	0,052362901	0,078277378	0,097779849	0,039558219
ARM_7_V	0,104370583	0,068891116	0,029334781	0,03910543	0,06139453	0,045632548	0,053577883
Error Muestral Cargas en Estrella- 200ms							
Parámetros	Motor	RC	RL	RLC	Transformador	Transformador Reductor	Transformador Elevador
ARM_5_V	0	4,52898E-17	0	0	9,05795E-17	9,05795E-17	9,05795E-17
FC_V	0,021145929	0,000978375	0,000974164	0,001976644	0,001987312	0,010196491	0,004291542
FC_I	0,003977015	0,000165375	0,000179995	0,00023695	0,000173968	0,000512468	0,004099579
ARM_7_V	0,013387868	0,005052304	0,002967892	0,002740464	0,007893342	0,045578704	0,002700853
FP	0,009267849	5,307E-05	7,02582E-05	8,72042E-05	4,60593E-05	0,00010613	0,000165912
ARM_3_V	0,001323936	0,000123118	3,92509E-05	3,80193E-05	3,81749E-05	8,84381E-06	0,000269339
RMS_I	0,000433149	8,68979E-05	1,59297E-05	1,5066E-05	2,08342E-05	7,88415E-06	4,29186E-05
THD_I	0,00063362	0,000748699	0,000321772	0,000555533	0,000940137	0,000763368	0,000296048
THD_V	0,002239471	0,00267474	0,002355443	0,002628277	0,002623717	0,003096602	0,001977612
ARM_3_I	0,025584646	0,025980459	0,075935408	0,108195199	0,073033941	0,104016037	0,079701607
ARM_5_I	0,178521818	0,094173218	0,066781388	0,111550465	0,121591341	0,101381085	0,051495411
ARM_7_I	0,095680255	0,068891116	0,046015247	0,074370261	0,101636854	0,119356955	0,068122813

Cuadro 2.6: Tag de identificación. Fuente: Propia

ID PARA CADA CARGA		
Carga	Configuración Delta	Configuración Estrella
Motor jaula de ardilla	MJA_101	MJA_102
Circuito RLC	RLC_101	RLC_102
Circuito RL	RL_101	RL_102
Circuito RC	RC_101	RC_102
Transformador	T_101	T_102
Transformador elevador	TE_101	TE_102
Transformador reductor	TR_101	TR_102

Al finalizar la asignación de pesos, tag's y rangos para cada carga, se establece la plantilla indicada en la figura 2.5, que contiene la información necesaria para lograr la identificación de las cargas seleccionadas, como, el tipo de carga, el tipo de conexión que puede ser delta o estrella, el valor de los pesos de cada parámetro, como también el valor de los rangos.

TIPO DE CARGA:			
CONEXIÓN:		_____	
ID:		_____	
Parámetro	Peso	Rango inferior	Rango superior
FP			
THD_I			
RMS_I			
FACTOR_CRESTA_I			
ARM_3_I			
ARM_5_I			
ARM_7_I			
THD_V			
FACTOR_CRESTA_V			
ARM_3_V			
ARM_5_V			
ARM_7_V			

Figura 2.5: Plantilla de identificación para las cargas ya analizadas. Fuente: Propia

Por último, se realiza la validación de lo anteriormente mencionado, realizando la obtención de las formas de onda de voltaje y corriente, verificando si la asignación de los pesos y etiquetas son adecuadas para la identificación de la carga, o por el contrario, al realizar cambios provocados por desbalances en el circuito,

la identificación no es posible, comprobando la sensibilidad del procedimiento.

La literatura utilizada para este procedimiento brindo las bases teóricas necesarias para llevar a cabo el correcto desarrollo del mismo, al establecer correctamente los parámetros adquiridos de las curvas de corriente y voltaje indicados en la tabla 2.1 y la selección de los parámetros de mayor importancia mostrados en la tabla 2.2, también, fijar los ciclos necesarios para adquirir la señal y que así no se pierda información de la misma, igualmente al establecer el tiempo de muestreo como indica el artículo [30]. Ahora bien, a la hora de aplicar los métodos de probabilidad y correlación indicados en la tabla 2.3, así como, la implementación de códigos en la plataforma Matlab indicados en los anexos B y D, se utilizaron conocimientos y experiencia adquiridos a lo largo de la vida universitaria. Es así, como gracias a la literatura utilizada en conjunto con los conocimientos adquiridos, se llega al correcto desarrollo del procedimiento planteado

Capítulo 3

APLICACIÓN DEL PROCEDIMIENTO PROPUESTO

En este capítulo se describirá el desarrollo del proyecto y la implementación del método propuesto de acuerdo a las características encontradas en el capítulo dos y a los objetivos de esta investigación.

Para el desarrollo de este proyecto se utilizó el laboratorio de máquinas eléctricas del departamento de Instrumentación y Control de la facultad de Ingeniería electrónica y Telecomunicaciones de la Universidad del Cauca, el cuál se seleccionó como un ambiente controlado para realizar las mediciones de las cargas necesarias, de acuerdo con el proyecto, como se describe en la figura 2.1.

3.1. Implementación del Sistema Hardware - Software

Para empezar, se seleccionaron los criterios de evaluación del perfil de carga basados en la bibliografía encontrada, dichos parámetros son derivados de la señal de voltaje y corriente los cuales se encuentran en la tabla 2.3.

Después, teniendo en cuenta las cargas que se encuentran disponibles en el laboratorio de máquinas eléctricas de la planta Lab-Volt EMS 8341-2 mostrada en la figura 3.1, se escogen las cargas mencionadas en la tabla 3.1 para el caso de estudio.



Figura 3.1: Planta Lab-Volt EMS 8341-2. Fuente: Propia.

Cuadro 3.1: Cargas disponibles en la planta Lab-Volt EMS 8341-2 para caso de Estudio

Cargas	Características
Circuito RC	Presenta valores de, $R = 1.200 \Omega$, $C = 2.2 \mu\text{Farads}$, 252 VAR- 120 V (240 Máx), 60 Hz y precisión de $\pm 5 \%$.
Motor Jaula de Ardilla	175 W, 1670 r/min, 208 V -1,2 A, 3 ϕ , 60 Hz.
Transformador 120 V / 120 V	60 VA, 120 / 208 /120 V, 0,5 / 0,3 / 0,5 A, 60Hz y 1 ϕ .
Transformador Reductor 120 V / 60 V	60 VA, 120 / 208 /120 V, 0,5 / 0,3 / 0,5 A, 60Hz y 1 ϕ .
Transformador Elevador 120 V / 180 V	60 VA, 120 / 208 /120 V, 0,5 / 0,3 / 0,5 A, 60Hz y 1 ϕ .
Circuito RLC	Presenta valores de , $R = 300 \Omega$, $L = 3.2 H$, $C = 8.8 \mu\text{Farads}$, 252 VAR- 120 V, 60 Hz, precisión de $\pm 5 \%$ - $Q = 10$.
Circuito RL	Presenta valores de , $R = 300 \Omega$, $L = 3.2 H$, 252 VAR- 120 V, 60 Hz, precisión de $\pm 5 \%$ - $Q = 10$.

La fuente de alimentación de la planta se caracteriza por:

- Tensión de alimentación trifásica de 220 V.
- Tensión de alimentación monofásica de 120 V.
- Neutro para la red en general.
- Tierra para la red en general.

Sin embargo, inicialmente para implementar el sistema DAQ, se realizó una búsqueda intensiva de tarjetas de adquisición de datos para el desarrollo del proyecto. Así, se plantea que un ordenador es un sistema digital, y las magnitudes que se desean medir son analógicas, por ello necesitamos un sistema que convierta señales analógicas a digitales, el cual es llamado ADC (Analog Digital Converter), además, se debe tener en cuenta el tiempo de muestreo, este es el tiempo que transcurre entre dos mediciones consecutivas, para el caso de este proyecto dicho tiempo tiene que ser del orden de los microsegundos (μs), para obtener los parámetros dados por la señal de manera correcta. Para la elección de la placa, en un primer escenario se escogió la placa ARDUINO MEGA figura 3.2, aunque su resolución es de 10 bits, se descartó, debido a que la placa trabaja con el tiempo del ordenador y esto conlleva a retardos en la toma de datos, con el código indicado en el Anexo B apartado B.1, se obtuvo el tiempo de muestreo figura 3.3 que tiene el ARDUINO MEGA 2560, por lo descrito anteriormente y por literatura se sabe que la ventana de tiempo recomendada para tomar los datos es de 200 ms, la placa tiene tiempos de medida de 112 micro segundos, esto equivale a aproximadamente 1.800 datos, los cuales no son suficientes, ya que, no se tendría toda la información de la curva característica, y esto influye en el cálculo de los parámetros necesarios para llevar a cabo este proyecto

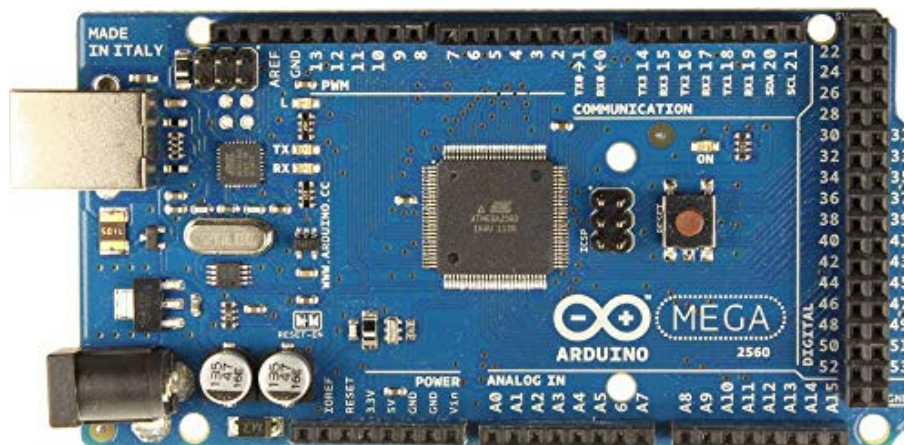


Figura 3.2: Placa Arduino Mega 2560. Fuente: Propia


```
COM5
|
Muestra: 1 Tiempo: 208µs
Muestra: 2 Tiempo: 108µs
Muestra: 3 Tiempo: 108µs
Muestra: 4 Tiempo: 112µs
Muestra: 5 Tiempo: 112µs
```

Figura 3.3: **Tiempo de muestreo placa Arduino. Fuente: Propia**

En un segundo escenario se consideró la placa PSoC 5 CY8CKIT-059 figura 3.4, el cual se programa en el software PSoC Creator 4.2, figura 3.5, con conexión en LabView el respectivo diagrama de bloques se define en la figura 3.6 y panel frontal figura 3.7, para la lectura de la señal, se hicieron pruebas para comprobar que esta tarjeta tiene un tiempo de muestreo más rápido, utilizando un potenciómetro como se indica en el esquema de la figura 3.8, cambiando el valor de este y observando dicho cambio en simultaneo figura 3.9, con el programa en LabView, por ende se escogió en un principio esta placa como sistema de adquisición de datos, pero más adelante en este capítulo se explica porque la señal dada por uno de los sensores, hizo necesaria la búsqueda de otros dispositivos para la adquisición de la señal.



Figura 3.4: **Placa PSoC 5 CY8CKIT-059**

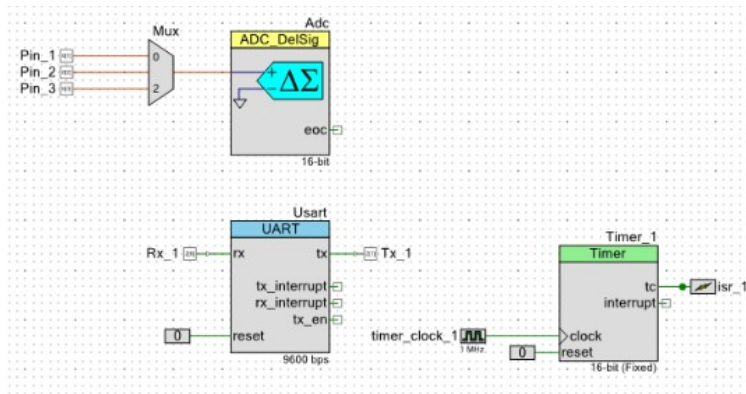


Figura 3.5: Diagrama de bloques elaborado en el Software PSoC Creator 4.2 para adquisición de la señal. Fuente: Propia

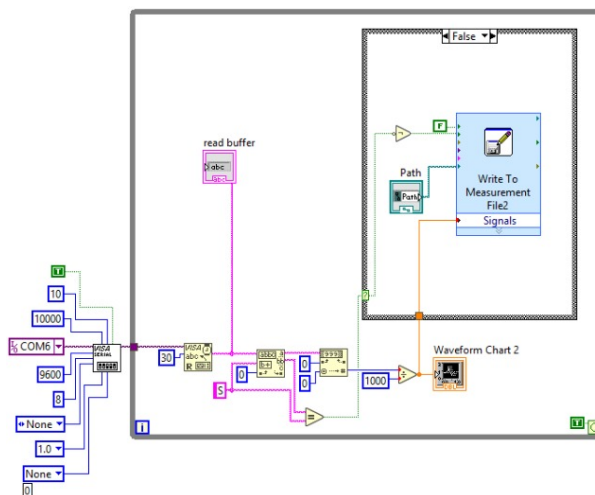


Figura 3.6: Diagrama en bloques de LabView para adquisición de la señal. Fuente: Propia

