

**METODOLOGÍA DE CARACTERIZACIÓN DE LOS PARÁMETROS DE UNA
CARGA ELÉCTRICA DE UNA EDIFICACIÓN**

**JAIME MONCADA ROJAS
JAVIER ANDRÉS CORTES ESPINEL
MARCOS JEISSON VELÁSQUEZ JAIMES**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FISICOMECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍAS ELÉCTRICA,
ELECTRÓNICA Y DE TELECOMUNICACIONES
BUCARAMANGA**

2014

**METODOLOGÍA DE CARACTERIZACIÓN DE LOS PARÁMETROS DE UNA
CARGA ELÉCTRICA DE UNA EDIFICACIÓN**

**JAIME MONCADA ROJAS
JAVIER ANDRÉS CORTES ESPINEL
MARCOS JEISSON VELÁSQUEZ JAIMES**

**Trabajo de grado para optar al título de
Ingeniero Electricista**

**Director
GABRIEL ORDÓÑEZ PLATA
Ingeniero Electricista UIS
Doctor Ingeniero Industrial U.P.C.O**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FISICOMECAÑICAS
ESCUELA DE INGENIERÍAS ELÉCTRICA,
ELECTRÓNICA Y DE TELECOMUNICACIONES
BUCARAMANGA**

2014

DEDICATORIA 1

Dedico este trabajo de grado como fruto de mi esfuerzo y dedicación, principalmente a Dios quien incansablemente está y estará siempre a mi lado. A mis padres y hermana, quienes desde sus corazones han apoyado una a una mis decisiones y me han guiado en el camino de la vida desde cada una de sus perspectivas. A mi prometida que ha sido el pilar en mis estudios, decisiones y mi motivación para no desistir. A mis amigos, mis docentes y cada una de las personas con las que tropecé durante la carrera y quienes desde su mente recursiva formaron parte de la construcción del conocimiento que actualmente tengo y me mostraron que aún tengo un mundo de cosas por conocer, que me regalaron sonrisas de aprobación o me mostraron que estaba equivocado, que me felicitaron o me impulsaron a hacer mejor las cosas.

Para todos ellos con el mayor cariño.

MARCOS JEISSON VELASQUEZ JAIMES

DEDICATORIA 2

Agradezco a mi familia porque desde la distancia siempre estuvo presente, a mi madre que sin importar las dificultades y los problemas nunca desfalleció y siempre estuvo ahí para darme fortaleza, a mi padre y a mi hermano porque siempre me guiaron en el camino...

A mis amigos! a todos ustedes con los que construí un segundo hogar, de quienes me tengo que despedir hoy, con un sentido "hasta luego" y esperando con ansias que el reencuentro sea lo más pronto posible. A mis compañeros representantes de quienes aprendí tanto en este tiempo, con quienes luché por un sueño convertido en universidad, en quienes deposito toda la esperanza de que el trabajo hecho no se perderá.

A la vida misma, al destino y al universo como diría alguien cercano, infinitas gracias por ponerme a prueba tantas veces, por medirme en escenarios impensados.

Hoy deseo dedicarles este logro a todos ustedes. ¡Mil gracias!

JAVIER ANDRES CORTES ESPINEL

DEDICATORIA 3

Dedico este trabajo de grado a mi padre, quien desde pequeño me apoyo en mis decisiones personales para mi vida profesional, agradeciendo su incondicionalidad para con mi persona, para mí es un orgullo demostrarle que seré un profesional.

A mi madre, por su tolerancia y confianza en mí, que a pesar de lo duro que he vivido todos los años estudiando, semestres buenos y malos, me ha dado siempre la tranquilidad de levantarme una y otra vez para terminar mi carrera profesional

A mis hermanos menores, quienes siempre me han tratado con respeto, no solo por ser el hermano mayor y estudiar una carrera profesional, sino porque me han ayudado a resolver problemas personales.

Para todos ellos, lo mejor de lo mejor.

JAIME MONCADA ROJAS

AGRADECIMIENTOS

Los autores manifiestan sus más sinceros agradecimientos a:

A Dios por estar siempre presente dándonos fortaleza, voluntad y sabiduría para superar nuestros obstáculos y aprender de ellos.

A la Universidad Industrial de Santander, por habernos abierto las puertas y alojarnos en sus entrañas durante estos cinco hermosos años.

Al Doctor Gabriel Ordóñez Plata, Director de este proyecto, por darnos la oportunidad de realizar este trabajo de grado y dedicar su valioso tiempo en guiarnos y orientarnos desde su conocimiento.

CONTENIDO

INTRODUCCIÓN.....	23
1. GENERALIDADES SOBRE MEDICIÓN DE POTENCIA Y ENERGÍA ELÉCTRICA.....	26
1.1.CALIDAD DE LA ENERGÍA ELÉCTRICA.....	26
1.2.FACTOR DE POTENCIA	26
1.3.MÉTODOS DE MEDIDA DE LA CALIDAD DE LA ENERGÍA ELÉCTRICA ..	29
1.4.INTERVALOS DE AGREGACIÓN PARA LAS MEDIDAS	31
1.5.BANDERAS (FLAGGING)	31
1.6.NORMA IEEE 1459	32
1.7.DESBALANCES DE LAS SEÑALES DE TENSIÓN	36
2. SELECCIÓN Y ORGANIZACIÓN DE LA INFORMACIÓN OBTENIDA DE LOS EQUIPOS DE MEDICIÓN.	37
2.1.INTERPRETACIÓN DE LAS NORMAS PARA SU POSTERIOR APLICACIÓN	37
2.1.1 Métodos de medida	37
2.1.2 Indicadores y límites	40
2.1.3 Descomposición de la potencia para identificación de las ineficiencias del -- sistema eléctrico.....	43
2.2.IDENTIFICACIÓN Y SELECCIÓN DE DATOS.....	44
2.3.ORGANIZACIÓN DE LA INFORMACIÓN.....	46
2.3.1 Generación de los cuadros de carga sintéticos	47
2.3.2 Cálculos de los parámetros del sistema eléctrico de acuerdo con la norma IEEE 1459	49

2.3.3 Registro cronológico de los parámetros eléctricos	52
2.3.4 Registro en tiempo real de estado estacionario.	53
2.3.5 Registro histórico.	54
3. METODOLOGÍA DE CARACTERIZACIÓN DINÁMICA E HISTÓRICA DE LOS PARÁMETROS DE LA CARGA ELÉCTRICA DE UNA EDIFICACIÓN A PARTIR DE CUADROS DE CARGA SINTÉTICOS.	56
3.1.REGISTRÓ EN TIEMPO REAL DE ESTADO ESTACIONARIO.	57
3.1.1 Límites para los indicadores de los parámetros eléctricos.	57
3.1.2 Representación gráfica en tiempo actual de los parámetros eléctricos en estado estacionario.....	64
3.2.REGISTRO HISTÓRICO	64
3.2.1. Establecimiento de los límites para los indicadores de los parámetros eléctricos.....	65
3.2.2 Representación gráfica del registro histórico de los parámetros eléctricos mediante ventanas de observación.	65
3.3.GESTIÓN DE LA INFORMACIÓN DE LOS PARÁMETROS DEL SISTEMA.	66
3.3.1 Gestión en tiempo actual de estado estacionario.	67
3.3.2 Gestión histórica	76
3.3.3 Gestión centralizada	81
3.4.EJEMPLO DE CARACTERIZACIÓN DE LA CARGA ELÉCTRICA DE UNA EDIFICACIÓN CON GESTIÓN DE LA INFORMACIÓN.....	89
4. CONCLUSIONES, RECOMENDACIONES Y FUTUROS DESARROLLOS....	99
4.1 CONCLUSIONES.....	99
4.2 RECOMENDACIONES.....	102
4.3 FUTUROS DESARROLLOS	103
BIBLIOGRAFÍA.....	105

Lista de figuras

Figura 1. Circuito ejemplo de facturación	27
Figura 2. Descomposición de la potencia aparente efectiva de un sistema trifásico según la norma IEEE 1459.	43
Figura 3. Cuadros de carga sintéticos.....	49
Figura 4. Cálculo de parámetros.	52
Figura 5. Registro cronológico de parámetros eléctricos.....	53
Figura 6. Interfaz gráfica del registro en tiempo actual en estado estacionario	54
Figura 7. Registro histórico, interfaz gráfica.	55
Figura 8. Forma visual de los límites de los indicadores dentro del programa de caracterización	63
Figura 9. Evaluación de U_v	70
Figura 10. Evaluación de F_p	72
Figura 11. Evaluación de S_u/p_{1+}	73
Figura 12. Evaluación de S_{eN}/p_{1+}	74
Figura 13. Evaluación de Q_{1+}/p_{1+}	75
Figura 14. Ventana de gestión de tiempo actual en estado estacionario.....	76
Figura 15. Evaluación para las variables $I-/i+$, $I_0/I+$	77
Figura 16. Evaluación de las variables I_{Hsec+} , I_{Hsec-} e I_{Hsec0}	78
Figura 17. Evaluación de la potencia reactiva de secuencia positiva Q_{1+}	79
Figura 18. Ventana gestión histórica.....	80
Figura 19. Evaluación de los factores de potencia en todos los puntos de medida	82
Figura 20. Evaluación de los desbalances de tensión en todos los puntos de medida.	83
Figura 21. Evaluación de los desbalances de potencia en todos los puntos de medida	85
Figura 22. Evaluación de las distorsiones de potencia en todos los puntos de medida	86
Figura 23. Evaluación de los reactivos de potencia en todos los puntos de medida	87
Figura 24. Ventana Gestión Central.....	88
Figura 25. Primer caso.....	90
Figura 26. Segundo caso	91
Figura 27. Tercer caso.....	92
Figura 28. Cuarto caso.	93