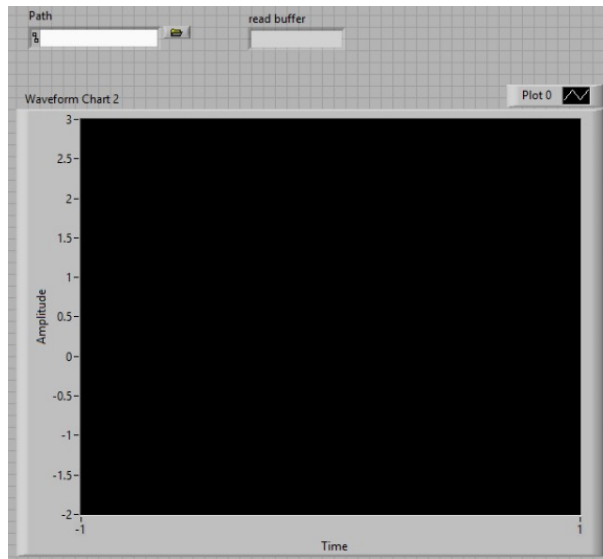


Figura 3.7: Panel Frontal en LabView para observar las señales obtenidas. Fuente: Propia

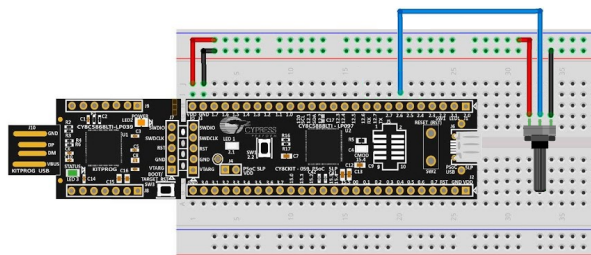


Figura 3.8: Esquema de conexión para comprobación de tiempo muestreo. Fuente: Propia

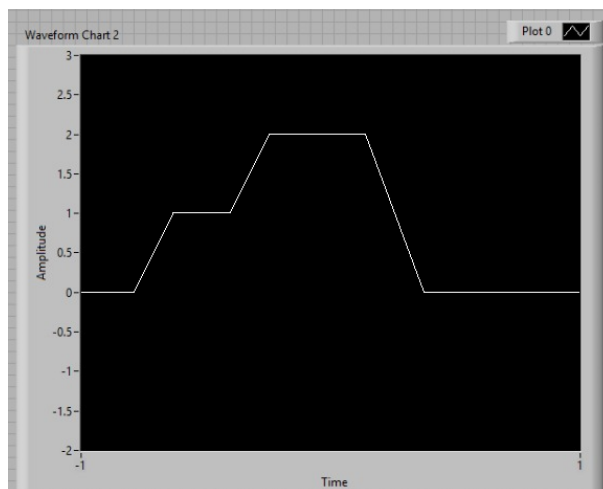


Figura 3.9: Cambio registrado en simultaneo de la prueba de tiempo de muestreo. Fuente: Propia

3.1.1. Búsqueda de sensores

Se deben emplear sensores que registren las curvas de voltaje y corriente con las propiedades respectivas de una red trifásica (220V a 60 Hz), sin modificaciones en las curvas características de la señal y que obtengan resultados en tiempo real. Los sensores que se seleccionaron después de analizar varias referencias, para la obtención de las señales y que además cumplieran con las características mencionadas, se mencionan a continuación:

En un primer escenario, para medir la corriente se utilizó el sensor de alta precisión MAX471 [24], algunas características de este sensor están presentes en la tabla 3.2, su esquemático de conexión y la configuración de pines se indica en la figura 3.10.

Cuadro 3.2: Características relevantes del sensor MAX471. Fuente: [24]

Utiliza el chip	MAX471
Rango de detección de corriente	0 A ~ 3 A
Resolución de voltaje	ADC de 10 bits
Compatibilidad con Arduino	SI

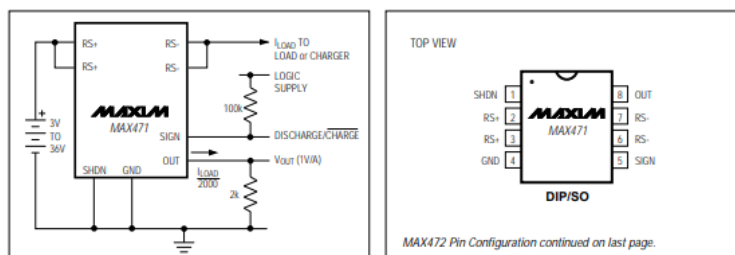


Figura 3.10: Esquema de conexión y configuración de pines del sensor MAZX471. Fuente: [24]

Se conecto este sensor a la fuente AC de la planta Lab-Volt y por medio del osciloscopio se observo el comportamiento indicado en la figura 3.11, gracias a los criterios asociados del perfil de carga de un circuito eléctrico, que se establecieron anteriormente se puede decir que el sensor es adecuado para la medición de corriere AC.

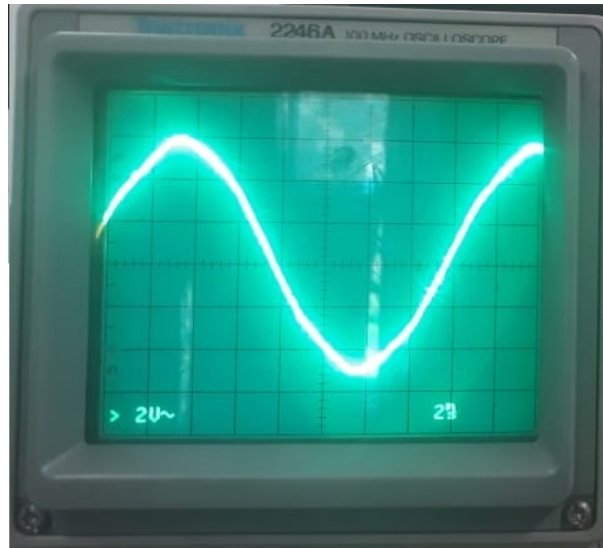


Figura 3.11: Curva de corriente obtenida del sensor MAX471 al conectarlo a la fuente AC de la planta Lab-Volt EMS 8341-2. Fuente:Propia

Ahora bien, para el caso del voltaje, se hizo una búsqueda más exhaustiva dado que el sensor tiene que soportar un voltaje de 220 V, entonces según esta característica el instrumento de medición que se utilizó fue el sensor ZMPT101B, este es un módulo transformador de voltaje [22], [23] es ideal para aplicaciones de monitoreo de energía, algunas características de este sensor están presentes en la tabla 3.3, el esquemático de conexión se muestra en la Figura 3.12:

Cuadro 3.3: Características sensor ZMPT101B. Fuente:[22]

Voltaje de alimentación	3.3 V ~ 5 VDC
Voltaje alterno de entrada	250 VAC máx.
Voltaje alterno de salida	Onda senoidal 5 VAC máx.
Precisión	0.2 %

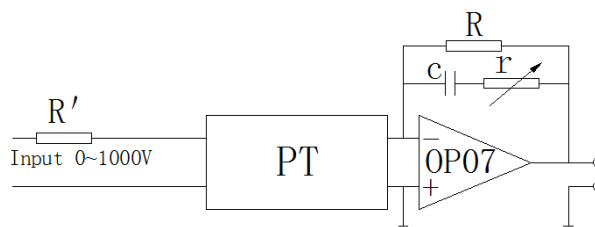


Figura 3.12: Esquemático sensor ZMPT101B. Fuente: [22]

Una vez conectado el sensor de voltaje directamente a la fuente AC de la planta Lab-Volt y a un osciloscopio, arrojó como resultado el comportamiento indicado en la figura 3.13, se puede determinar que la señal

no es la adecuada para seguir un tratamiento ya que presenta mucho ruido y cortada lo que puede representar pérdidas de datos de la señal lo que no es beneficioso para el tratamiento de las formas de ondas.

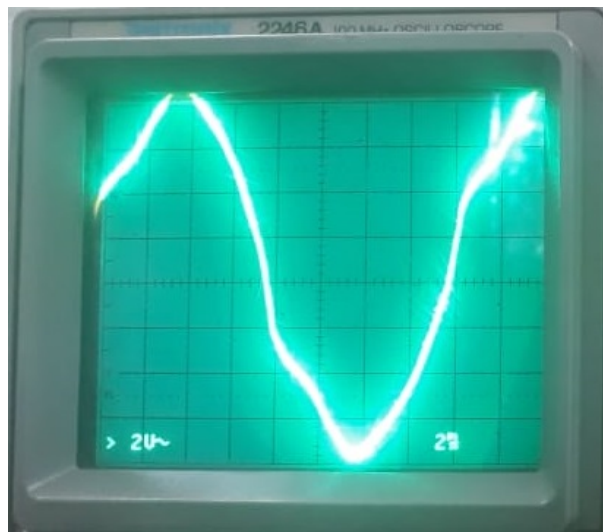


Figura 3.13: Curva de voltaje obtenida del sensor ZMPT101B al conectarlo a la fuente AC de la planta Lab-Volt EMS 8341-2. Fuente: Propia

Finalmente, luego de una búsqueda exhaustiva y de descartar equipos tales como, variac monofásico, transformadores de 220 V a 12 V con amplificadores operacionales para alcanzar los 5 V requeridos por las placas para obtener las curvas de corriente y voltaje, se encontró el sensor CASSY 2 descrito en el ANEXO A, en el departamento de física de la Universidad del Cauca, así, se realizó una gestión de préstamo de este la cual se aprobó para el desarrollo de este proyecto.

Entonces, una vez se determinó el equipo para el sistema DAQ se realizan las conexiones respectivas de la fuente y circuito de carga. También se determinó las condiciones de medición, teniendo en cuenta las características de las cargas y la planta mencionadas anteriormente, además, el equipo utilizado para la adquisición de datos soporta corrientes menores a 3 Amperios. Antes de realizar la adquisición de datos de las señales de corriente y voltaje, se tuvo en cuenta que el ambiente de medición sea controlado como es sugerido por [20], es decir, que no hayan más cargas conectadas en el laboratorio y que todas las muestras sean tomadas bajo las mismas condiciones de alimentación, para obtener sólo la señal de la carga en estudio.

En resumen, se realiza una conexión en delta o estrella de la red trifásica de la planta figura 2.2, conectando para la medición y adquisición de datos el sensor CASSY 2 – 524 013, como se observa en la figura 3.15.

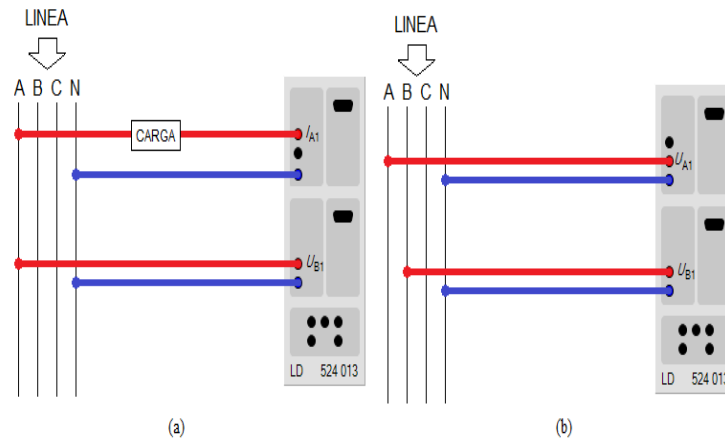


Figura 3.14: Sistema DAQ sensor CASSY 2 - 524 013. (a) Esquema de conexión para medir la curva característica de corriente. (b) Esquema de conexión para medir la curva característica de voltaje. Fuente: Propia.

1. Voltaje fuente = 110 V.
2. Frecuencia = 60 Hz.
3. Tiempo de muestreo = 20 μs en 200 ms.

El tiempo de muestreo fue determinado realizando pruebas de campo variando el número de ciclos de señal, inicialmente, se tuvo en cuenta lo encontrado en la literatura, se tomaron 12 ciclos de señal (200ms) con una frecuencia de 60 Hz, sin embargo, se realizaron pruebas con 6 (100 ms) y 18 (300 ms) ciclos para cada carga, se tomaron 10 muestras de cada una, los parámetros encontrados en dichas mediciones se analizaron en EXCEL aplicando la varianza para cada dato, esto permitió observar el grado de variabilidad y dispersión en cada tiempo de muestreo, los cambios no son muy grandes, no obstante, para los criterios de identificación seleccionados, tabla 2.3, se encontró que tienen menor varianza al tomar sólo 12 ciclos de la señal, como se explica en el Anexo C, así, se realizan las mediciones respectivas de las formas de onda de corriente y voltaje para cada carga.

3.2. Criterios de Identificación para Determinar el Perfil de Carga

En primera instancia, se realiza el experimento teniendo en cuenta una referencia de carga tipo RLC, a ella se conecta una carga de las ya definidas en la tabla 3.1, realizando 10 muestras del experimento y variando los valores del circuito de referencia para observar cambios en el comportamiento de carga

conectada. Durante el experimento se observó que los parámetros calculados que más destacan en la señal de la carga son los mencionados en la tabla 2.2, por ejemplo, para un motor, figura 3.16 fuente propia, los valores mencionados son los que se presentan con mayor frecuencia en las mediciones de las señales.

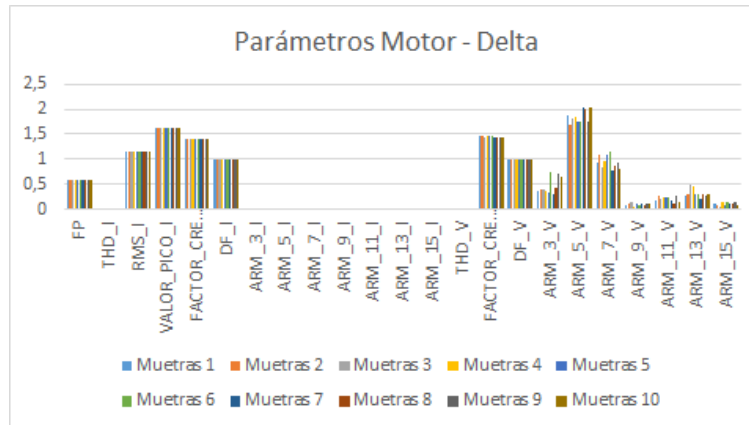


Figura 3.15: Parámetros con mas presencia en las curvas de voltaje y corriente obtenidas del Motor rotor jaula de ardilla en delta. Fuente: Propia.

Seguidamente, se realizaron mediciones con el mismo número de muestras, pero de la carga sola para evaluar el comportamiento. Ahora bien, teniendo las dos señales, se aplicó una resta de señales es decir, a las curvas de voltaje y corriente del circuito referencia más carga (motor), parte superior figura 3.17, se resta la curva de la referencia (RLC) para obtener la curva de la carga sola, como se muestra en la figura 3.17 y comparar el comportamiento en los dos escenarios, en la figura 3.18, presenta la comparación de los valores obtenidos de los parámetros en los casos mencionados, aquí se observó que tienen valores similares con una correlación alta entre ellos, lo que sirvió para determinar cómo realizar las mediciones, es decir, medir directamente de la carga.

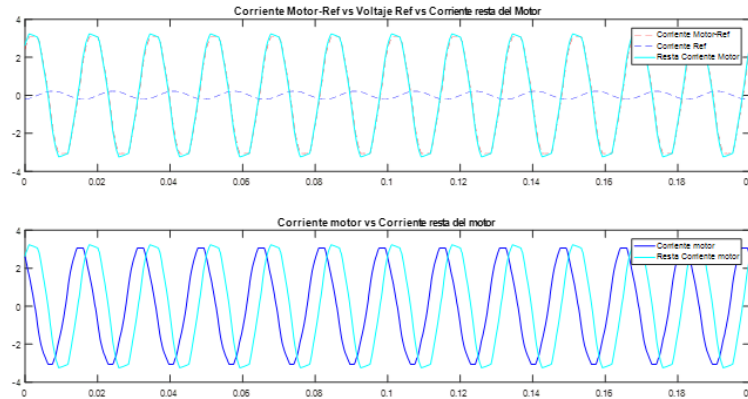


Figura 3.16: Curvas de corriente, referencia más carga (motor) y el diferencial. Fuente: Propia.

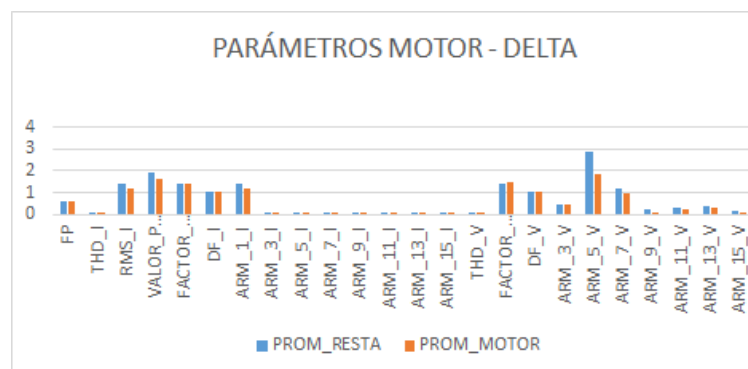


Figura 3.17: Promedio de los parámetros obtenidos de la carga y del diferencial correspondientes a un Motor rotor jaula de ardilla en delta. Fuente: Propia.

Esto permitió agilizar las mediciones y la extracción de parámetros de identificación. En el Anexo D, se encuentra detalladamente la explicación de los datos obtenidos al realizar el experimento. De esta manera, se hicieron simulaciones en el entorno SIMULINK para verificar que los datos de operación sean los adecuados para el sistema y el dispositivo de medición, entonces una vez realizado la comparación, se ejecutó la conexión de las cargas junto con el sensor para realizar la adquisición de datos y calcular los parámetros de la señal.



Figura 3.18: Esquema de conexión para un motor rotor jaula de ardilla. Fuente Propia.

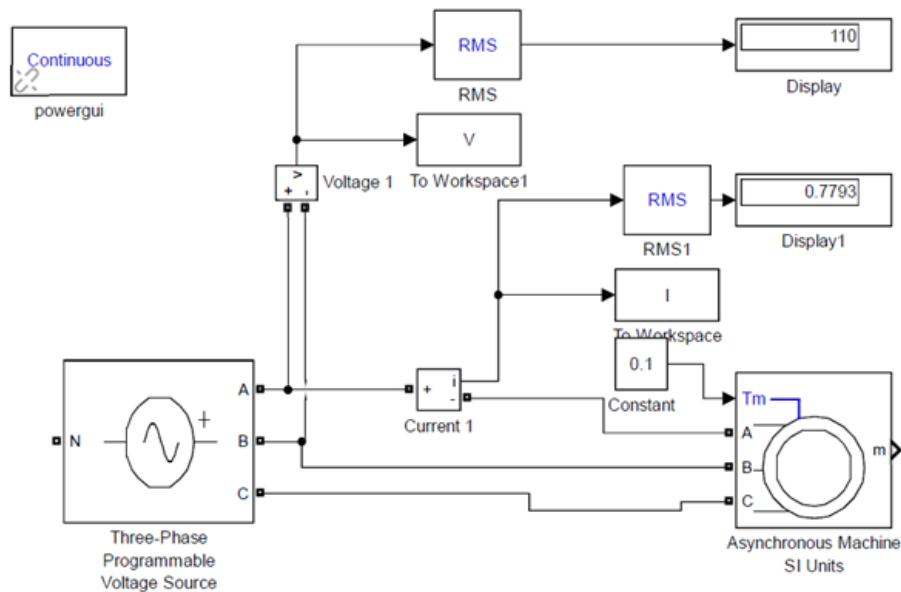


Figura 3.19: Diagrama en SIMULINK correspondiente a un motor rotor jaula de ardilla indicando los valores de voltaje y corriente correspondientes. Fuente: Propia

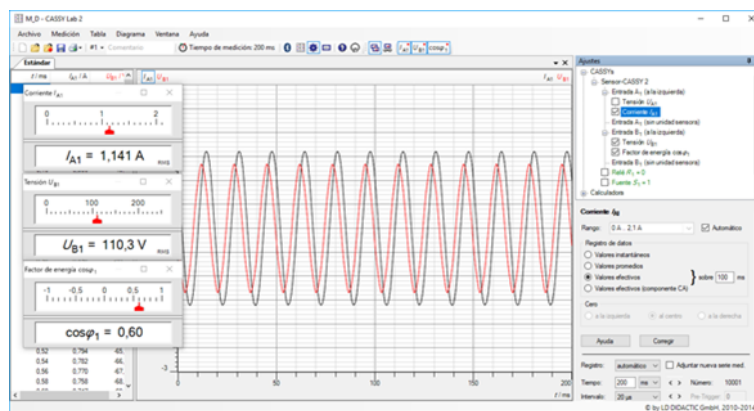


Figura 3.20: Señales de voltaje y corriente medidas para el motor rotor jaula de ardilla con sensor CASSY 2. Fuente: Propia

Las figuras 3.19 y 3.20 muestran la conexión y simulación para un motor rotor jaula de ardilla, los valores *RMS* de corriente y voltaje son verificados para no superar la corriente máxima circulante en el circuito, en la figura 3.21 se encuentra las formas de onda de corriente y voltaje y los valores pico de las señales, los cuales son congruentes con los datos de la simulación. Esto se realizó para todas las cargas en cuestión.

Después, con los datos obtenidos de cada carga se extraen los valores para cada parámetro de acuerdo a la misma, en la tabla 3.5 se enuncian los criterios de selección para el perfil de carga, de acuerdo a las 10 muestras se usó un método de probabilidad (Anexo F) para determinar el peso de importancia para

cada parámetro seleccionado, así, se encontró que los parámetros que son más determinantes para definir una carga son los presentados en la figura 3.22 tanto para conexión delta o estrella. Se pueden observar las variaciones que los parámetros tienen frente a las distintas cargas conectadas, y los que tienen mayor presencia en la señal para determinar dicha carga.

Cuadro 3.4: Parámetros obtenidos para las 7 cargas de estudio y establecer su perfil de carga. Fuente: Propia

Criterios Perfil de Carga	Motor	RLC	RL	RC	Transformador	Transformador Reductor	Transformador Elevador
FP	0,6	0,84	0,77	0,27	0,87	0,87	0,89
THD_I	0,0131	0,0123	0,0055	0,0301	0,0118	0,0079	0,0261
FC_I	1,4030	1,4162	1,4131	1,4606	1,4141	1,3980	1,4085
ARM_3_I	0,0054	0,0003	0,0001	0,0004	0,0009	0,0011	0,0010
ARM_5_I	0,0137	0,0009	0,0007	0,0030	0,0023	0,0028	0,0016
ARM_7_I	0,0014	0,0002	0,0001	0,0010	0,0003	0,0017	0,0005
RMS_I	1,1542	1,0580	0,1494	0,1107	0,2228	0,4676	0,0815
THD_V	0,0199	0,0198	0,0195	0,0199	0,0196	0,0201	0,0193
FC_V	1,4477	1,4501	1,4497	1,4489	1,4502	1,4513	1,4491
ARM_3_V	0,4703	0,3563	0,3439	0,4047	0,4619	0,4114	0,3895
ARM_5_V	1,8543	1,9143	1,8651	1,9423	1,9031	1,9759	1,9178
ARM_7_V	0,9464	0,8760	0,9239	0,8401	0,8139	0,8513	0,7447

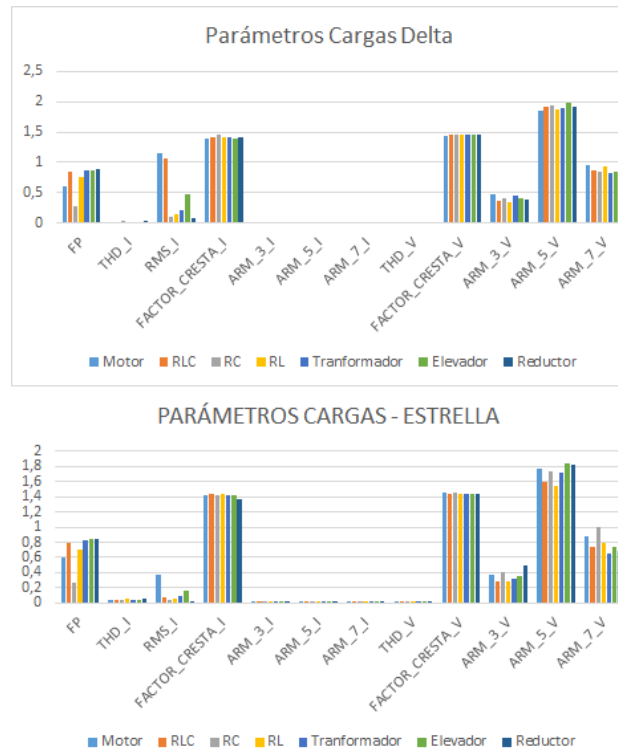


Figura 3.21: **Parámetros mas relevantes de las 7 cargas de estudio en conexión delta y estrella. Fuente: Propia**

Con el análisis de los datos expuestos anteriormente, se determinó que los parámetros de mayor importancia son los que deben tener mayor peso para definir el perfil de carga, en la figura 3.23, se presentan los pesos para cada parámetro evidenciando cuáles son los más representativos para cada carga y su comportamiento de acuerdo a la misma, es decir, el armónico 5 de voltaje tanto en la conexión delta y estrella es el valor más importante para definir una carga, sin embargo, varía de acuerdo a la naturaleza de la carga, así pues para todos los parámetros, también se evidencio que los armónicos de corriente tienen baja influencia para definir una carga, dichos pesos son necesarios para determinar rangos para cada una de las cargas, así, en MATLAB (Anexo F) son usados para clasificar las cargas en estudio. Por último, se mostrará en pantalla un mensaje indicando el ID correspondiente al tipo de carga, o por el contrario no se encuentra dentro de los rangos de clasificación por lo cuál no se puede determinar, en este caso se mostrará una X en pantalla, esto conlleva a realizar todo el procedimiento para dicha carga y poder identificar su perfil.

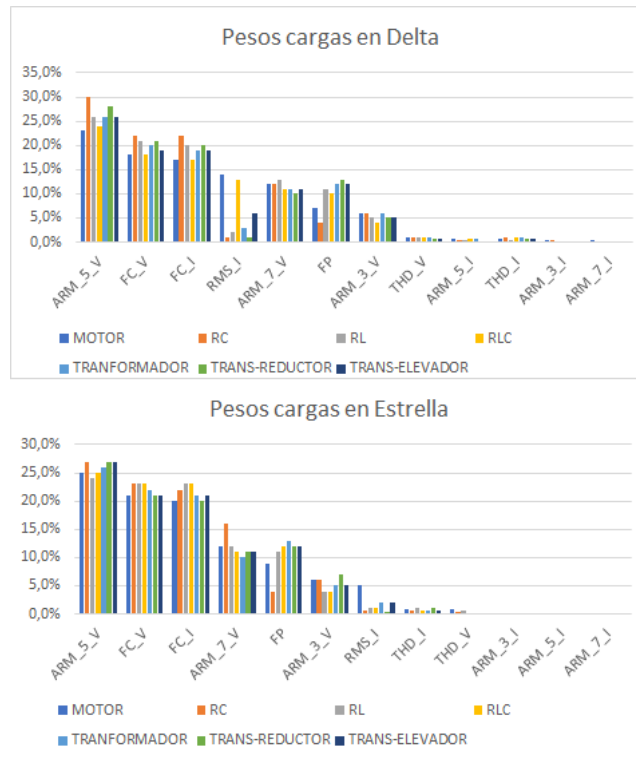


Figura 3.22: Pesos establecidos para las cargas de estudio en conexión delta y estrella. Fuente: Propia

Capítulo 4

VALIDACIÓN Y RESULTADOS DEL PROCEDIMIENTO PROPUESTO

4.1. Resultados

Para la aplicación del método se tomaron en total 7 cargas, mencionadas en la tabla 3.1 y se realizaron las conexiones mostradas anteriormente, a continuación se presentaran los resultados de la medición de cada una de ellas y el valor de los criterios de evaluación de las mismas, así mismo los resultados obtenidos en el entorno de MATLAB después de realizar la identificación de cada una.