Figura 29.Quinto caso.....94
Figura 30.Sexto caso95
Figura 31.Séptimo caso97

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Parámetros de calidad de energía eléctrica.....	30
Tabla 2. Parámetros de potencia propuestos por la norma IEEE 1459 para un sistema monofásico.....	33
Tabla 3. Parámetros de potencia propuestos por la norma IEEE 1459 para un sistema trifásico.....	34
Tabla 4. Porcentaje máximo de desbalance de tensión.....	41
Tabla 5. Valores de referencia de THD	41
Tabla 6. Valores límite de distorsión de corriente armónica individual (Di) y de distorsión total de demanda (TDD) en Porcentaje de la corriente de carga (IL) (Armónicos Impares)	42
Tabla 7. Valores de las componentes armónicas de las tensiones de fase suministradas por el cuadro de carga sintético	45
Tabla 8. Valores de las componentes armónicas de las corrientes de línea suministradas por el cuadro de carga sintético en un sistema trifásico de cuatro hilos	46
Tabla 9. Parámetros eléctricos de las señales de tensión y corriente evaluados por el programa	50
Tabla 10. Límites de lógica inversa para ineficiencias tensiones y corrientes.....	59
Tabla 11. Límites de lógica inversa para las relaciones de potencias.....	60
Tabla 12. Límites de lógica directa para las potencias y factores de potencia.....	61
Tabla 13. Límites de lógica entre rangos para perturbaciones de tensiones y corrientes.....	62

GLOSARIO

En este apartado se presentan las definiciones de una serie de términos que son utilizados en el documento.

Canal de medida: Vía individual de medida a través de un instrumento.

Nota: No tiene el mismo significado “canal” y “fase”. Un canal de medida de tensión corresponde por definición a una diferencia de potencial entre dos conductores. La fase se refiere a un conductor simple. En los sistemas polifásicos, un canal de medida puede estar entre dos fases, entre una fase y el neutro, o entre una fase y el sistema de puesta a tierra.

Componente armónica: Cualquier componente de una señal periódica que tenga una frecuencia armónica.

Componente fundamental: Componente a cuya frecuencia se genera la energía eléctrica en sistemas de corriente alterna. En el sistema eléctrico colombiano interconectado esta frecuencia está definida entre 59,8 Hz y 60,2 Hz

Desequilibrio de tensión: En una red polifásica, estado en el que los valores eficaces de las tensiones de las componentes fundamentales entre las fases, o los ángulos de fase entre tensiones entre fases consecutivas no son todos iguales.

Frecuencia armónica: Frecuencia que es un múltiplo entero de la frecuencia fundamental

Frecuencia de la tensión de alimentación: Tasa de repetición de la componente fundamental de la tensión de alimentación, medida durante un intervalo de tiempo dado.

Frecuencia fundamental: Frecuencia del espectro de una señal obtenida a partir de una transformada de Fourier de una función periódica, en el dominio del tiempo, a la que se refieren todas las demás frecuencias del espectro.

Hueco de tensión: Disminución brusca del valor eficaz de la tensión de alimentación a un valor situado entre el 90% y el 1% del valor eficaz de la tensión declarada U_c , seguida del restablecimiento de la tensión después de un corto lapso de tiempo. Se ha normalizado que un hueco de tensión puede durar de 10 ms a 1 min. La profundidad de un hueco de tensión es definida como la diferencia entre el valor eficaz mínimo la tensión durante el hueco de tensión y el valor eficaz de la tensión declarada [8].

Parpadeo (flicker): Impresión de inestabilidad de la sensación visual debida a un estímulo luminoso en el cual la luminosidad o la distribución espectral fluctúan en el tiempo.

Potencia activa: Potencia asociada al trabajo útil que se realiza en un sistema eléctrico. Corresponde al valor medio de la potencia instantánea.

Potencia aparente (dimensionamiento): Producto entre el valor eficaz de la tensión (dimensionamiento de aislamiento) y el valor eficaz de la corriente (dimensionamiento de la capacidad de transporte). Es una cantidad matemática y como tal no define una dirección de flujo de energía.

Potencia reactiva: Una de las componentes de la potencia que no se transforma en trabajo útil. Su origen está en la capacidad que tienen los condensadores y bobinas de almacenar energía.

Punto de medida: Lugar de la red eléctrica donde se conectan los equipos de medida, de forma que la energía registrada corresponda a la energía que circula por dicho punto [6].

Tensión de alimentación: Valor eficaz de la tensión presente en un instante dado en el punto de suministro y medido en un intervalo de tiempo dado.

Valor eficaz: Raíz cuadrada de la media aritmética de los cuadrados de los valores instantáneos de una señal periódica durante un intervalo de tiempo que debe ser el período o un múltiplo entero del período de la señal, para un ancho de banda determinado por el filtrado previo de la señal.

Variación de tensión: Aumento o disminución del valor eficaz de la tensión, provocada normalmente por la variación de la carga total de la red de distribución o una parte de ella.

TÍTULO:

METODOLOGÍA DE CARACTERIZACIÓN DE LOS PARÁMETROS DE UNA CARGA ELÉCTRICA
DE UNA EDIFICACIÓN.*

AUTORES:

CORTÉS ESPINEL JAVIER ANDRÉS **

MONCADA ROJAS JAIME **

VELÁSQUEZ JAIMES MARCOS JEISSON**

PALABRAS CLAVE: Factor de potencia, señales de tensión, carga sintética, parámetros eléctricos, ventana de observación, flagging, calidad de la energía eléctrica.

DESCRIPCIÓN:

Este trabajo de grado destaca la importancia de la caracterización dinámica de los sistemas eléctricos, para lo cual desarrolla una metodología de caracterización y diagnóstico de la energía eléctrica, a partir de la cual se abre la posibilidad de ofrecer información concisa al usuario, basada en la monitorización de parámetros eléctricos que se presentan en dos escenarios, en tiempo real de estado estacionario o mediante un registro histórico del funcionamiento del sistema.

La información que se gestiona a partir del desarrollo de esta metodología permite que el usuario reciba información selectiva con valor agregado, que le permitirá diagnosticar de forma dinámica, posibles problemas que se puedan presentar en el sistema eléctrico.

El diagnóstico es desarrollado en dos escenarios de caracterización de la carga eléctrica, con lo cual se permite interactuar al usuario con el sistema, para que realice la gestión de su energía y tenga en cuenta la relación costo-beneficio al tomar decisiones frente al diagnóstico eléctrico de su carga, el cual normatividades y criterios propuestos se aplicaron para clasificar, limitar y caracterizar los parámetros de carga eléctrica en una edificación.

Todo lo anterior, en un trabajo posterior puede tomar mayor relevancia si se extiende para múltiples usuarios, siendo la base para desarrollar el concepto de un sistema de medición inteligente, donde se pueden integrar y visualizar indicadores de calidad de energía eléctrica de un conjunto de usuarios a partir de sus ineficiencias gestionadas de forma centralizada.

* Trabajo de grado.

** Facultad de Ingenierías Físico - Mecánica. Escuela de Ingeniería Eléctrica, Electrónica y Telecomunicaciones. Dr. Gabriel Ordóñez Plata

TITLE:

CHARACTERIZATION METHODOLOGY OF ELECTRICAL LOAD PARAMETERS FOR A BUILDING.*

AUTHORS:

CORTÉS ESPINEL JAVIER ANDRÉS**

MONCADA ROJAS JAIME**

VELÁSQUEZ JAIMES MARCOS JEISSON**

KEYWORDS: Power factor, voltage signals, synthetic charge, electrical parameters, observation window, flagging, power quality.

DESCRIPTION:

This thesis highlights the importance of the dynamic characterization of the electrical systems through the development of a characterization and diagnosis methodology of the electrical energy, which opens the possibility to offer precise information for a user based on the parameters monitorization of two cases, either real-time steady state or using an historical record of the system performance.

The information managed by this methodology allows the user to receive selective information with an added value which gives the ability to dynamically diagnose any possible problem that the system could present.

The diagnosis is done in two scenarios of electrical charge characterization that enable the user to interact with the system and perform the management of the energy and take into account the cost-benefit relationship when making decisions about the diagnosis of the electrical load, which normativities and empirical criteria were used to classify, characterize and limit electrical load parameters for a building.

All above, is a work which can take greater relevance if you extend it to multiple users, being this a basis to develop the concept of a smart grid system, where electrical energy quality indicators can be integrated and displayed from a set of users and it's centrally managed inefficiencies.

* Degree Project.

** Mechanics-physics faculty. Electrics, Electronics and Telecommunications Engineering School. Dr. Gabriel Ordóñez Plata

INTRODUCCIÓN

“Lo que no se puede definir, no se puede medir, lo que no se puede medir no se puede mejorar, y lo que no se puede mejorar eventualmente se deteriora”.

Axioma de calidad [5].

Actualmente en el ámbito nacional se está promoviendo el uso racional y la calidad de la energía en los sistemas eléctricos. En consonancia con lo anterior, es pertinente considerar el siguiente planteamiento: “El Gobierno Nacional, pensando en estimular la modernización de las factorías, en la reforma tributaria (Ley 1607 del 2012) plantea algunos beneficios asociados al impuesto de renta por inversiones en equipos de ciencia y tecnología o por aparatos que contribuyan al cuidado del medio ambiente, por lo cual, proveedores de tecnología y empresas tendrán un incentivo para adoptar prácticas amigables con el medio ambiente en sus procesos productivos, lo que contribuye a la conservación y uso sostenible de energía, en el contexto de eficiencia energética”, señala Edwin Cruz Caballero, director de Energía y Gas de Andesco, tal como lo escribe José M. Higuera en su artículo para Portafolio.co [4].

Para lograr la implementación de estas políticas estatales es necesaria la realización de estudios que permitan establecer si el uso de la energía eléctrica es eficiente o no, lo cual puede ir asociado a una adecuada calidad de ésta en una instalación eléctrica y a la optimización de los costos en los procesos productivos de una empresa.

En este trabajo de grado se establece una metodología de caracterización, basada en datos sintéticos planteando dos escenarios: Actual e histórico (ambos de régimen permanente), de una carga eléctrica de una edificación, la cual consta de equipos tales como: equipos de cómputo, sistemas de iluminación, sistemas de

aires acondicionados entre otros. Es de resaltar, que conocer el comportamiento dinámico de la carga eléctrica de una edificación, es importante para el proceso de integración de los sistemas de medición de diferentes edificaciones en un escenario futuro de un sistema de medición inteligente dentro del contexto de las redes inteligentes

Los escenarios de caracterización han sido establecidos de manera independiente y basados en las normas IEEE1459, IEC 61000-4-30, EN 50160 y NTC 5001, de manera que la información requerida proviene de las medidas obtenidas con equipos utilizados para realizar el diagnóstico del comportamiento dinámico de la carga, para identificar las posibles causas de las ineficiencias energéticas que se puedan presentar en el sistema.

La metodología de caracterización y diagnóstico de la carga eléctrica propuesta, se aplica en este trabajo de grado, a partir de un cuadro de cargas sintético y ha sido diseñada e implementada en el programa de Microsoft Excel utilizando la programación dirigida por eventos Visual Basic. Para realizar las memorias del trabajo de grado realizado, este documento se ha organizado como se describe a continuación.

En el capítulo primero se presenta un marco teórico donde se describe los aspectos que se deben considerar en la medición de potencia y energía, los agentes causantes de pérdidas de energía y, la fundamentación teórica asociada a los procedimientos de evaluación de la calidad y del consumo de la energía eléctrica de un sistema eléctrico, considerando las normas IEEE 1459, EN 50160, IEC 61000-4-30, NTC 5001 para su posterior aplicación. El segundo capítulo presenta la Identificación y selección de los datos necesarios para llevar a cabo los procedimientos establecidos en estas normas.

En el tercer capítulo, se establecen dos escenarios de caracterización de estado estacionario: actual e histórico de los parámetros de una carga eléctrica de una edificación, a partir de un cuadro de cargas sintético. También en este capítulo se plantea un sistema de gestión de la información por medio de la metodología de caracterización de los parámetros eléctricos de una edificación, la cual puede integrarse en un sistema de medición inteligente de una institución como la Universidad Industrial de Santander.

Finalmente en el capítulo cuarto, los autores presentan las conclusiones más relevantes del trabajo realizado, recomendaciones y proponen futuros desarrollos en esta temática.

1. GENERALIDADES SOBRE MEDICIÓN DE POTENCIA Y ENERGÍA ELÉCTRICA

En este capítulo se tratan las bases teóricas útiles para el desarrollo de este trabajo de grado, exponiendo conceptos, normas y ecuaciones que facilitan la comprensión del contenido presentado en los capítulos posteriores.

1.1. CALIDAD DE LA ENERGÍA ELÉCTRICA

La Academia de Ciencias define la calidad de la energía eléctrica como un indicador del nivel de adecuación de la instalación para soportar y garantizar un funcionamiento fiable de sus cargas. Una perturbación eléctrica o evento puede afectar a la tensión, la corriente o la frecuencia. Las perturbaciones eléctricas pueden originarse en las instalaciones del usuario, las cargas del usuario o la compañía eléctrica [1].

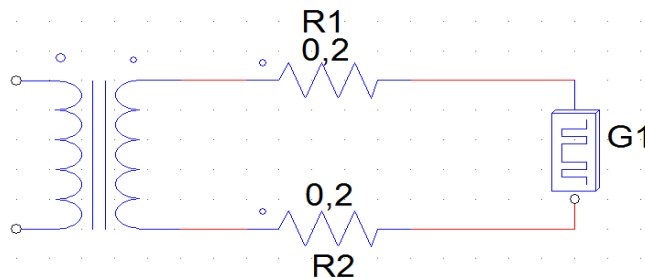
1.2. FACTOR DE POTENCIA

El factor de potencia (**FP**) es el parámetro que evalúa el rendimiento de una red eléctrica, relacionando la potencia utilizable (**P**), con la que es necesario aportarle potencia aparente (**S**); por lo tanto, cuanto menor es el factor de potencia, mayores son las pérdidas de potencia en la línea de alimentación, para una potencia activa demandada. Consecuentemente, los receptores que presentan un bajo factor de potencia y una alta distorsión armónica, dan lugar a unas mayores pérdidas en las líneas, así como la necesidad de sobredimensionar los sistemas de generación, transmisión y distribución de energía eléctrica [3].

Por lo descrito anteriormente, las empresas suministradoras de energía eléctrica, penalizan a los usuarios que tengan un bajo factor de potencia.

En la **Figura 1** se presenta un circuito de facturación que define las condiciones bajo las cuales se evalúan dos clientes 1 y 2, con diferente factor de potencia. Para ilustrar como se factura la energía eléctrica.

Figura 1. Circuito ejemplo de facturación



Fuente: Autores

Condiciones de consumo de los clientes 1 y 2: $R_1 = R_2 = 0,2 \Omega$; G1 es una carga de 10 kW, conectada durante 8 horas diarias en 25 días al mes. Al cliente 1 se le mide un $FP=1$ mientras que al cliente 2 el factor de potencia medido es $FP= 0,5$.

- A continuación se presenta las ecuaciones utilizadas por el operador de red para realizar la facturación de la energía eléctrica:

$$\text{Si } FP \geq 0,9 \gg W\$ = Wp$$

$$\text{Si } FP < 0,9 \gg W\$ = Wp + (Wq - 0,5 * Wp)$$

$$Wq = \frac{Wp}{FP} * \sin\{\cos^{-1}(FP)\} \quad (1. 1)$$

Donde:

W\$= Costo de la factura mensual
(watts /hora)

Wp= Trabajo activo

Wq= Trabajo reactivo

Wp= G(#horas)(#días)

CLIENTE 1 $FP=1$ $V_s=200V$

$$FP = \frac{P}{S} = \frac{P}{V_{ef}I_{ef}} \quad (1. 2)$$

$$I_s = \frac{P}{FP * V_s} = \frac{10 \text{ kw}}{1,0 * 0,20kV} = 50 \text{ A} \quad (1. 3)$$

$$P_p = n * I_s^2 * R = 2 * 0,2 * 50^2 * 10^{-3} \quad (1. 4)$$

$$= 1\text{kW}$$

$$W_{\$F} = (10 * 8 * 25)kWh * \frac{\$400}{kWh} = \$800 \text{ 000} \quad (1. 5)$$

CLIENTE 2 $FP=0,5$ $V_s=200V$

$$I_s = \frac{P}{FP * V_s} = \frac{10 \text{ kw}}{0,5 * 0,20KV} = 100 \text{ A} \quad (1. 6)$$

$$P_p = n * I_s^2 * R = 2 * 0,2 * 100^2 * 10^{-3} = 4kW \quad (1.7)$$

$$W_q = \frac{10 * 8 * 25}{0,5} * \sin\{\cos^{-1}(0,5)\} = 3464,1016 \text{ kVAr} \quad (1.8)$$

$$W_{\$F} = (2000 + (3464 - 0,5 * 2000)kWh * \frac{\$400}{kWh} = \$1 \text{ 785 600} \quad (1.9)$$

En el ejemplo anterior se evidencia la importancia de caracterizar la carga eléctrica para conocer su comportamiento dinámico e identificar posibles causas de ineficiencia, que reducen el factor de potencia. A nivel de usuario, la facturación genera un incremento significativo de dinero a pagar por una energía que no se convierte en trabajo útil y a nivel de la operadora de red aumentan las pérdidas de energía en la línea de transmisión de la energía eléctrica.