4.1.1. Motor Jaula de Ardilla

En la figura 4.1 presenta la conexión del motor para realizar el procedimiento, las curva de voltaje (línea roja) y corriente (línea negra) medidas con el sensor CASSY Lab 2 se muestran en la figura 4.2 y las tablas 4.1, 4.2 contienen los datos calculados para identificar el perfil de carga de un motor tipo jaula de ardilla en conexión delta y estrella respectivamente, estos datos son procesados por el código de MATLAB expuesto en el Anexo G que mostrará un mensaje que dirá que carga está conectada, figura 4.3.



Figura 4.1: Esquema de conexión para el motor rotor jaula de ardilla. Fuente: Propia

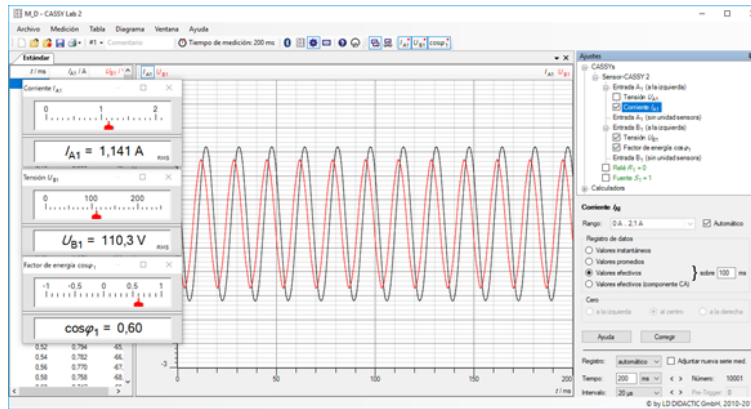


Figura 4.2: **Curvas características de voltaje y corriente para el Motor rotor jaula de ardilla. Fuente Propia.**

MATLAB Command Window

```
MJA_101
>>
```

Figura 4.3: **Identificación del Motor rotor jaula de ardilla en el entorno MATLAB. Fuente: Propia**

Cuadro 4.1: Criterios establecidos para el perfil de carga del motor rotor jaula de ardilla, conexión delta. Fuente: Propia

Motor Rotor Jaula de Ardilla en conexión Delta							
	Promedio	Peso	Varianza	Desvet	Error Muestreal	LSC	LIC
FP	0,6	7,56 %	1,2326E-32	1,11022E-16	9,05795E-17	0,6000	0,6000
THD_I	0,01310469	0,16 %	9,75875E-07	0,001164322	0,000949933	0,0154	0,0100
RMS_I	1,15427636	14,55 %	2,02305E-05	0,004721052	0,003851754	1,1660	1,1421
FC_I	1,40309001	17,69 %	1,27962E-05	0,003426865	0,002795868	1,4127	1,3950
ARM_3_I	0,00546391	0,06 %	1,204E-06	0,001182097	0,000964435	0,0081	0,0030
ARM_5_I	0,01373431	0,17 %	9,68163E-07	0,001620376	0,001322012	0,0164	0,0081
ARM_7_I	0,00145168	0,01 %	4,80812E-07	0,000791834	0,000646032	0,0035	-0,0001
THD_V	0,01990897	0,25 %	3,6837E-07	0,000962384	0,000785178	0,0218	0,0166
FC_V	1,44778656	18,25 %	1,49149E-05	0,004169408	0,003401685	1,4567	1,4345
ARM_3_V	0,47037867	5,93 %	0,025858335	0,165099605	0,134699424	0,8900	0,1607
ARM_5_V	1,85438496	23,38 %	0,013844639	0,19681925	0,160578457	2,1926	1,1554
ARM_7_V	0,94649047	11,93 %	0,015934763	0,127925878	0,104370583	1,2679	0,6618

Cuadro 4.2: Criterios establecidos para el perfil de carga del motor rotor jaula de ardilla, conexión estrella. Fuente: Propia

Motor Rotor Jaula de Ardilla en conexión Estrella							
	Promedio	Peso	Varianza	Desvet	Error Muestreal	LSC	LIC
FP	0,66	9,42 %	0	0	0	0,6600	0,6600
THD_I	0,042223141	0,60 %	0,00067176	0,025918333	0,021145929	0,1120	0,0033
RMS_I	0,378991157	5,41 %	2,37616E-05	0,004874583	0,003977015	0,3875	0,3623
FC_I	1,413546976	20,17 %	0,000269267	0,016409362	0,013387868	1,4644	1,3796
ARM_3_I	0,011417257	0,16 %	0,000129038	0,011359501	0,009267849	0,0409	-0,0060
ARM_5_I	0,005350285	0,07 %	2,63326E-06	0,001622733	0,001323936	0,0095	0,0025
ARM_7_I	0,002093974	0,03 %	2,81862E-07	0,000530906	0,000433149	0,0039	0,0011
THD_V	0,019368201	0,27 %	6,03139E-07	0,000776621	0,00063362	0,0209	0,0176
FC_V	1,449399417	20,68 %	7,53445E-06	0,002744895	0,002239471	1,4549	1,4399
ARM_3_V	0,366310245	5,22 %	0,000983376	0,03135882	0,025584646	0,4425	0,2976
ARM_5_V	1,776130756	25,35 %	0,047878793	0,218812231	0,178521818	2,1953	1,2109
ARM_7_V	0,880860285	12,57 %	0,013753247	0,117274237	0,095680255	1,2067	0,6547

4.1.2. Circuito RLC

En la figura 4.4 muestra igualmente, la conexión para un circuito RLC, la curva de voltaje (línea roja) y corriente (línea negra) medida con el sensor CASSY Lab 2 es presentada en la figura 4.5, las tablas 4.3, 4.4 contienen los datos calculados que identifican el perfil de carga del circuito RLC en conexión delta y estrella respectivamente, estos datos son procesados por el código de MATLAB expuesto en el Anexo G que mostrará un mensaje que dirá el tipo de carga, figura 4.6.

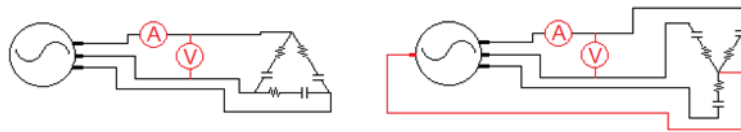


Figura 4.4: Esquema de conexión para el circuito RLC. Fuente Propia

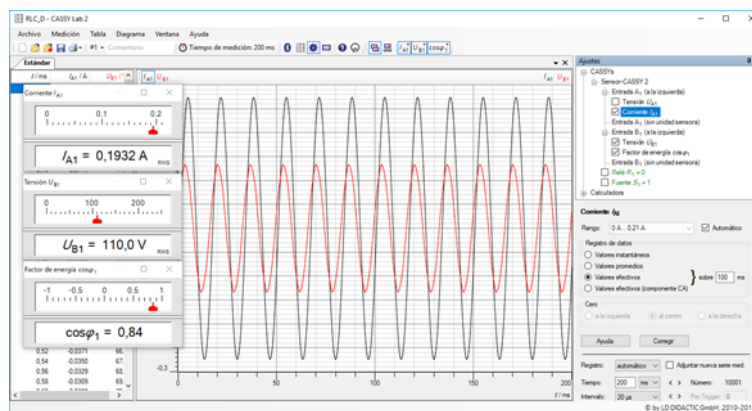


Figura 4.5: Curvas características de voltaje y corriente para el circuito RLC. Fuente: Propia

MATLAB Command Window

```
RLC_101
>>
```

Figura 4.6: Identificación del circuito RLC en el entorno MATLAB. Fuente: Propia

Cuadro 4.3: Criterios establecidos para el perfil de carga del circuito RLC, conexión delta. Fuente: Propia

Circuito RLC en conexión Delta							
	Promedio	Peso	Varianza	Desvet	Error Muestral	LSC	LIC
FP	0,84	10,57%	1,2326E-32	1,11022E-16	9,05795E-17	0,8400	0,8400
THD_I	0,012177154	0,153%	1,0233E-08	0,002628185	0,002144251	0,0166	0,0030
RMS_I	1,057170805	13,30%	2,16781E-08	0,287400567	0,234480821	1,3966	-0,0394
FC_I	1,416211297	17,82%	2,27718E-07	0,000477198	0,00038933	1,4175	1,4150
ARM_3_I	0,000324276	0,004%	2,15495E-09	4,64215E-05	3,78738E-05	0,0005	0,0002
ARM_5_I	0,000903166	0,011%	3,21935E-10	1,79425E-05	1,46387E-05	0,0009	0,0009
ARM_7_I	0,000255796	0,003%	2,05664E-10	1,4341E-05	1,17004E-05	0,0003	0,0002
THD_V	0,019834596	0,250%	1,16353E-07	0,000341105	0,000278297	0,0207	0,0189
FC_V	1,450125566	18,25%	2,1785E-06	0,001475973	0,001204199	1,4542	1,4469
ARM_3_V	0,35632634	4,486%	0,007393447	0,085985159	0,070152508	0,5484	0,1019
ARM_5_V	1,914388097	24,09%	0,004119154	0,064180632	0,052362901	2,0489	1,7271
ARM_7_V	0,876015466	11,02%	0,00229739	0,047931097	0,03910543	1,0233	0,7779

Cuadro 4.4: Criterios establecidos para el perfil de carga del circuito RLC, conexión estrella. Fuente: Propia

Circuito RLC en conexión Estrella							
	Promedio	Peso	Varianza	Desvet	Error Muestral	LSC	LIC
FP	0,79	12,30%	0	0	0	0,7900	0,7900
THD_I	0,04344092	0,676%	5,86972E-06	0,002422751	0,001976644	0,0484	0,0363
RMS_I	0,073949979	1,151%	8,43476E-08	0,000290427	0,00023695	0,0747	0,0733
FC_I	1,443607491	22,47%	1,12826E-05	0,003358957	0,002740464	1,4521	1,4368
ARM_3_I	0,002043655	0,032%	1,14245E-08	0,000106885	8,72042E-05	0,0023	0,0018
ARM_5_I	0,000769035	0,012%	2,17155E-09	4,65999E-05	3,80193E-05	0,0009	0,0007
ARM_7_I	9,38383E-05	0,001%	3,41E-10	1,84662E-05	1,5066E-05	0,0001	0,0001
THD_V	0,017027382	0,265%	4,63639E-07	0,00068091	0,000555533	0,0183	0,0152
FC_V	1,438464302	22,39%	1,03777E-05	0,00322145	0,002628277	1,4449	1,4277
ARM_3_V	0,281467443	4,382%	0,017586385	0,132613667	0,108195199	0,6605	-0,0278
ARM_5_V	1,588131944	24,72%	0,018694048	0,136726179	0,111550465	1,8604	1,2226
ARM_7_V	0,743591724	11,57%	0,0083092	0,091154811	0,074370261	0,9380	0,5222

4.1.3. Circuito RC

De igual forma, en la figura 4.7 muestra la conexión que se debe llevar a cabo para un circuito RC, las curvas de voltaje (línea roja) y corriente (línea negra) medida con el sensor CASSY Lab 2 se observan en la figura 4.8 y las tablas 4.5, 4.6 contienen los datos para identificar el perfil de carga del circuito RC en conexión delta y estrella respectivamente, los datos son procesados por el código de MATLAB expuesto en el Anexo G que mostrará un mensaje que dirá el tipo de carga, figura 4.9.

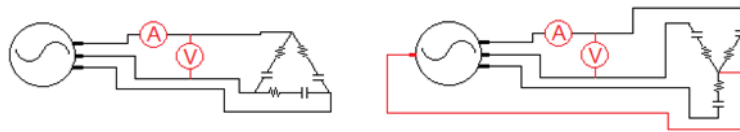


Figura 4.7: Esquema de conexión para el circuito RC. Fuente Propia

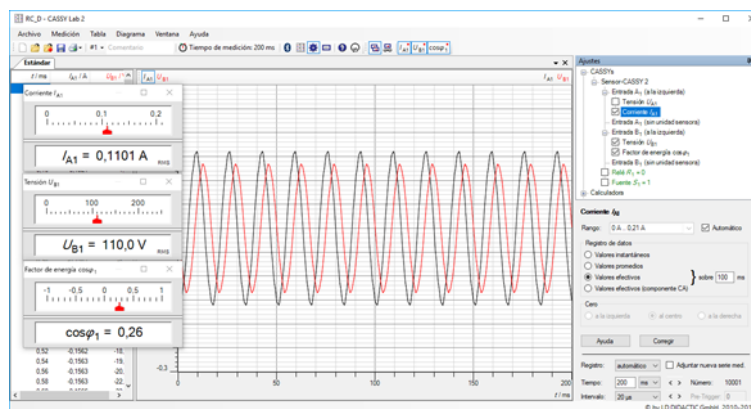


Figura 4.8: Curvas características de voltaje y corriente para el circuito RC. Fuente: Propia

MATLAB Command Window

```
RC_101
>>
```

Figura 4.9: Identificación del circuito RC en el entorno MATLAB. Fuente: Propia

Cuadro 4.5: Criterios establecidos para el perfil de carga del circuito RC, conexión delta. Fuente: Propia

Circuito RC en conexión Delta							
	Promedio	Peso	Varianza	Desvet	Error Muestral	LSC	LIC
FP	0,26	3,986%	3,08149E-33	5,55112E-17	4,52898E-17	0,2600	0,2600
THD_I	0,03013938	0,462%	1,43804E-06	0,001199184	0,000978375	0,0325	0,0260
RMS_I	0,110784449	1,699%	4,10867E-08	0,000202698	0,000165375	0,1112	0,1101
FC_I	1,460680493	22,39%	3,83477E-05	0,006192553	0,005052304	1,4786	1,4494
ARM_3_I	0,000449243	0,007%	4,23116E-09	6,50473E-05	5,307E-05	0,0006	0,0003
ARM_5_I	0,003077974	0,047%	2,2772E-08	0,000150904	0,000123118	0,0034	0,0026
ARM_7_I	0,00104673	0,016%	1,13443E-08	0,00010651	8,68979E-05	0,0013	0,0008
THD_V	0,019974776	0,306%	8,42122E-07	0,000917672	0,000748699	0,0217	0,0168
FC_V	1,448942585	22,21%	1,07479E-05	0,003278399	0,00267474	1,4559	1,4396
ARM_3_V	0,404729735	6,205%	0,001014038	0,031843963	0,025980459	0,4899	0,3194
ARM_5_V	1,942331801	29,78%	0,013323411	0,115427079	0,094173218	2,1952	1,5800
ARM_7_V	0,840116362	12,88%	0,007129959	0,084439084	0,068891116	1,0231	0,6259

Cuadro 4.6: Criterios establecidos para el perfil de carga del circuito RC, conexión estrella. Fuente: Propia

Circuito RC en conexión Estrella							
	Promedio	Peso	Varianza	Desvet	Error Muestral	LSC	LIC
FP	0,27	4,226%	0	0	0	0,2700	0,2700
THD_I	0,036396569	0,570%	3,74303E-06	0,001934691	0,001578451	0,0405	0,0309
RMS_I	0,037132574	0,581%	8,38609E-09	9,15756E-05	7,47136E-05	0,0374	0,0369
FC_I	1,427725399	22,34%	1,89684E-05	0,004355278	0,00355333	1,4405	1,4195
ARM_3_I	0,000704727	0,011%	3,20899E-09	5,66479E-05	4,62172E-05	0,0009	0,0006
ARM_5_I	0,000963728	0,015%	6,30337E-09	7,93937E-05	6,47748E-05	0,0011	0,0007
ARM_7_I	0,000470117	0,007%	2,31903E-09	4,81563E-05	3,92891E-05	0,0006	0,0003
THD_V	0,019801911	0,310%	7,47543E-07	0,000953601	0,000778012	0,0217	0,0168
FC_V	1,448942585	22,67%	1,77934E-05	0,003278399	0,00267474	1,4559	1,4396
ARM_3_V	0,405133078	6,340%	0,008361171	0,091439438	0,074602478	0,6739	0,2073
ARM_5_V	1,735379763	27,15%	0,018907783	0,137505575	0,112186348	2,0942	1,4404
ARM_7_V	1,00700732	15,76%	0,006028188	0,077641409	0,063345113	1,1493	0,8025

4.1.4. Circuito RL

La figura 4.11 presenta la curva de voltaje (línea roja) y corriente (línea negra) medida con el sensor CASSY Lab 2, la figura 4.10 muestra la conexión del circuito y las tablas 4.7, 4.8 contienen los datos para identificar el perfil de carga de un circuito RL en conexión delta y estrella respectivamente, estos datos son procesados por el código de MATLAB expuesto en el Anexo G que mostrará un mensaje que dirá el tipo de carga y su etiqueta correspondiente, figura 4.12.

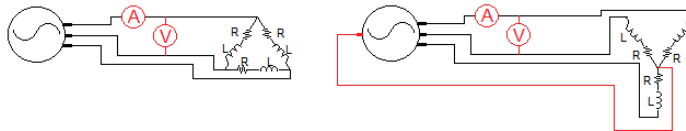


Figura 4.10: Esquema de conexión para el circuito RL. Fuente Propia

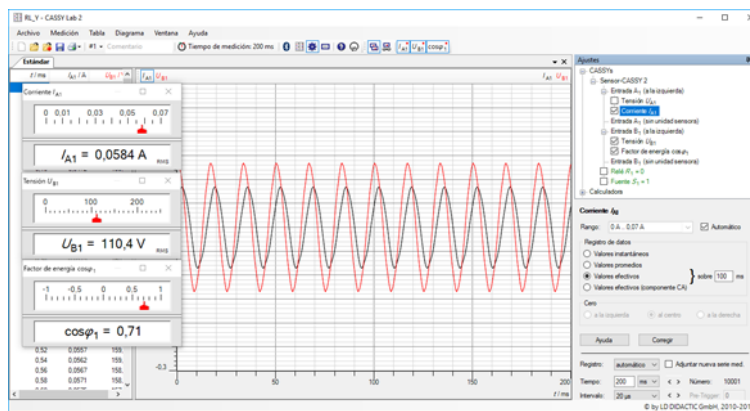


Figura 4.11: Curvas características de voltaje y corriente para el circuito RL. Fuente: Propia

MATLAB Command Window

```
RL_101
>>
```

Figura 4.12: Identificación del circuito RL en el entorno MATLAB. Fuente: Propia

Cuadro 4.7: Criterios establecidos para el perfil de carga del circuito RL, conexión delta. Fuente: Propia

Circuito RL en conexión Delta							
	Promedio	Peso	Varianza	Desvet	Error Muestral	LSC	LIC
FP	0,77	11,09%	1,2326E-32	1,11022E-16	9,05795E-17	0,7700	0,7700
THD_I	0,005587248	0,080%	1,31685E-08	0,000114754	9,36243E-05	0,0059	0,0053
RMS_I	0,149427763	2,153%	2,30678E-08	0,000151881	0,000123915	0,1498	0,1490
FC_I	1,413190957	20,35%	2,23034E-07	0,000472265	0,000385306	1,4144	1,4122
ARM_3_I	0,000165331	0,002%	3,008E-10	1,73436E-05	1,41501E-05	0,0002	0,0001
ARM_5_I	0,000794555	0,011%	4,72188E-10	2,17299E-05	1,77287E-05	0,0009	0,0007
ARM_7_I	0,000158649	0,002%	1,04919E-10	1,0243E-05	8,35694E-06	0,0002	0,0001
THD_V	0,019577705	0,282%	2,50127E-07	0,000500127	0,000408038	0,0208	0,0184
FC_V	1,449724224	20,88%	5,30142E-06	0,002302482	0,00187852	1,4556	1,4443
ARM_3_V	0,343953739	4,955%	0,000164265	0,012816577	0,01045663	0,3745	0,3116
ARM_5_V	1,865106825	26,86%	0,005302947	0,072821339	0,059412573	2,0625	1,7061
ARM_7_V	0,923968104	13,31%	0,001292785	0,035955319	0,029334781	1,0042	0,8393

Cuadro 4.8: Criterios establecidos para el perfil de carga del circuito RL, conexión estrella. Fuente: Propia

Circuito RL en conexión Estrella							
	Promedio	Peso	Varianza	Desvet	Error Muestral	LSC	LIC
FP	0,71	11,16%	0	0	0	0,7100	0,7100
THD_I	0,051884105	0,816%	1,42569E-06	0,001194022	0,000974164	0,0546	0,0484
RMS_I	0,058233062	0,916%	4,86723E-08	0,000220618	0,000179995	0,0590	0,0579
FC_I	1,441358956	22,66%	1,3233E-05	0,003637713	0,002967892	1,4505	1,4322
ARM_3_I	0,001853825	0,029%	7,41574E-09	8,61147E-05	7,02582E-05	0,0020	0,0016
ARM_5_I	0,000832342	0,013%	2,31451E-09	4,81094E-05	3,92509E-05	0,0009	0,0007
ARM_7_I	0,000106685	0,002%	3,81219E-10	1,95248E-05	1,59297E-05	0,0002	0,0001
THD_V	0,017107344	0,269%	1,55545E-07	0,000394392	0,000321772	0,0183	0,0160
FC_V	1,442417237	22,68%	8,335E-06	0,002887041	0,002355443	1,4500	1,4337
ARM_3_V	0,292029239	4,592%	0,00866262	0,093073196	0,075935408	0,4948	0,0402
ARM_5_V	1,544677902	24,28%	0,006699949	0,081853214	0,066781388	1,8150	1,3765
ARM_7_V	0,799469794	12,57%	0,003181003	0,056400383	0,046015247	0,8997	0,6182

4.1.5. Transformador

En la figura 4.13 se indica la conexión para un transformador el cuál debe ir acompañado de una carga, en este caso se tomó la carga RLC para obtener las medidas, en la figura 4.14 se presenta la curva de voltaje (línea roja) y corriente (línea negra) medida con el sensor CASSY Lab 2 y las tablas 4.9, 4.10 contienen los datos para identificar el perfil de carga del transformador 120 V / 120 V en conexión delta y estrella respectivamente, estos datos son procesados por el código de MATLAB expuesto en el Anexo G que mostrará un mensaje que dirá el tipo de carga, figura 4.15, en este caso un transformador.

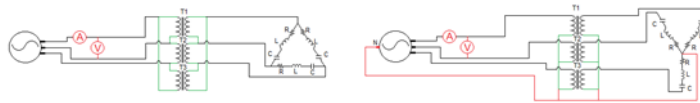


Figura 4.13: Esquema de conexión para los Transformadores. Fuente Propia

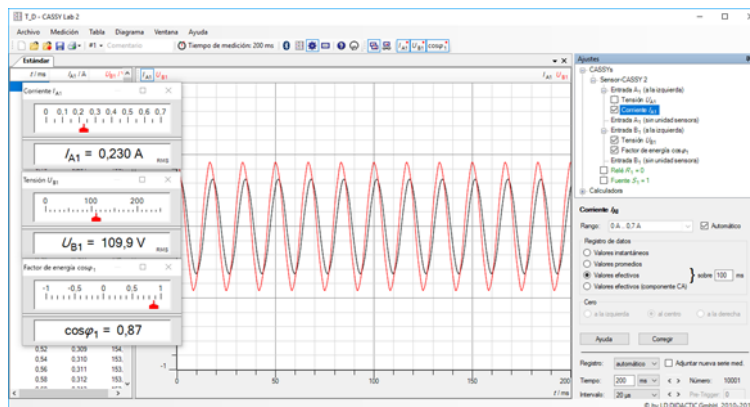


Figura 4.14: Curvas características de voltaje y corriente para el Transformador 120 V / 120 V. Fuente: Propia

```

MATLAB Command Window

T_101
>>
    
```

Figura 4.15: Identificación del Transformador 120 V / 120 V en el entorno MATLAB.. Fuente: Propia

Cuadro 4.9: Criterios establecidos para el perfil de carga del Transformador 120 V / 120 V, conexión delta. Fuente: Propia

Transformador 120 V / 120 V en conexión Delta							
	Promedio	Peso	Varianza	Desvet	Error Muestral	LSC	LIC
FP	0,87	12,13 %	1,2326E-32	1,11022E-16	9,05795E-17	0,8700	0,8700
THD_I	0,011859336	0,165 %	9,68165E-07	0,000983954	0,000802776	0,0154	0,0101
RMS_I	0,222857854	3,108 %	1,19612E-07	0,00034585	0,000282168	0,2238	0,2220
FC_I	1,414137437	19,71 %	3,60535E-05	0,00600446	0,004898845	1,4283	1,3953
ARM_3_I	0,000933896	0,013 %	1,16129E-08	0,000107763	8,79206E-05	0,0012	0,0006
ARM_5_I	0,002308819	0,032 %	4,35934E-09	6,60253E-05	5,38679E-05	0,0025	0,0022
ARM_7_I	0,000329416	0,005 %	1,87595E-10	1,36965E-05	1,11746E-05	0,0004	0,0003
THD_V	0,019679997	0,274 %	2,18206E-07	0,000467125	0,000381112	0,0211	0,0187
FC_V	1,450260263	20,22 %	2,20166E-06	0,001483801	0,001210585	1,4530	1,4470
ARM_3_V	0,46193721	6,441 %	0,002206489	0,046973278	0,038323977	0,6013	0,3613
ARM_5_V	1,903167537	26,53 %	0,009205198	0,095943723	0,078277378	2,1865	1,6869
ARM_7_V	0,813946911	11,35 %	0,005662653	0,075250601	0,06139453	0,9776	0,6127

Cuadro 4.10: Criterios establecidos para el perfil de carga del Transformador 120 V / 120 V, conexión estrella. Fuente: Propia

Transformador 120 V / 120 V en conexión Estrella							
	Promedio	Peso	Varianza	Desvet	Error Muestral	LSC	LIC
FP	0,83	12,74 %	1,2326E-32	1,11022E-16	9,05795E-17	0,8300	0,8300
THD_I	0,0330254	0,507 %	5,93325E-06	0,002435826	0,001987312	0,0390	0,0262
RMS_I	0,08457752	1,298 %	4,54675E-08	0,000213231	0,000173968	0,0852	0,0840
FC_I	1,42502436	21,87 %	9,36014E-05	0,009674782	0,007893342	1,4498	1,4034
ARM_3_I	0,00155882	0,024 %	3,18709E-09	5,64543E-05	4,60593E-05	0,0017	0,0014
ARM_5_I	0,000865044	0,013 %	2,18935E-09	4,67905E-05	3,81749E-05	0,0010	0,0007
ARM_7_I	0,000125977	0,002 %	6,52101E-10	2,55363E-05	2,08342E-05	0,0002	0,0001
THD_V	0,017445755	0,268 %	1,32783E-06	0,001152316	0,000940137	0,0204	0,0139
FC_V	1,441521442	22,12 %	1,03418E-05	0,003215861	0,002623717	1,4483	1,4317
ARM_3_V	0,317835924	4,879 %	0,008013275	0,089516899	0,073033941	0,4938	0,0598
ARM_5_V	1,713169921	26,29 %	0,022210886	0,149033171	0,121591341	2,0637	1,2859
ARM_7_V	0,649400199	9,968 %	0,015518974	0,124575176	0,101636854	1,0355	0,3277

4.1.6. Transformador Elevador

La figura 4.16 presenta la curva de voltaje (línea roja) y corriente (línea negra) medida con el sensor CASSY Lab 2 y las tablas 4.11, 4.12 contienen los datos para identificar un transformador elevador 120 V / 180 V en conexión delta y estrella respectivamente, estos datos son procesados por el código de MATLAB expuesto en el Anexo G que mostrará un mensaje que dirá el tipo de carga, figura 4.17.