1.3. MÉTODOS DE MEDIDA DE LA CALIDAD DE LA ENERGÍA ELÉCTRICA

La norma IEC 61000-4-30, establece para cada parámetro dos clases de métodos en la medida:

- Clase A: Es el requerimiento de medida más exigente y se debe utilizar cuando sean necesarias medidas con incertidumbres bajas. Por ejemplo, en aplicaciones de tipo contractual, para verificar el cumplimiento de normas, para dirimir disputas, etc.

- Clase B: El nivel de exigencia en la medida es menor. Resulta adecuado para realizar diagnósticos o hacer un seguimiento de la calidad de la energía eléctrica en una instalación.

Las medidas de tensión, armónicas, inter-armónico y desequilibrios se deben llevar a cabo periódicamente. La Tabla 1 resume los parámetros utilizados para valorar la calidad de la energía eléctrica con las incertidumbres asociadas, dependiendo de la clase estipulada en la medición.

Tabla 1. Parámetros de calidad de energía eléctrica

Parámetro	Medida	Clase A		Clase B
		Intervalo	Exactitud	Procedimiento(y exactitudes)
Frecuencia	Hz	10 s	± 12 mHz	A especificar por el fabricante
Tensión de alimentación	Vrms	10 ciclos	± 0,1 %	A especificar por el fabricante
Flicker	Plt	CEI 61000-4-15		A especificar por el fabricante
Huecos, sobretensiones, Interrupciones	Vrms, t, T	Vrms 1/2 ciclo (10 ms)	± 0,2 %	Vrms 1/2 ciclo
Desequilibrio	% desequilibrio	Método de las componentes simétricas		A especificar por el fabricante
Armónicos e Interarmónicos	THD, Armónicos, Interarmónicos	CEI 61000-4-7		A especificar por el fabricante
Transmisión de Señales	Vrms	Medida de interarmónicos (para f>3kHz ver CEI 61000-3-8)		A especificar por el fabricante
Flagging (advertencia de posible medida incorrecta por efecto de un hueco,	Aviso en pantalla	Requerido en las medidas de frecuencia, tensión, flicker, desequilibrio, armónicos e		No requerido
Sincronización horaria		A través de reloj externo, por GPS, etc		A especificar por el fabricante

Fuente: Norma IEC 61000-4-30, modificada por los autores}

1.4. INTERVALOS DE AGREGACIÓN PARA LAS MEDIDAS

Para efectos de evaluación de la medida, se deben promediar los resultados obtenidos en cada ciclo durante un tiempo superior. La norma IEC 61000-4-30 propone cuatro intervalos de agregación [8]:

- Ventana base de observación (200ms): agregación de 12 ciclos.
- Intervalos muy cortos (3s): agregación de 15 ventanas base.
- Intervalos cortos (10 min): agregación de 200 intervalos muy cortos.
- Intervalos largos (2 h): agregación de 12 intervalos cortos.

1.5. BANDERAS (FLAGGING)

La utilización de banderas es utilizada como una advertencia de posible medida incorrecta cuando sucede se presentan perturbaciones de corta duración como: un hueco de tensión, una sobretensión o una interrupción, en la cual, los algoritmos de medida de los parámetros eléctricos relacionados con señales periódicas tendrán incertidumbres elevadas.

Por ejemplo, en presencia de una interrupción de tensión, no hay posibilidad de medir frecuencia, y el algoritmo de medida utilizado del equipo de medición estimará un valor por fuera de los límites de incertidumbre aceptables. Por lo tanto, al evento de interrupción de tensión se le añadirá un evento de frecuencia (igualmente otros eventos tales como de flicker, armónicos, desequilibrios, etc.)

Para evitar contabilizar varias perturbaciones cuando realmente es una sola, en presencia de huecos de tensión, sobretensiones e interrupciones de tensión, las medidas de frecuencia, tensión, flicker, desequilibrios, armónicos, inter-armónicos

y transmisión de señales se acompañarán de una indicación de aviso (flag = bandera) [8].

1.6. NORMA IEEE 1459

El estándar IEEE 1459- 2010, propone la evaluación de los parámetros de potencia de sistemas trifásicos considerando los efectos de condiciones de desequilibrio y/o presencia de armónicos en el sistema. En la Tabla 2 se resumen las definiciones propuestas en este documento en el caso de sistemas monofásicos, para una mejor comprensión del desarrollo y resultados obtenidos en las simulaciones realizadas. En esta tabla, P_1 hace referencia a la potencia activa fundamental y P_H es la potencia activa armónica. En el caso de la potencia reactiva, solo se evalúa la potencia reactiva fundamental Q_1 . Según esta nueva propuesta, la potencia aparente S se compone de dos términos: la potencia aparente fundamental S_1 que incluye los valores de P_1 y Q_1 ya citados, y el término S_N , correspondiente a la potencia aparente no fundamental, que engloba los términos de potencia debido a tensión y/o corriente distorsionadas (D_I , D_V y S_H).

Tabla 2. Parámetros de potencia propuestos por la norma IEEE 1459 para un sistema monofásico.

SISTEMAS MONOFÁSICOS	
Potencia aparente S	$S = VI; S^2 = S_1^2 + S_N^2; S_1 = VI$
Potencia Activa P₁	$P = \frac{1}{T} \int_0^T v(t)i(t)dt$
Potencia reactiva fundamental Q₁	$Q_1 = V_1 I_1 \text{ sen } \theta_1$
Factor de Potencia FP	$FP = \frac{P}{S} = \frac{P_1 + P_H}{S}$
Factor de Potencia Fundamental FP₁	$FP_{e1} = \cos \theta_1 = \frac{P_1}{S_1}$
Potencia aparente por distorsión de corriente D_I	$D_I = V_1 I_H$
Potencia aparente por distorsión de tensión D_V	$D_V = V_H I_1$
Potencia aparente por distorsión armónica S_H	$S_H = V_H I_H$
Tensión armónica V_H	$V_H = \sqrt{V^2 - V_1^2}$
Corriente armónica I_H	$I_H = \sqrt{I^2 - I_1^2}$

Fuente: Norma IEEE 1459, modificada por los autores

Una de las fortalezas de la propuesta de la norma es que el factor de potencia (**FP**) cuantifica la efectividad del flujo de energía eléctrica en un sistema, y el factor de potencia fundamental (**FP₁**) cuantifica la efectividad del flujo de potencia fundamental.

Para el caso de sistemas trifásicos, en los que además de distorsión armónica pueden aparecer desequilibrios o desbalances en las tensiones o corrientes, se definen los términos de potencia que se muestran en la Tabla 3. En esta tabla, el subíndice “e” hace referencia a términos de tensión, corriente o potencia “efectiva”.

Tabla 3. Parámetros de potencia propuestos por la norma IEEE 1459 para un sistema trifásico.

SISTEMAS TRIFÁSICOS	
Potencias efectivas globales	
Potencia aparente efectiva S_e	$S_e = 3V_e I_e; S_e^2 = S_{e1}^2 + S_{eN}^2$
Factor de Potencia efectivo FP_e	$FP_e = \frac{P}{S_e} = \frac{P_1^+ + P_{u1} + P_{01} + P_H}{S_e}$
Potencia activa P	$P = \frac{1}{T} \int_0^T [v_a(t)i_a(t) + v_b(t)i_b(t) + v_c(t)i_c(t)] dt$
Potencia efectiva no fundamental	
Potencia aparente efectiva no fundamental S_{eN}	$S_{eN} = \sqrt{S_e^2 - S_{e1}^2}$
Potencia aparente efectiva armónica S_{eH}	$S_{eH} = 3V_{eH} I_{eH}$
Potencia aparente efectiva por distorsión de corriente De_I	$De_I = 3V_{e1} I_{eH}$
Potencia aparente efectiva por distorsión de tensión De_V	$De_V = 3V_{eH} I_{e1}$
Potencia activa armónica P_H	$P_H = P - P_1$
Potencia de distorsión armónica De_H	$De_H = \sqrt{S_{eH}^2 - P_H^2}$
Potencia efectiva fundamental	
Potencia Aparente fundamental efectiva S_{e1}	$S_{e1} = 3V_{e1} I_{e1}; S_{e1}^2 = S_{e1}^{+2} + S_{u1}^2$
Factor de Potencia Fundamental de FP_{e1}	$FP_{e1}^+ = \frac{P_1^+}{S_{e1}^+}$

SISTEMAS TRIFÁSICOS	
Potencia activa fundamental P_1	$P_1 = V_{1a}I_{1a} \cos(\theta_{1a}) + V_{1b}I_{1b} \cos(\theta_{1b}) + V_{1c}I_{1c} \cos(\theta_{1c})$
Potencia fundamental de secuencia positiva	
Potencia aparente fundamental de secuencia positiva S_{1+}	$S_{1+} = 3V_1I_1; S_{1+}^2 = P_{1+}^2 + Q_{1+}^2$
Potencia activa fundamental de secuencia positiva P_{1+}	$P_{1+} = 3V_1I_1 \cos(\theta_{v_1}^+ - \theta_{i_1}^+)$
Potencia reactiva fundamental de secuencia positiva Q_{1+}	$Q_{1+} = \sqrt{S_{1+}^2 - P_{1+}^2}$
Factor de Potencia Fundamental de secuencia directa FP_{e1+}	$FP_{e1+} = \frac{P_{1+}}{S_{1+}}$
Potencia aparente fundamental de desbalance S_{U1}	$S_{U1} = \sqrt{S_{e1}^2 - S_{1+}^2}$

Fuente: Norma IEEE 1459, modificada por los autores

De modo análogo al caso de sistemas monofásicos, la potencia aparente efectiva se descompone en los términos de potencia aparente efectiva fundamental (S_{e1}) y potencia aparente efectiva no fundamental (S_{eN}). La diferencia estriba en que, en el caso de sistemas trifásicos, los cálculos se realizan con los valores eficaces de tensión y corrientes, V_e e I_e . La potencia aparente fundamental se descompone en potencia aparente fundamental de secuencia positiva o directa, S_{1+} y potencia aparente fundamental de desequilibrio, S_{U1} .