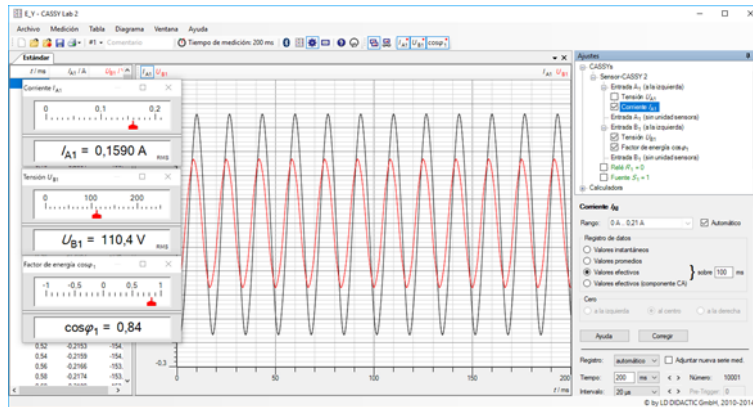


Figura 4.16: Curvas características de voltaje y corriente para el Transformador Elevador 120 V / 180 V. Fuente: Propia

MATLAB Command Window

```
TE_101
>>
```

Figura 4.17: Identificación del Transformador Elevador 120 V / 180 V en el entorno MATLAB. Fuente: Propia

Cuadro 4.11: Criterios establecidos para el perfil de carga del Transformador Elevador 120 V / 180 V, conexión delta. Fuente: Propia

Transformador Elevador 120 V / 180 V en conexión Delta							
	Promedio	Peso	Varianza	Desvet	Error Muestral	LSC	LIC
FP	0,87	11,66 %	1,2326E-32	1,11022E-16	9,05795E-17	0,8700	0,8700
THD_I	0,007901027	0,106 %	2,46118E-08	0,000156881	0,000127994	0,0082	0,0075
RMS_I	0,467606943	6,268 %	4,05769E-07	0,000637	0,000519708	0,4692	0,4662
FC_I	1,398074909	18,74 %	8,95557E-06	0,002992586	0,002441554	1,4051	1,3917
ARM_3_I	0,001193471	0,016 %	1,28741E-08	0,000113464	9,25718E-05	0,0015	0,0010
ARM_5_I	0,002888655	0,039 %	2,01585E-09	4,48982E-05	3,6631E-05	0,0030	0,0028
ARM_7_I	0,001747944	0,023 %	2,40358E-09	4,90263E-05	3,9999E-05	0,0019	0,0016
THD_V	0,020138281	0,270 %	8,40127E-08	0,000289849	0,000236479	0,0208	0,0195
FC_V	1,451308882	19,45 %	2,8499E-06	0,001688166	0,00137732	1,4545	1,4457
ARM_3_V	0,411460626	5,516 %	0,001035143	0,032173639	0,026249431	0,4728	0,3075
ARM_5_V	1,975921881	26,48 %	0,002350899	0,048486075	0,039558219	2,1053	1,8678
ARM_7_V	0,851392064	11,41 %	0,004312526	0,065669822	0,053577883	1,0224	0,7132

Cuadro 4.12: Criterios establecidos para el perfil de carga del Transformador Elevador 120 V / 180 V, conexión estrella. Fuente: Propia

Transformador Elevador 120 V / 180 V en conexión Estrella							
	Promedio	Peso	Varianza	Desvet	Error Muestral	LSC	LIC
FP	0,84	12,24 %	1,2326E-32	1,11022E-16	9,05795E-17	0,8400	0,8400
THD_I	0,031784276	0,463 %	2,76686E-05	0,005260095	0,004291542	0,0418	0,0145
RMS_I	0,161630658	2,356 %	2,52487E-05	0,005024808	0,004099579	0,1682	0,1425
FC_I	1,429421456	20,83 %	1,09588E-05	0,003310405	0,002700853	1,4372	1,4205
ARM_3_I	0,00306501	0,045 %	4,13538E-08	0,000203356	0,000165912	0,0035	0,0025
ARM_5_I	0,001156561	0,017 %	1,08983E-07	0,000330126	0,000269339	0,0018	0,0000
ARM_7_I	0,000162435	0,002 %	2,76728E-09	5,26049E-05	4,29186E-05	0,0003	0,0000
THD_V	0,018976427	0,277 %	1,31669E-07	0,000362863	0,000296048	0,0198	0,0181
FC_V	1,443836225	21,04 %	5,87547E-06	0,002423938	0,001977612	1,4515	1,4390
ARM_3_V	0,346956259	5,058 %	0,009543216	0,097689384	0,079701607	0,6171	0,1580
ARM_5_V	1,847906128	26,93 %	0,003983801	0,06311736	0,051495411	2,0000	1,6760
ARM_7_V	0,735063515	10,71 %	0,006971813	0,083497384	0,068122813	0,9067	0,5082

4.1.7. Transformador Reductor

De acuerdo con la figura 4.18 presenta la curva de voltaje (línea roja) y corriente (línea negra) medida con el sensor CASSY Lab 2 y las tablas 4.13, 4.14 contienen los datos para identificar el perfil de carga para un transformador reductor 120 V / 60 V en conexión delta y estrella respectivamente, estos datos son procesados por el código de MATLAB expuesto en el Anexo G que mostrará un mensaje que dirá el tipo de carga, figura 4.19.

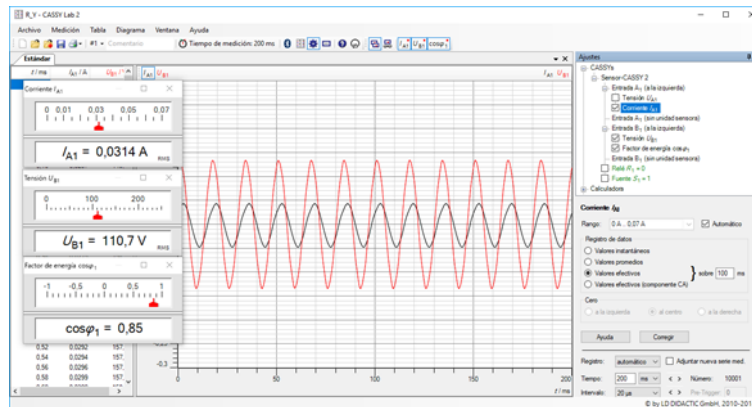


Figura 4.18: Curvas características de voltaje y corriente para el Transformador Reductor 120 V / 60 V. Fuente: Propia

MATLAB Command Window

```
TR_101
>>
```

Figura 4.19: Identificación del Transformador Reductor 120 V / 60 V en el entorno MATLAB. Fuente: Propia

Cuadro 4.13: Criterios establecidos para el perfil de carga del Transformador Reductor 120 V / 180 V, conexión delta. Fuente: Propia

Transformador Reductor 120 V / 180 V en conexión Delta							
	Promedio	Peso	Varianza	Desvet	Error Muestral	LSC	LIC
FP	0,89	12,84%	0	0	0	0,8900	0,8900
THD_I	0,026124729	0,377%	7,05012E-07	0,00083965	0,000685043	0,0288	0,0244
RMS_I	0,081554015	1,177%	1,3777E-08	0,000117375	9,57627E-05	0,0818	0,0812
FC_I	1,408513975	20,32%	0,000129952	0,011399637	0,009300595	1,4358	1,3824
ARM_3_I	0,001026517	0,015%	2,79922E-09	5,29076E-05	4,31656E-05	0,0012	0,0009
ARM_5_I	0,001683404	0,024%	3,71565E-10	1,9276E-05	1,57267E-05	0,0017	0,0016
ARM_7_I	0,000504034	0,007%	8,97744E-11	9,47494E-06	7,73029E-06	0,0005	0,0005
THD_V	0,019356286	0,279%	6,12967E-07	0,000782922	0,000638761	0,0209	0,0169
FC_V	1,449158705	20,91%	5,45922E-06	0,002336497	0,001906273	1,4541	1,4428
ARM_3_V	0,389538999	5,621%	0,001792044	0,042332545	0,034537753	0,4889	0,2783
ARM_5_V	1,917826141	27,67%	0,014363468	0,119847687	0,097779849	2,1397	1,5507
ARM_7_V	0,744766683	10,74%	0,003128312	0,055931313	0,045632548	0,9049	0,6309

Cuadro 4.14: Criterios establecidos para el perfil de carga del Transformador Reductor 120 V / 180 V, conexión estrella. Fuente: Propia

Transformador Reductor 120 V / 180 V en conexión Estrella							
	Promedio	Peso	Varianza	Desvet	Error Muestral	LSC	LIC
FP	0,85	12,52%	1,2326E-32	1,11022E-16	9,05795E-17	0,8500	0,8500
THD_I	0,057726739	0,851%	0,000156193	0,012497727	0,010196491	0,0980	0,0376
RMS_I	0,028272078	0,417%	3,94542E-07	0,000628126	0,000512468	0,0304	0,0274
FC_I	1,376860973	20,29%	0,003120934	0,055865317	0,045578704	1,5047	1,2147
ARM_3_I	0,001411433	0,021%	1,69216E-08	0,000130083	0,00010613	0,0018	0,0012
ARM_5_I	0,000212458	0,003%	1,175E-10	1,08398E-05	8,84381E-06	0,0002	0,0002
ARM_7_I	3,45324E-05	0,001%	9,33835E-11	9,66352E-06	7,88415E-06	0,0001	0,0000
THD_V	0,018896579	0,279%	8,75444E-07	0,000935652	0,000763368	0,0208	0,0164
FC_V	1,440546797	21,23%	2,53441E-05	0,003795471	0,003096602	1,4488	1,4310
ARM_3_V	0,500365944	7,375%	0,016254035	0,127491314	0,104016037	0,8944	0,1765
ARM_5_V	1,817611126	26,79%	0,015440966	0,124261682	0,101381085	2,0803	1,5251
ARM_7_V	0,692498223	10,20%	0,021402083	0,146294508	0,119356955	1,0297	0,2857

4.2. Validación del Procedimiento Propuesto

Inicialmente se pensó realizar la validación del método propuesto, midiendo las señales con un dispositivo diferente al utilizado en la investigación, sin embargo, por falta de recursos y equipos, debido a los altos costos de los medidores y analizadores de red, se decidió realizar pruebas conectado diferentes cargas que se encuentran en el laboratorio de máquinas eléctricas aplicando el método para reconocer dichas cargas.

Entonces, con la obtención de los rangos que identifican cada carga, se procedió a realizar la toma de datos de una de las cargas anteriormente analizadas, se registraron las formas de onda de corriente y tensión, se calcularon los parámetros característicos de la carga, luego se ejecutó el código propuesto para la identificación, donde se obtuvo una respuesta positiva. A continuación se muestra un ejemplo de lo anteriormente descrito, con los registros y gráficas correspondientes a la carga:

1. Registro de datos de la carga seleccionada, a partir de su forma de onda de corriente y tensión. En la figura 4.20, se muestra la forma de onda de tensión y corriente, correspondientes a un motor jaula de ardilla conectado en configuración delta, el software CASSY Lab 2, permite extraer los datos característicos de la carga en un archivo *.txt* como se indica en la figura 4.21, con esta información se completa el paso 1.

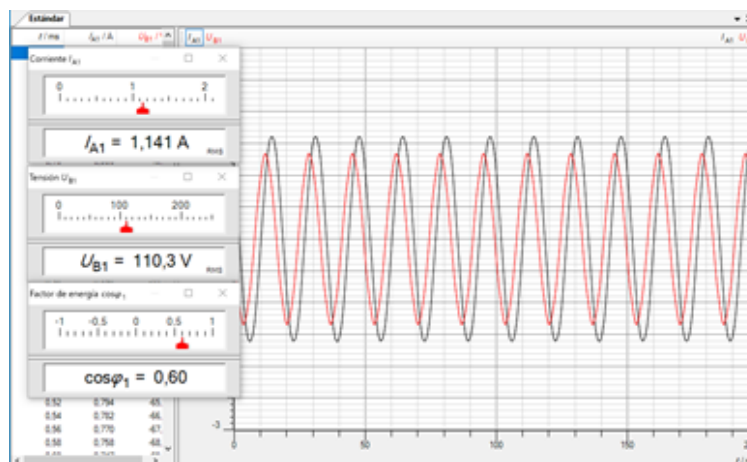


Figura 4.20: Registros de las curvas de corriente y voltaje correspondientes al motor rotor jaula de ardilla. Fuente: Propia

t	I	V
0	1.0635	-35.685
0.02	1.0545	-36.905
0.04	1.0455	-38.125
0.06	1.035	-39.65
0.08	1.026	-41.175
0.1	1.0155	-42.395
0.12	1.0065	-43.615
0.14	0.996	-44.835
0.16	0.9855	-45.75
0.18	0.9765	-46.665
0.2	0.966	-47.885
0.22	0.9555	-48.8
0.24	0.945	-49.715
0.26	0.9345	-50.935
0.28	0.9255	-52.155
0.3	0.9135	-53.375
0.32	0.9045	-54.9
0.34	0.894	-55.815
0.36	0.882	-57.035
0.38	0.8715	-57.95
0.4	0.861	-59.17
0.42	0.8505	-60.085
0.44	0.8385	-61.305
0.46	0.8265	-62.525

Figura 4.21: Archivo de datos dado por el sensor CASSY 2 correspondientes las curvas características de voltaje y corriente. Fuente: Propia

2. Obtención de los parámetros característicos de la carga, con el código explicado en el Anexo B apartado B.3.

Al cargar el archivo *.txt* y correr el código correspondiente, se obtienen los datos indicados en la tabla 4.15, estos datos son los que pasan a evaluarse en los rangos correspondientes señalados en la tabla 4.16.