El subíndice “U” engloba las componentes de secuencia inversa y homopolar. El factor de potencia efectivo (FP_e) se calcula del mismo modo que en el caso de sistemas monofásicos, mientras que el factor de potencia fundamental de

secuencia directa (FP_{e1^+}) mide el flujo de potencia fundamental de secuencia positiva no polucionada (ni por armónicos ni por desequilibrios) [9].

1.7. DESBALANCES DE LAS SEÑALES DE TENSIÓN

Un desbalance de tensión es definido algunas veces como la máxima desviación del promedio de tensiones o de las corrientes trifásicas, dividida por el promedio de las tensiones o de las corrientes trifásicas y expresado en por ciento. Otra forma más utilizada de definir el desbalance de las señales de tensión o corriente, es en función de las componentes simétricas. La razón entre las magnitudes de la componente de secuencia negativa o de la componente de secuencia cero, con relación a la componente de secuencia positiva es utilizada para especificar el desbalance de un sistema trifásico.

Los estándares más recientes especifican que debe utilizarse el desbalance de secuencia negativa para especificar el grado de desbalance de un sistema trifásico. La fuente principal de desbalances en la tensión, es la conexión de cargas monofásicas en un sistema trifásico [2].

2. SELECCIÓN Y ORGANIZACIÓN DE LA INFORMACIÓN OBTENIDA DE LOS EQUIPOS DE MEDICIÓN.

Para la aplicación de estrategias de mejoramiento del sistema eléctrico es conveniente conocer en qué instante sucede un evento eléctrico y qué variables del sistema afectan la calidad de la energía eléctrica. Para lograr esto, se deben evaluar los indicadores establecidos por normas internacionales, para de esta forma tener criterios universales para realizar un adecuado diagnóstico de la calidad de la energía eléctrica. Dichas normas corresponden a organismos tales como: La Comisión Electrotécnica Internacional (IEC), el Instituto de Ingenieros Electricistas y Electrónicos (IEEE), Norma Española (EN) , el Instituto Nacional Estadounidense de Estándares (ANSI), las cuales especifican los límites de calidad de la energía, periodos de agregación, descomposición de potencia, entre otras.

2.1 INTERPRETACIÓN DE LAS NORMAS PARA SU POSTERIOR APLICACIÓN

A continuación se realiza un resumen de las especificaciones que se aplican de las normas internacionales IEC 61000-4-30, IEEE 1459, EN 50160, y NTC 5001 para la medición y diagnóstico tanto de la energía eléctrica como de su calidad.

2.1.1 Métodos de medida

Para especificar los intervalos de agregación de los datos obtenidos con los equipos de medición se establecen ventanas de observación que permiten evaluar los parámetros de calidad de la energía eléctrica. Estas ventanas de agregación

son definidas por la norma IEC 61000-4-30. Esta Norma propone cuatro ventanas o intervalos de observación:

- Ventana base de observación de 10 ciclos para sistemas eléctricos de corriente alterna frecuencia nominal 50 Hz y 12 ciclos para sistemas eléctricos de frecuencia nominal 60Hz, que en tiempo corresponde a 200 ms si estas son las frecuencias del sistema. Así por ejemplo el valor eficaz de una señal de tensión se evaluaría como:

$$U_{RMS_{200ms}} = \sqrt{\frac{1}{200ms} \int_t^{t+200ms} U(\tau) d\tau} \quad (2.1)$$

- Ventana de intervalos muy cortos: datos promediados cada 3 segundos, a partir de los valores evaluados cada 10 o 12 ciclos. Para evaluar el valor eficaz de la tensión, la ecuación es:

$$U_{RMS_{3s}} = \sqrt{\frac{1}{15} \sum_{i=1}^{15} U_{RMS_{200ms}}^2} \quad (2.2)$$

- Ventana de intervalos cortos: datos promedios cada 10 minutos, a partir de los valores evaluados cada 3 segundos. Para evaluar el valor eficaz de la tensión, la ecuación es:

$$U_{RMS_{10min}} = \sqrt{\frac{1}{200} \sum_{i=1}^{200} U_{RMS_{3s}}^2} \quad (2.3)$$

- Ventana de intervalos largos: datos promedios de cada 2 horas, a partir de los valores evaluados cada 10 minutos. Para evaluar el valor eficaz de la tensión, la ecuación es:

$$U_{RMS_2h} = \sqrt{\frac{1}{12} \sum_{i=1}^{12} U_{RMS_10min}^2} \quad (2. 4)$$

Otros parámetros que se deben evaluar según esta norma son:

- La medida de valores de tensión, basados en el valor eficaz, indicando intervalos de sobretensión (“swell”), baja tensión (“dip”) e interrupción (“interruption”). En este caso la ventana de observación es de un ciclo y deben traslaparse las ventanas de evaluación medio ciclo.
- Medida de frecuencia promediando cada 10 minutos
- Medidas de armónicos de tensión, según la norma IEC 61000-4-7, de acuerdo con los intervalos previamente establecidos.
- Medida de Flicker, según la norma IEC 61000-4-15, utilizando el indicador del nivel de severidad del Flicker de corta duración (PST) para intervalos de 10 minutos o el indicador del nivel de severidad del Flicker de larga duración (PLT) para intervalos de 2 horas.
- Medidas del % de desequilibrio utilizando las componentes fundamentales de tensiones de línea de U_{12} , U_{23} , U_{31} .

Si se requieren ventanas de observación de otros intervalos, las ventanas bases pueden ser la de intervalos cortos (10 minutos) o la de intervalos largos (2 horas). De esta forma se pueden obtener valores representativos de los parámetros de la señal por ejemplo de un día, de una semana, de un mes, o de un año.

2.1.2 Indicadores y límites

Los criterios para la obtención de indicadores y límites están normalizados y establecidos en las normas EN 50160, IEEE 519, y la NTC 5001 y entre ellos existen más similitudes que diferencias.

La norma EN 50160 es utilizada en Europa y normalizada en todos los equipos de medición de calidad de la energía eléctrica, pero en este trabajo de grado se utilizó la norma NTC 5001 que toma como referencia la EN 50160, entre otras normas para la evaluación de la calidad de energía de los parámetros eléctricos en la metodología de caracterización. Se dejó a criterio del usuario la posibilidad de modificar todos los límites e indicadores en el programa realizado para cada punto de medida (ver Capítulo 3), aplicando las normas antes mencionadas o cualquier norma que se actualice facilitando la diversidad de opciones para que el usuario pueda interactuar al caracterizar la carga de la edificación.

En la norma EN 50160 se define el rango de calidad de la energía con respecto a la tensión suministrada, fijando los límites de perturbación admitidos para la onda de tensión.

Para estimar la calidad de un sistema eléctrico es necesario obtener una serie de parámetros eléctricos, los cuales se deben compactar a un número reducido de estos que sean representativos de dicha calidad y a la vez que contenga la máxima información de posibles perturbaciones eléctricas. No obstante, las citadas normas se limitan a dar una serie de definiciones y fija algunos límites de perturbación de la onda de tensión, sin especificar ni la forma de medir ni los intervalos de promediado a aplicar.

La norma NTC 5001 establece los límites de evaluación de los parámetros eléctricos asociados a la calidad de la potencia eléctrica en el punto de conexión

común entre el operador de red y el usuario para todos los niveles de tensión, bajo condiciones normales de operación [7]. Los Indicadores y límites que se evalúan están definidos en las tablas 4,5 y 6.

Tabla 4. Porcentaje máximo de desbalance de tensión

RANGO DE TENSIÓN	VALOR DE REFERENCIA
Vn<69kv	2.0%
Vn≥69kv	1.5%

Fuente: Norma NTC 5001, modificada por los autores

Tabla 5. Valores de referencia de THD

RANGO DE TENSIÓN	DISTORSIÓN ARMÓNICA INDIVIDUAL (%)	DISTORSIÓN ARMÓNICA TOTAL THD _v (%)
1 KV<Vn≤69kv	3.0	5.0
69KV<Vn≤161kv	1.5	2.5
Vn≥161kv	1.0	1.5

Fuente: Norma NTC 5001, modificada por los autores

Tabla 6. Valores límite de distorsión de corriente armónica individual (D_i) y de distorsión total de demanda (TDD) en Porcentaje de la corriente de carga (I_L) (Armónicos Impares).