Cuadro 4.15: Parámetros resultantes para el motor rotor jaula de ardilla en conexión Delta. Fuente: Propia

FP	0,600
THD_I	0,012
RMS_I	1,146
FC_I	1,402
ARM_3_I	0,005
ARM_5_I	0,012
ARM_7_I	0,001
THD_V	0,018
FC_V	1,447
ARM_3_V	0,393
ARM_5_V	1,764
ARM_7_V	0,822

Cuadro 4.16: Rangos propuestos para el motor rotor jaula de ardilla en conexión Delta. Fuente: Propia

PARÁMETROS	LS	LI
FP	0,6000	0,6000
THD_I	0,0154	0,0100
RMS_I	1,1660	1,1421
FC_I	1,4127	1,3950
ARM_3_I	0,0081	0,0030
ARM_5_I	0,0164	0,0081
ARM_7_I	0,0035	-0,0001
THD_V	0,0218	0,0166
FC_V	1,4567	1,4345
ARM_3_V	0,8900	0,1607
ARM_5_V	2,1926	1,1554
ARM_7_V	1,2679	0,6618

3. Identificación de la carga, con el código detallado en el Anexo G apartado G.2. Ahora, se cargan los parámetros de la tabla 4.15 en el entorno de MATLAB, ejecutando el código propuesto, y se obtienen como resultado que efectivamente es un motor jaula de ardilla (figura 4.22).

MATLAB Command Window

```
MJA_101
>>
```

Figura 4.22: Resultado de identificación del motor rotor jaula de ardilla en conexión delta realizada en el entorno MATLAB. Fuente: Propia

Para finalizar, se puede apreciar que los datos característicos del motor jaula de ardilla (tabla 4.15), pertenecen a los rangos propuestos (tabla 4.16), esto también se verifica desde el entorno de MATLAB, como indica en la figura 4.23, la matriz 12x1 correspondiente al resultado de evaluación, los doce parámetros con los doce rangos en un ciclo *for* posición a posición, tiene como valor uno (1) en todas sus posiciones, debido a que todos los parámetros pertenecen a los rangos descritos, si por el contrario el valor en cualquier posición es un cero (0), indicaría que el valor del parámetro no pertenece al rango propuesto.

```

MATLAB Command Window

>> yMD

yMD =

     1
     1
     1
     1
     1
     1
     1
     1
     1
     1
     1
     1
     1
     1
     1

```

Figura 4.23: **Matriz resultante de la comparación entre parámetros obtenidos y rangos establecidos.**
Fuente: Propia

Ahora, fue llevado a acabo los 3 pasos expuestos anteriormente, pero aplicando algún cambio en las cargas analizadas, con el fin de comprobar si los rangos establecidos tienen el alcance necesario de identificación, o se debe hacer todo el procedimiento de nuevo.

Entonces, se definen las características eléctricas de la carga nueva (tabla 4.17), en este caso sera un electro-dinamómetro, que actuará como carga conectada al motor jaula de ardilla ya estudiado.

Cuadro 4.17: **Características correspondientes a el electro-dinamómetro**

Características	
VELOCIDAD	0–5000r/min
PAR MOTOR	0–27LBF * PLG

Para este caso en particular, se le aplicó al electro-dinamómetro un voltaje DC de 24 V, esto ejerce un par motor de 1.2 LBR * PLG para el motor jaula de ardilla. Por otra, parte el esquema del circuito implementado en la planta, correspondiente al motor jaula de ardilla conectado a un electro-dinamómetro, por medio de una correa, en conexión delta, figura 4.24.

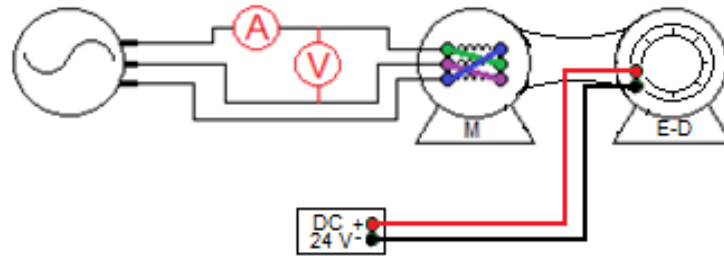


Figura 4.24: Esquema de conexión para el motor rotor jaula de ardilla con el electro-dinamometro. Fuente: Propia

Ahora, para identificar la carga se aplicaron los pasos anteriores, así, tenemos:

1. Registro de datos de la carga seleccionada, a partir de su forma de onda de corriente y tensión.

En la figura 4.25, se muestra la forma de onda de tensión y corriente, correspondientes a un motor jaula de ardilla con carga conectado en configuración delta, en un primer momento se pueden apreciar cambios en el valor *RMS* de corriente y en el factor de potencia, en comparación al motor jaula de ardilla sin carga, entonces, se extraen los datos característicos de la carga en un archivo *.txt* como se indica en la figura 4.26, y con esta información se completa el paso 1.

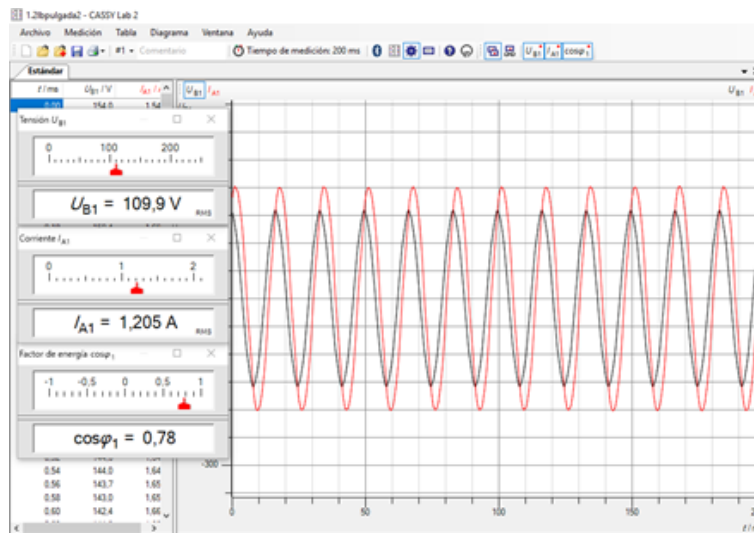
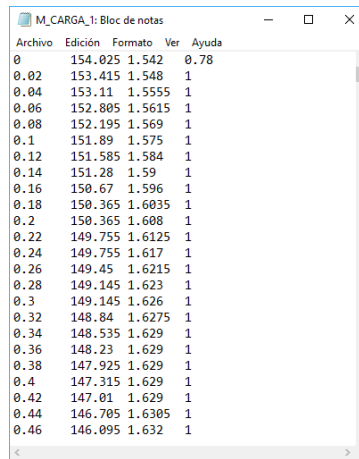


Figura 4.25: Registros de las curvas de corriente y voltaje correspondientes al motor rotor jaula de ardilla con carga. Fuente: Propia



Time	Voltage	Current	Status
0	154.025	1.542	0,78
0.02	153.415	1.548	1
0.04	153.11	1.5555	1
0.06	152.805	1.5615	1
0.08	152.195	1.569	1
0.1	151.89	1.575	1
0.12	151.585	1.584	1
0.14	151.28	1.59	1
0.16	150.67	1.596	1
0.18	150.365	1.6035	1
0.2	150.365	1.608	1
0.22	149.755	1.6125	1
0.24	149.755	1.617	1
0.26	149.45	1.6215	1
0.28	149.145	1.623	1
0.3	149.145	1.626	1
0.32	148.84	1.6275	1
0.34	148.535	1.629	1
0.36	148.23	1.629	1
0.38	147.925	1.629	1
0.4	147.315	1.629	1
0.42	147.01	1.629	1
0.44	146.705	1.6305	1
0.46	146.095	1.632	1

Figura 4.26: Archivo de datos dado por el sensor CASSY 2 correspondientes las curvas características de voltaje y corriente. Fuente: Propia

2. Obtención de los parámetros característicos de la carga, con el código explicado en el Anexo B apartado B.3.

Al cargar el archivo *.txt* y ejecutando el código correspondiente, se obtienen los datos indicados en la tabla, estos datos representan a un motor jaula de ardilla con carga, luego pasan a evaluarse con los rangos correspondientes al motor jaula de ardilla indicados en la tabla 4.18.

Cuadro 4.18: Parámetros resultantes para el motor rotor jaula de ardilla con carga en conexión Delta. Fuente Propia

FP	0,780
THD_I	0,016
RMS_I	109,740
FC_I	1,454
ARM_3_I	0,548
ARM_5_I	1,165
ARM_7_I	1,070
THD_V	0,024
FC_V	1,418
ARM_3_V	0,002
ARM_5_V	0,024
ARM_7_V	0,012

3. Identificación de la carga, con el código detallado en el Anexo G apartado G.2.

Ahora, se cargan los parámetros de la tabla 4.18 en el entorno de MATLAB, ejecutando el código propuesto, y se obtiene como resultado que no reconoce ninguna carga (figura 4.27) ya que los parámetros no se encuentran dentro de los rangos propuestos, entonces se debe hacer la identificación completa y calcular nuevos rangos, característicos de un motor jaula de ardilla con carga.

MATLAB Command Window

>>

Figura 4.27: **Resultado de identificación del motor rotor jaula de ardilla con carga en conexión delta realizada en el entorno MATLAB. Fuente: Propia**

Por lo cual, es necesario encontrar nuevos rangos, para ello se utilizaron los valores de desviación estándar y de error muestral correspondientes al motor jaula de ardilla, calculando así, los nuevos rangos correspondientes a la firma de consumo de un motor jaula de ardilla con carga, básicamente lo que se hizo se muestra en las siguientes formulas y los resultados son expuestos en la tabla 4.19:

Cuadro 4.19: **Nuevos rangos establecidos para el motor rotor jaula de ardilla con carga. Fuente: Propia**

PARÁMETROS	DESVEST	ERROR MUESTRAL	LSC	LIC
0,78000	1,11022E-16	9,058E-17	0,7800	0,7800
0,01625	0,001164322	0,00094993	0,0172	0,0153
109,74023	0,004721052	0,00385175	109,7441	109,7364
1,45357	0,003426865	0,00279587	1,4564	1,4508
0,54848	0,001182097	0,00096443	0,5494	0,5475
1,16491	0,001620376	0,00132201	1,1662	1,1636
1,07001	0,000791834	0,00064603	1,0707	1,0694
0,02381	0,000962384	0,00078518	0,0246	0,0230
1,41820	0,004169408	0,00340169	1,4216	1,4148
0,00237	0,165099605	0,13469942	0,1371	-0,1323
0,02426	0,19681925	0,16057846	0,1848	-0,1363
0,01232	0,127925878	0,10437058	0,1167	-0,0920

Es así como se definieron los nuevos rangos, ahora, con la firma de consumo encontrada en la base de datos, lo ideal sería que si se toman nuevamente los datos con los mismos parámetros, y el código sea capaz de identificarlo, a continuación, se muestra el resultado de las curvas características de corriente y voltaje de

un motor jaula de ardilla con carga en otro momento, repitiendo los tres pasos expuestos anteriormente:

1. Registro de datos de la carga seleccionada, a partir de su forma de onda de corriente y tensión.

En la figura 4.28, se muestra la forma de onda de tensión y corriente, correspondientes a un motor jaula de ardilla con carga, luego, se extraen los datos característicos de la carga en un archivo *.txt* (figura 4.29).

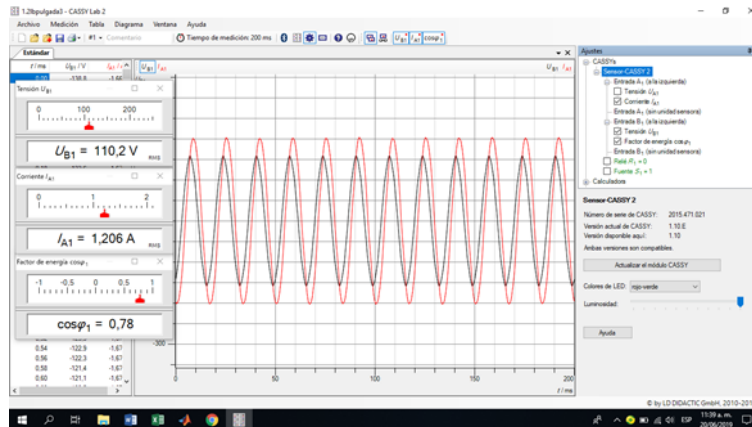


Figura 4.28: Registros de las curvas de corriente y voltaje correspondientes al motor rotor jaula de ardilla con carga. Fuente: Propia

Archivo	Edición	Formato	Ver	Ayuda
0	154.025	1.542	0.78	
0.02	153.415	1.548	1	
0.04	153.11	1.5555	1	
0.06	152.805	1.5615	1	
0.08	152.195	1.569	1	
0.1	151.89	1.575	1	
0.12	151.585	1.584	1	
0.14	151.28	1.59	1	
0.16	150.67	1.596	1	
0.18	150.365	1.6035	1	
0.2	150.365	1.608	1	
0.22	149.755	1.6125	1	
0.24	149.755	1.617	1	
0.26	149.45	1.6215	1	
0.28	149.145	1.623	1	
0.3	149.145	1.626	1	
0.32	148.84	1.6275	1	
0.34	148.535	1.629	1	
0.36	148.23	1.629	1	
0.38	147.925	1.629	1	
0.4	147.315	1.629	1	
0.42	147.01	1.629	1	
0.44	146.705	1.6305	1	
0.46	146.095	1.632	1	

Figura 4.29: Archivo de datos dado por el sensor CASSY 2 correspondientes las curvas características de voltaje y corriente. Fuente: Propia

2. Obtención de los parámetros característicos de la carga, con el código explicado en el Anexo B apartado B.3.

Al cargar el archivo *.txt* y ejecutando el código correspondiente, se obtienen los datos indicados en la tabla 4.20, estos datos representan a un motor jaula de ardilla con carga, pasan a evaluarse en los nuevos rangos correspondientes al motor jaula de ardilla con carga indicados en la tabla 4.21.

Cuadro 4.20: **Parámetros obtenidos de las curvas de voltaje y corriente nuevamente sensadas. Fuente: Propia**

FP	0,780
THD_I	0,016
RMS_I	109,896
FC_I	1,449
ARM_3_I	0,301
ARM_5_I	1,153
ARM_7_I	1,082
THD_V	0,023
FC_V	1,402
ARM_3_V	0,006
ARM_5_V	0,024
ARM_7_V	0,012

Cuadro 4.21: **Rangos establecidos para el motor rotor jaula de ardilla con carga. Fuente: Propia**

PARÁMETROS	LSC	LIC
FP	0,7800	0,7800
THD_I	0,0172	0,0153
RMS_I	109,7441	109,7364
FC_I	1,4564	1,4508
ARM_3_I	0,5494	0,5475
ARM_5_I	1,1662	1,1636
ARM_7_I	1,0707	1,0694
THD_V	0,0246	0,0230
FC_V	1,4216	1,4148
ARM_3_V	0,1371	-0,1323
ARM_5_V	0,1848	-0,1363
ARM_7_V	0,1167	-0,0920

3. Identificación de la carga, con el código detallado en el Anexo G apartado G.2.

Ahora, se cargan los parámetros de la tabla 4.20, en el entorno de MATLAB, se ejecuta el código propuesto, y se obtiene como resultado que efectivamente reconoce la carga (figura 4.30).

MATLAB Command Window

```
MJA_C_101  
>>
```

Figura 4.30: **Resultado de identificación del motor rotor jaula de ardilla con carga en conexión delta realizada en el entorno MATLAB. Fuente Propia**

Ahora bien, se puede apreciar que la mayoría de los datos característicos del motor jaula de ardilla con carga (tabla 4.20), pertenecen a los rangos propuestos (tabla 4.21), esto también es visto desde el entorno de MATLAB, como se indica en la figura 4.31, la matriz 12x1 correspondiente al resultado para evaluar los parámetros y los rangos, tiene como valor uno (1) en la mayoría de sus posiciones, en las posiciones que el valor es cero (0), se debe a las perturbaciones mínimas presentes, entonces el valor del parámetro no se encuentra entre los límites de los rangos propuestos, es por esto que no toma como válido el valor calculado.

```
MATLAB Command Window
```

```
>> yMCD
```

```
yMCD =
```

```
1  
1  
0  
0  
1  
1  
0  
1  
0  
1  
1  
1
```

```
>>
```

Figura 4.31: **Matriz resultante de la comparación entre parámetros obtenidos y rangos establecidos. Fuente: Propia**

Con lo anteriormente expuesto, se puede decir que toda carga nueva debe tener una firma de consumo exclusiva, por muy mínimo que sea el cambio en voltaje, corriente o el factor de potencia, esto afecta de sobremanera a los parámetros elegidos para la identificación, por ende los rangos no reconocerán el valor como válido, pero al momento de tener en la base de datos la firma de consumo guardada, el sistema si es

capaz de identificar el tipo de carga seleccionado, sin importar el momento en el que toma los datos mientras el ambiente sea controlado.

Capítulo 5

CONCLUSIONES Y TRABAJOS

FUTUROS

5.1. Conclusiones

- En este trabajo de grado se definieron criterios de evaluación del perfil de carga de acuerdo a su comportamiento, los cuales permitieron la identificación de las mismas. Para ello se analizaron las formas de onda de voltaje y corriente evidenciando el calidad de la precisión con la cual se debe realizar la adquisición de las señales, teniendo en cuenta las características de los circuitos eléctricos utilizados en el estudio.
- De igual forma, se comprobó la importancia del comportamiento de la red eléctrica en la cuál se realizaron las mediciones, ya que la presencia de eventos transitorios de tensión fueron causa potencial de perturbaciones, lo que afectó no solo la calidad de datos de la forma de onda en cada registro, sino también en los parámetros que se van a calcular presentando alteraciones en sus valores, por ende se determina hacer las pruebas en horarios de baja demanda en un ambiente controlado, teniendo sólo la conexión de las cargas conocidas para obtener resultados más exactos.
- Se establecen herramientas analíticas de datos para verificar el comportamiento de los valores obtenidos de las formas de onda de voltaje y corriente. Resaltando la importancia de tener un grupo considerable de datos, ya que para analizar la varianza y dispersión de los mismos es importante tener más de una muestra de las señales medidas.

- Por último, se realizó la verificación del procedimiento y de los criterios de evaluación, mediante una validación propuesta que permitió conectar cargas nuevas y conocidas para ser identificadas, de esto se concluye, que el procedimiento es certero, es decir, que al medir las cargas ya definidas, el procedimiento es capaz de verificar que tipo de carga está conectada. Las nuevas cargas, se consideran aplicando pequeñas variaciones en las características de los circuitos eléctricos ya conectados, para estas, es necesario tomar una medición y sacar los valores de los parámetros teniendo en cuenta el error muestral ya obtenido, con lo que se pretende identificar la nueva carga.

5.2. Trabajos Futuros

- Este trabajo es la base para posibles investigaciones acerca de eficiencia energética, gestión datos, respuesta del comportamiento de gran variedad de cargas y los factores indispensables a la hora de interpretar la identificación de las mismas, se recomienda utilizar un software de programación del lenguaje simple, con funcionalidades añadidas importantes, como funciones matemáticas y de manejo de archivos, proporcionadas por bibliotecas.
- Realizar de manera automática el enganche de la carga a la red trifásica, con el fin de optimizar el proceso y que los valores de las muestras obtenidos de las curvas características de corriente y tensión, sean más exactos, se recomienda que el equipo utilizado para realizar el enganche tenga la misma sintonía que el equipo utilizado para la adquisición de señales.
- Realizar la adquisición de las formas de onda de voltaje y corriente en un ambiente con otras características, con el fin de probar el alcance que tiene el método de identificación propuesto, se recomienda tener los equipos necesarios y el conocimiento adecuado, para llevar a cabo las pruebas necesarias sin que exista algún riesgo de cualquier tipo.

Bibliografía

- [1] Siu, H. K. Member, IEE & Ngan, H. W. Sr. Member, IEEE, "Automatic Power Quality Recognition System using Wavelet Analysis", Hong Kong, 2004, October 04.
- [2] Meléndez, J., Herraiz, S., Colomer, J., Sánchez, J. & Castro, M. (Febrero 2006). Monitorización y diagnóstico de la calidad de onda, *Automática e instrumentación*, n. °371.
- [3] Castro, A. M., & Ramos, M. (2008). Efectos de los armónicos en los motores de inducción (Tesis de pregrado). Universidad de la salle, Bogotá D.C.
- [4] Valencia J. A., García C. A. & Martínez W. A. (2016). Proyección de Demanda de Energía Eléctrica y potencia máxima en Colombia. Unidad de Planeación Minero Energética-UPME, pp. 1–32.
- [5] Ministerio de Minas y Energía MME. (2016) "Plan de acción indicativo de eficiencia energética 2017 - 2022", Unidad de Planeación Minero Energética-UPME, República de Colombia.
- [6] 1159-2009 IEEE Recommended Practice for Monitoring Electric Power Quality. New York, NY 10016-5997, USA: IEEE / Institute of Electrical and Electronics Engineers Incorporated, 2009, Revision of IEEE Std 1159-1995.
- [7] Mohamed, A., & Umeh, K. (2010). Intelligent System for Identification of Harmonics Originating from Single Phase Nonlinear Loads. Department of Electrical, Electronics and System Engineering, National University of Malaysia (UKM), IEEE.
- [8] Legowski, S., & Trzynadlowski, A. (1998). Instantaneous Stator Power as a Medium for the Signature Analysis of Induction Motors, Institute of Electrical and Electronics Engineers Incorporated, University of Wyoming, Laramie, IEEE.

- [9] Frigo, G., Narduzzi, C., Bertocco, M., & Giorgi, G. (2016). Multifunction Phasor Analysis for Distribution Networks. IEEE Instrumentation and Measurement Society prior to the acceptance and publication. University of Padova, Padova, Italy.
- [10] Belega, D., Macii, D., & Petri, D. (2016). Power System Frequency Estimation Accuracy of Improved DFT-based Algorithms over Short Intervals. IEEE Instrumentation and Measurement Society prior to the acceptance and publication.
- [11] O Serna, A. Dynamic Phasor Estimates for Power System Oscillations. (Octbre 2007). IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, vol. 56, no. 5, pp. 1648-1657.
- [12] Mai, R. K., He, Z. Y., Fu, L., He, W. & Bo, Z. Q. (Junio 2010). Dynamic phasor and frequency estimator for phasor measurement units. IET Generation, Transmission & Distribution, vol. 4, no. 1, pp. 73-83.
- [13] Petri, D., Fontanelli, D., & Macii, D. (Octubre 2014). A Frequency-Domain Algorithm for Dynamic Synchrophasor and Frequency Estimation, IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, vol. 63, no. 10, pp. 2330-2340.
- [14] Castello, P., Muscas, C., & Pegoraro, P. A. (2011). Performance comparison of algorithms for synchrophasors measurements under dynamic conditions, IEEE International Workshop on Applied Measurements for Power Systems (AMPS), Aachen, Germany, pp. 25-30.
- [15] Barchi, G., Macii, D., & Petri, D. (Mayo 2013). Synchrophasor Estimators Accuracy: A Comparative Analysis. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, vol. 62, no. 5, pp. 963-973.
- [16] Platas-Garza, M. A., & de la O Serna J. A. (Diciembre 2014). Polynomial Implementation of the Taylor Fourier Transform for Harmonic Analysis. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, vol. 63, no. 12, pp. 2846-2854.
- [17] Kušljevi, M. D., & Tomi, J. J. (Febrero 2015). Multiple-Resonator-Based Power System Taylor-Fourier Harmonic Analysis. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, vol. 64, no. 2, pp. 554-563.
- [18] Chen, W., Ulatowski, A. and Bazzi, A. (2015). Threshold-based Power Grid Fault Diagnosis. IEEE Advanced Power Electronics and Electric Drives Laboratory.

- [19] Kahng, A. and Muddu, S. (2012). An Analytical Delay Model RLC for Interconnects. *IEEE Transactions on Computer-Aided Design of Integrated Circuits and systems*, vol. 16, no. 12.
- [20] Hongwei, S., Yuli, L. and Guangfeng, C. (2010). Relations between the Standard Variance and the Allan Variance. *International Conference on Computational and Information Sciences*.
- [21] Allah, R. (2018). Correlation-based synchro-check relay for power systems. *IET Generation, Transmission & Distribution*, vol. 12, no. 5, pp.1109-1120.
- [22] Saleh, S., EL-Hoshy, S. and Gouda, O. (2017). Proposed diagnostic methodology using the cross-correlation coefficient factor technique for power transformer fault identification. *IET Electric Power Applications*, vol. 11, no. 3, pp.412-422.
- [23] Zhou, N., Lou, X., Yu, D., Wang, Q. and Wang, J. (2015). Harmonic Injection-Based Power Fluctuation Control of Three-Phase PV Systems under Unbalanced Grid Voltage Conditions. *IEEE Energies*, vol. 8, no. 2, pp.1390-1405.
- [24] Zbigniewl, S. (2007). Power system properties periodical time variance investigations: hardware and software tools development. *Instrumentation and Measurement Technology Conference - IMTC 2007*.
- [25] Abdel-Akher, M., Ahmad, M., Mahanty, R. and Nor, K. (2013). An Approach to Determine a Pair of Power-Flow Solutions Related to the Voltage Stability of Unbalanced Three-Phase Networks. *IEEE TRANSACTIONS ON POWER SYSTEMS*, vol. 23, no. 3.
- [26] Zhong, Q. and Yao, W. (2018). Data Analysis and Applications of the Power Quality Monitoring. *IEEE Electrical Engineers*.
- [27] Almeida, P., Da Silva, A., Lemes, M. and Garcia, F. (2016). Application of Reactive Compensation equipment in industrial systems under aspects of harmonics and switching transients: A study of real case. *EEE Electrical Engineers*.
- [28] Control of Total Harmonic Distortion in distribution Network using Compensation. (2016). *International Journal of Science and Research (IJSR)*, 5(5), pp.1334-1340.

- [29] Cabrera, I., Barocio, E., Betancourt, R. and Messina, A. (2017). A semi-distributed energy-based framework for the analysis and visualization of power system disturbances. *Electric Power Systems Research*, 143, pp.339-346.
- [30] IEEE Recommended Practice and Requirements for Harmonic Control in Electric Power Systems. (2016). IEEE Power and Energy Society.