LIMITES DE DISTORSIÓN EN CORRIENTE PARA SISTEMAS DE DISTRIBUCIÓN $1KV < V_n \leq 69KV$						
RELACIÓN I_{sc}/I_L	<11	$11 \leq h < 17$	$17 \leq h < 23$	$23 \leq h < 35$	$h \geq 35$	TDD
<20	4,0	2,0	1,5	0,6	0,3	5,0
20<50	7,0	3,5	2,5	1,0	0,5	8,0
50<100	10,0	4,5	4,0	1,5	0,7	12,0
100<1000	12,0	5,5	5,0	2,0	1,0	15,0
>1000	15,0	7,0	6,0	2,5	1,4	20,0
LIMITES DE DISTORSIÓN EN CORRIENTE PARA SISTEMAS DE SUBTRANSMISIÓN $69KV < V_n \leq 161KV$						
<20	2,0	1,0	0,75	0,3	0,15	2,5
20<50	3,5	1,75	1,25	0,5	0,25	4,0
50<100	5,0	2,25	2,0	0,75	0,35	6,0
100<1000	6,0	2,75	2,5	1,0	0,5	7,5
>1000	7,5	3,5	3,0	1,25	0,7	10,0
LIMITES DE DISTORSIÓN EN CORRIENTE PARA SISTEMAS DE TRANSMISIÓN ($V_n > 161KV$), GENERACIÓN DISTRIBUIDA Y COGENERACIÓN						
<25	1,0	0,5	0,38	0,15	0,1	1,5
25<50	2,0	1,0	0,75	0,3	0,15	2,5
>50	3,0	1,5	1,15	0,45	0,22	3,75

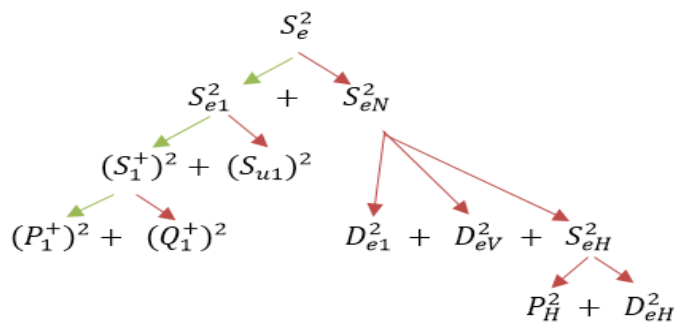
Fuente: Norma NTC 5001, modificada por los autores

2.1.3 Descomposición de la potencia para identificación de las ineficiencias del sistema eléctrico.

La norma IEEE 1459 establece una metodología para evaluar parámetros eléctricos asociados a la potencia y por consiguiente a la energía eléctrica, diferenciando las potencias requeridas a la frecuencia fundamental de las demandadas por la aparición de otras componentes armónicas. Adicionalmente, el modelo de potencia propuesto por esta norma tiene en cuenta las pérdidas de energía eléctrica que se generan por el transporte de la misma, lo cual permite obtener indicadores para discriminar las causas de una ineficiencia energética.

Los parámetros de potencia que se evalúan están definidos en las tablas 2 y 3 para sistemas eléctricos monofásicos y trifásicos respectivamente. Para el caso de sistemas trifásicos, esta norma permite realizar la descomposición de la potencia aparente efectiva requerida por el sistema eléctrico tal como se muestra en la Figura 2 y de esta forma es posible identificar y cuantificar las potencias aparentes debidas a las distorsiones de las señales de tensión y corriente, y también a los desbalances que se presenten en un sistema trifásico tanto en las tensiones como en las corrientes. Las ecuaciones requeridas para evaluar cada una de las potencias mostradas en la Figura 2, son descritas en la Tabla 3.

Figura 2. Descomposición de la potencia aparente efectiva de un sistema trifásico según la norma IEEE 1459.



Fuente: Norma IEEE 1459 modificada por autores

2.2 IDENTIFICACIÓN Y SELECCIÓN DE DATOS

La obtención de información se logra a partir de un equipo de medición instalado en un punto de la red, que permita evaluar los parámetros eléctricos según las normas IEEE 1459, IEEE 519, EN 50160 y NTC 5001 y de acuerdo con las especificaciones de las normas IEC 61000-4-30, IEC 61000-4-7 e IEC 61000-4-15.

La norma europea EN 50160, establece los parámetros de las señales de tensión, que se deben evaluar en un sistema trifásico, para realizar diagnósticos de calidad de la energía eléctrica. Sin embargo, para realizar un diagnóstico completo del sistema eléctrico y realizar la respectiva gestión de información, también es necesario evaluar los parámetros de las señales de corriente del sistema trifásico.

Para realizar el diagnóstico de la calidad de la energía y la caracterización de la carga eléctrica haciendo uso del programa desarrollado en la metodología establecida en este trabajo de grado, se requiere que el equipo de medición proporcione información de los parámetros evaluados en por lo menos las tres tensiones de fase y las cuatro corrientes del sistema eléctrico y, de ser factible, también la tensión entre el neutro y el sistema de puesta a tierra.

Para este trabajo de grado, debido a que las señales del sistema eléctrico son simuladas, se procesan los parámetros de las tres señales de las tensiones de fase y las tres corrientes de línea. Si el sistema es de cuatro hilos, la corriente del neutro se obtiene sumando las tres corrientes de línea.

Sin importar el sistema de adquisición de los datos: medición directa o datos sintéticos, es necesario establecer la limitación del software y a su vez del programa al ejecutar acciones repetitivas como mínimo cada un segundo. Si fuese medición directa, la selección adecuada sería procesar la información de

ventanas de datos de tres segundos; en cumplimiento de uno de los intervalos de observación establecidos en la norma IEC 61000-4-30.

Para el desarrollo de este trabajo de grado, las muestras se han generado sintéticamente, dado la ausencia de los equipos de medición requeridos, dando como resultado cuadros de carga que simulan el ingreso de estos datos al programa. En el momento en que los equipos estén disponibles se deberá realizar un enlace entre el programa diseñado en este trabajo de grado y una hoja de datos del equipo utilizado para realizar la medición.

En las tablas 7 y 8 se presenta el esquema de los datos suministrados por un cuadro de carga sintético en función del tiempo.

Tabla 7. Valores de las componentes armónicas de las tensiones de fase suministradas por el cuadro de carga sintético

Parámetros de las componentes armónicas de las tensiones de fase					
VRMS1A	$\theta.VRMS1A$	VRM1SB	$\theta.VRM1SB$	VRMS1C	$\theta.VRMS1C$
VRMS2A	$\theta.VRMS2A$	VRM2SB	$\theta.VRM2SB$	VRMS2C	$\theta.VRMS2C$
...
VRMS24A	$\theta.VRMS24A$	VRM24SB	$\theta.VRM24SB$	VRMS24C	$\theta.VRMS24C$
VRMS25A	$\theta.VRMS25A$	VRM25SB	$\theta.VRM25SB$	VRMS25C	$\theta.VRMS25C$

Fuente: Autores

Tabla 8. Valores de las componentes armónicas de las corrientes de línea suministradas por el cuadro de carga sintético en un sistema trifásico de cuatro hilos.

Parámetros de las componentes armónicas de las corrientes de línea					
IRMS1A	θ .IRMS1A	IRMS1B	θ .IRMS1B	IRMS1C	θ .IRMS1C
IRMS2A	θ .IRMS2A	IRMS2B	θ .IRMS2B	IRMS2C	θ .IRMS2C
...
IRMS25A	θ .IRMS25A	IRMS25B	θ .IRMS25B	IRMS25C	θ .IRMS25C

Fuente: Autores

La información de estos cuadros de carga reemplazan los parámetros que se obtendrían cada tres segundos del equipo de medición. Con estos cuadros de carga se pueden generar parámetros eléctricos aleatoriamente, que permiten simular diferentes escenarios de cargas reales, lo cual permite aplicar la metodología de caracterización y gestión de la información.

2.3 ORGANIZACIÓN DE LA INFORMACIÓN

En este apartado se describen las secciones que constituyen el programa para la caracterización de carga y la gestión de la información según la metodología desarrollada. La primera sección es la generación de los cuadros de carga sintéticos a partir de los datos mostrados en las tablas 7 y 8. Para este trabajo de grado se implementaron un total de seis (06) cuadros de carga que representan seis comportamientos diferentes de la misma, considerando que el sistema trifásico es de cuatro hilos. En la segunda sección se hace la lectura de los cuadros de carga y los cálculos requeridos para su procesamiento. La tercera sección del programa, realiza un registro cronológico de los datos generados y

calculados para construir un histórico de comportamiento de carga. En la cuarta sección se desarrolla una interfaz gráfica que permite presentar en tiempo real de estado estacionario el comportamiento dinámico de la carga eléctrica. Finalmente, la quinta sección corresponde a la interfaz gráfica que permite acceder al comportamiento histórico de la carga.

2.3.1 Generación de los cuadros de carga sintéticos

Para simular un comportamiento de carga variable en función del tiempo, se diseñaron e implementaron en una hoja de Excel un conjunto de tablas llamadas cuadros de carga, que contienen como variables de entrada las magnitudes y los ángulos fase de las tensiones y las corrientes de cada una de las componentes armónicas (incluida la componente fundamental) y se organizan de tal manera que cada cuadro de carga sintético representa un tipo de carga diferente.

Cada cuadro de carga es almacenado cada tres segundos en el cuadro de ingreso de datos sintéticos, generando datos de entrada que representan las lecturas de los parámetros eléctricos del sistema eléctrico de la edificación. Estos datos se generan de manera aleatoria mediante un código de temporizador programado en Visual Basic y, en conjunto con la función aleatoria de Excel (ALEATORIO ())*(LIMITES!B3-LIMITES!B2)+LIMITES!B2)de acuerdo con un rango de valores establecido para cada cuadro de carga.

Estos datos corresponden a:1) La magnitud de las componentes fundamentales de la tensión y de la corriente en por unidad y sus ángulos de fase en grados, 2) La magnitud de cada una de las componentes armónicas en porcentaje (%) de la componente fundamental de acuerdo a su orden armónico y, 3) Los ángulos de fase de estas componentes en grados los cuales se generan de forma aleatoria e

independiente de la componente fundamental, dentro de un rango establecido según el cuadro de carga al que corresponda.

Los 6 cuadros de carga elaborados, representan la dinámica de una carga sintética durante un día en un sistema eléctrico trifásico de cuatro hilos. El primer cuadro de carga se caracteriza por ser aproximadamente ideal, ya que las perturbaciones eléctricas en el sistema son muy leves, una carga trifásica lineal balanceada, (todos los factores de potencia FP_e , FP_{e1} y FP_{e1+} aproximadamente 1). El segundo cuadro de carga contiene gran magnitud de reactivos fundamentales de secuencia positiva (Q_{1+}) en el sistema, una carga trifásica inductiva balanceada. El tercer cuadro de carga representa desbalances eléctricos de corrientes con gran magnitud de I_0 (corriente de secuencia cero), un consumo de carga trifásico con desbalances de corriente. Los cuadros de carga cuatro, cinco y seis son caracterizados por una carga no lineal, la cual afecta a cada uno de los armónicos: 7 (armónicos de sec+), 3 y 9 (armónicos triplos o de sec 0), 5 y 11 (armónicos de sec -) respectivamente.

Estos cuadros de carga se relevan periódicamente de manera automática por medio de un código generado en Visual Basic, el cual consta de un ciclo repetitivo formado por condicionales "if", debido a que no se pueden usar ciclos "FOR" y "DO WHILE" puesto que se está ejecutando el temporizador: `SIG = NOW + TIMEVALUE("00:00:03") APPLICATION.ONTIME SIG, "ejecutar"`. Del mismo modo se generó un contador para poder ejecutar este ciclo por medio de una variable que se guarda en celdas de la plataforma de Excel, dado que Visual Basic no almacena el valor de las variables calculadas mientras se ejecuta el temporizador. Para fines académicos los cuadros de carga han sido programados para relevarse a criterio del usuario, tanto en números de cuadros de carga (1-6) como en su tiempo de duración. En la Figura 3 se presenta la hoja de cálculo para la creación de los cuadros de carga sintéticos y en la cual se aprecian los seis.

Figura 3. Cuadros de carga sintéticos

	VRMS1A	θ.VRMS1A	VRM1SB	θ.VRM1SB	VRMS1C	θ.VRMS1C	IRMS1A	θ.IRMS1A	IRMS1B	θ.IRMS1B	IRMS1C	θ.IRMS1C	VRMS2A	θ.VRMS2A	VRMS3A	θ.VRMS3A	VRMS4A	θ.VF
	0,99	0	0,99	-120	0,99	120	0,98	-4	0,98	-124	0,98	116	0%	0	1%	0	0%	
	1,01	1	1,01	-119	1,01	121	1,01	0	1,01	-120	1,01	120	0%	0	2%	0	0%	
VALORES EN P.U	<div style="display: flex; justify-content: space-between;"> <div style="border: 1px solid black; padding: 2px;">20</div> <div>NUMERO DE MUESTRA POR CUADRO DE CARGA</div> </div> <div style="display: flex; justify-content: space-between;"> <div style="border: 1px solid black; padding: 2px;">6</div> <div>NUMERO DE CUADROS DE CARGA</div> </div> <div style="margin-top: 10px;"> <p>0</p> <p>0</p> <p>14 FILA DE CUADRO DE CARGA SELECCIONADO</p> </div>																	
CUADRO DE CARGA 1	0,99	0	0,99	-120	0,99	120	0,98	-4	0,98	-124	0,98	116	0%	0	0%	0	0%	
APROXIMADAMENTE IDEAL	1,01	1	1,01	-119	1,01	121	1,01	0	1,01	-120	1,01	120	0%	0	1%	0	0%	
CUADRO DE CARGA 2	0,99	0	0,99	-120	0,99	120	0,98	-40	0,98	-160	0,98	80	0%	0	0%	0	0%	
ALTOS REACTIVOS QI+ ELEVADO	1,01	1	1,01	-119	1,01	121	1,01	-30	1,01	-150	1,01	90	0%	0	1%	0	0%	
CUADRO DE CARGA 3	0,99	0	0,99	-120	0,99	120	1,4	-25	1,2	-105	0,3	116	0%	0	0%	0	0%	
DESBALANCE CORRIENTE I0/+ ELEVADO	1,01	1	1,01	-119	1,01	121	1,45	-20	1,3	-100	0,25	120	0%	0	1%	0	0%	
CUADRO DE CARGA 4	0,99	0	0,99	-120	0,99	120	0,98	-4	0,98	-124	0,98	116	0%	0	1%	0	0%	
ARMONICOS DE CORRIENTE IHSEC+	1,01	1	1,01	-119	1,01	121	1,01	0	1,01	-120	1,01	120	0%	0	2%	0	0%	
CUADRO DE CARGA 5	0,99	0	0,99	-120	0,99	120	0,98	-4	0,98	-124	0,98	116	0%	0	1%	0	0%	
ARMONICOS DE CORRIENTE IHSEC-	1,01	1	1,01	-119	1,01	121	1,01	0	1,01	-120	1,01	120	0%	0	2%	0	0%	
CUADRO DE CARGA 6	0,99	0	0,99	-120	0,99	120	0,98	-4	0,98	-124	0,98	116	0%	0	3%	0	0%	
ARMONICOS DE CORRIENTE IHSECO	1,01	1	1,01	-119	1,01	121	1,01	0	1,01	-120	1,01	120	0%	0	4%	0	0%	

Fuente: Autores

2.3.2 Cálculos de los parámetros del sistema eléctrico de acuerdo con la norma IEEE 1459

Una vez el programa realiza la lectura de los cuadros de carga y con base a lo establecido en la norma IEEE 1459 evalúa los parámetros correspondientes a las potencias del sistema; adicionalmente evalúa: las distorsiones armónicas de tensión y corriente, los desequilibrios en tensión y desbalances en corriente del sistema trifásico, las tensiones de línea y la corriente del neutro (ver Figura 4). Estos parámetros se evalúan al ritmo que impone el temporizador que genera el ingreso de datos y da origen a los cuadros de carga.

En las tablas 3 y 9 se expresan las ecuaciones empleadas para los cálculos de los parámetros.

Tabla 9. Parámetros eléctricos de las señales de tensión y corriente evaluados por el programa

PÁRAMETROS DE TENSIÓN Y CORRIENTE	
DISTORSIONES	
Distorsión de tensión THD_v	$THD_v = \frac{\sqrt{\sum_{k=1}^n V_{RMSk}^2}}{V_{RMS1}}$
Distorsión de corriente THD_i	$THD_i = \frac{\sqrt{\sum_{k=1}^n I_{RMSk}^2}}{I_{RMS1}}$
DESBALANCE	
TENSION	
Desbalance de tensión U_v	$U_v = \left \frac{\overrightarrow{V_{AB}} - \vec{a} * \overrightarrow{V_{BC}}}{\overrightarrow{V_{AB}} - \vec{a}^2 * \overrightarrow{V_{BC}}} \right $
Relación de tensión inversa y tensión directa V₁₋/V₁₊	$\frac{V_{1-}}{V_{1+}} = \frac{(\overrightarrow{V_{AN}} + \vec{a} * \overrightarrow{V_{BN}} + \vec{a}^2 * \overrightarrow{V_{CN}})}{(\overrightarrow{V_{AN}} + \vec{a}^2 * \overrightarrow{V_{BN}} + \vec{a} * \overrightarrow{V_{CN}})}$
Relación de tensión homopolar y tensión directa V₁₀/V₁₊	$\frac{V_{10}}{V_{1+}} = \frac{(\overrightarrow{V_{AN}} + \overrightarrow{V_{BN}} + \overrightarrow{V_{CN}})}{(\overrightarrow{V_{AN}} + \vec{a}^2 * \overrightarrow{V_{BN}} + \vec{a} * \overrightarrow{V_{CN}})}$
CORRIENTE	
Relación de corriente inversa y corriente directa I₁₋/I₁₊	$\frac{I_{1-}}{I_{1+}} = \frac{(\overrightarrow{I_A} + \vec{a} * \overrightarrow{I_B} + \vec{a}^2 * \overrightarrow{I_C})}{(\overrightarrow{I_A} + \vec{a}^2 * \overrightarrow{I_B} + \vec{a} * \overrightarrow{I_C})}$
Relación de corriente homopolar y corriente directa I₁₀/I₁₊	$\frac{I_{10}}{I_{1+}} = \frac{(\overrightarrow{I_A} + \overrightarrow{I_B} + \overrightarrow{I_C})}{(\overrightarrow{I_A} + \vec{a}^2 * \overrightarrow{I_B} + \vec{a} * \overrightarrow{I_C})}$

PÁRAMETROS DE TENSIÓN Y CORRIENTE	
Valor eficaz de las corrientes armónicas de secuencia positiva $I_{H_{sec+}}$	$I_{H_{sec+}} = \sqrt{\sum_{k=1}^8 I_{3k+1}^2}$
Valor eficaz de las corrientes armónicas de secuencia negativa $I_{H_{sec-}}$	$I_{H_{sec-}} = \sqrt{\sum_{k=1}^8 I_{3k-1}^2}$
Valor eficaz de las corrientes armónicas de secuencia cero $I_{H_{sec0}}$	$I_{H_{sec0}} = \sqrt{\sum_{k=1}^8 I_{3k}^2}$
TENSIONES DE LINEA	
Tensión de línea AB (V_{AB})	$V_{AB} = \vec{V}_{AN} - \vec{V}_{BN}$
Tensión de línea BC (V_{BC})	$V_{BC} = \vec{V}_{BN} - \vec{V}_{CN}$
Tensión de línea CA (V_{CA})	$V_{CA} = \vec{V}_{CN} - \vec{V}_{AN}$
CORRIENTES DE NEUTRO	
Corriente de neutro I_N	$I_N = (\vec{I}_A + \vec{I}_B + \vec{I}_C)$
Corriente de neutro fundamental I_{N1}	$I_{N1} = (\vec{I}_{A1} + \vec{I}_{B1} + \vec{I}_{C1})$
Corriente de neutro no fundamental I_{NH}	$I_{NH} = \sqrt{\sum_{k=2}^{25} (\vec{I}_{Ak} + \vec{I}_{Bk} + \vec{I}_{Ck}) ^2}$

Fuente: Autores

Figura 5. Registro cronológico de parámetros eléctricos

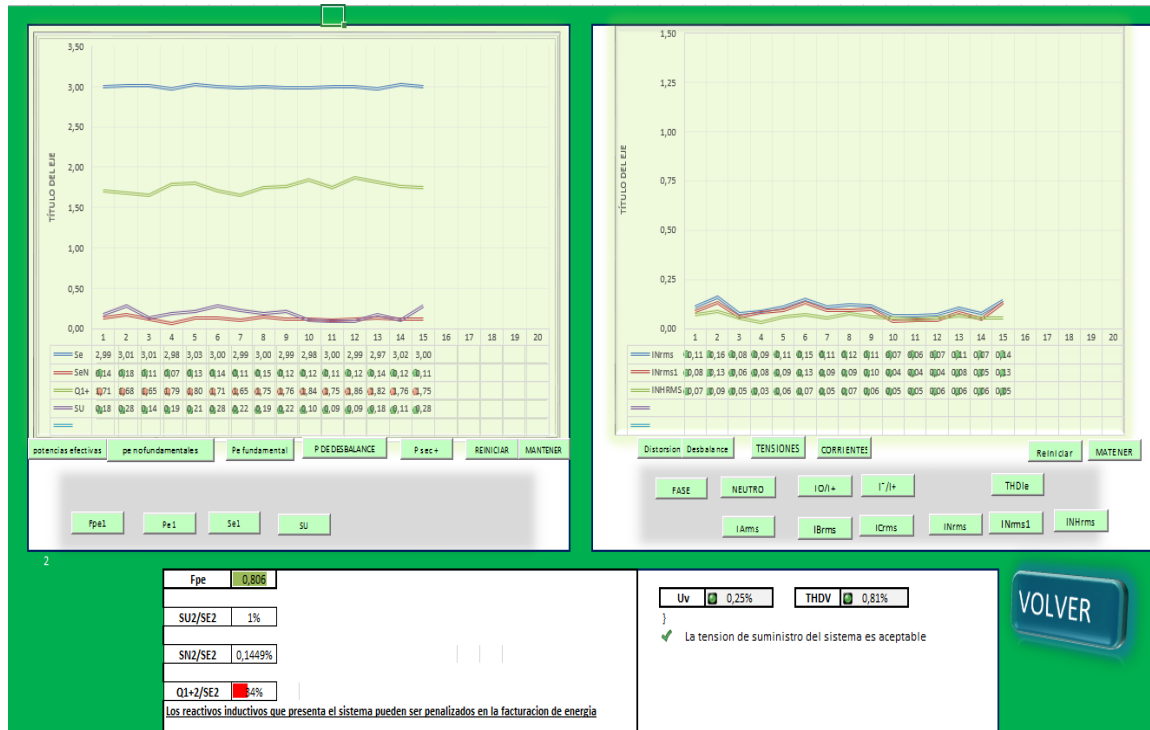
valor Tiempo	CELDA	Tiempo	VRMS1A	θ.VRMS1A	VRM1SB	θ.VRM1SB	VRMS1C	θ.VRMS1C	VRMS1AB	θ.VRMS1AB	VRMS1BC	θ.VRMS1BC	VRMS1AC
416557147916667	1	16/01/2014 17:09:18	0,99166858	,77 °	0,99897107	-119,83 °	1,002242868	120,43 °	1,72914037	30,59 °	1,73077664	-89,65 °	1,7238675
416557148263889	2	16/01/2014 17:09:21	1,00117484	,67 °	0,99448854	-119,39 °	1 °	120,6 °	1,72886033	30,53 °	1,72980351	-89,26 °	1,7349046
416557148611111	3	16/01/2014 17:09:24	1,00905958	,44 °	0,99971216	-119,48 °	1 °	120,53 °	1,73897203	30,33 °	1,73794657	-89,35 °	1,7467960
416557148958333	4	16/01/2014 17:09:27	0,9996386	,06 °	1,00037847	-120, °	1 °	120,32 °	1,73259808	30,04 °	1,7349771	-89,74 °	1,7394310
416557149305556	5	16/01/2014 17:09:30	1,0038418	,46 °	0,99522172	-119,07 °	1 °	120,08 °	1,72719289	30,55 °	1,74011147	-89,33 °	1,7368315
416557149652778	6	16/01/2014 17:09:33	1,00168985	,96 °	0,99221533	-119,32 °	1 °	120,3 °	1,72913834	30,66 °	1,73407203	-89,28 °	1,7331635
416557150000000	7	16/01/2014 17:09:36	1,00895495	,16 °	1,00492752	-119,15 °	1 °	120,36 °	1,73804138	30,44 °	1,73591156	-89,56 °	1,7369697
416557150347222	8	16/01/2014 17:09:39	1,0061999	,84 °	0,99101776	-119,47 °	1 °	120,51 °	1,73241366	30,44 °	1,71976229	-89,42 °	1,7298063
416557150694444	9	16/01/2014 17:09:42	0,99461674	,46 °	1,00388397	-119,78 °	1 °	120,41 °	1,73287683	30,5 °	1,73195653	-89,78 °	1,7251686
416557151041667	10	16/01/2014 17:09:45	0,99572404	,63 °	0,99422367	-119,38 °	1 °	120,76 °	1,72343381	30,6 °	1,71829255	-89,36 °	1,7219462
416557151388889	11	16/01/2014 17:09:48	1,00744882	1, °	1,00321762	-119,39 °	1 °	120,33 °	1,74468876	30,73 °	1,73884755	-89,56 °	1,7341431

Fuente: Autores

2.3.4 Registro en tiempo real de estado estacionario.

A medida que se va construyendo la base de datos descrita previamente, se va creando una tabla de información que se actualiza cada 3 segundos hasta completarse con los últimos 20 registros generados por los cuadros de carga y, se reinicia cada minuto para continuar con los siguientes 20 registros. Esta dinámica de la carga se puede observar en una interfaz gráfica, que presenta el comportamiento de los parámetros registrados y el valor de los indicadores de las variables seleccionadas tal como se muestra en la Figura 6.

Figura 6. Interfaz gráfica del registro en tiempo actual en estado estacionario



Fuente: Autores

2.3.5 Registro histórico.

Esta sección del programa permite acceder de forma gráfica a cualquier periodo de tiempo de la base de datos de manera cronológica, presentando el comportamiento de las variables eléctricas seleccionadas en el rango de tiempo de observación, bien sea este de 10 minutos, 2 horas, 1 día. También se muestran los valores promedio eficaces, máximo y mínimo de cada parámetro evaluado y que posteriormente es tenido en cuenta para la gestión de la información (ver Figura 7).

3. METODOLOGÍA DE CARACTERIZACIÓN DINÁMICA E HISTÓRICA DE LOS PARÁMETROS DE LA CARGA ELÉCTRICA DE UNA EDIFICACIÓN A PARTIR DE CUADROS DE CARGA SINTÉTICOS.

La metodología establecida para la caracterización dinámica e histórica de los parámetros de carga, está basada en las normas EN 50160, IEC 61000-4-30, IEEE 1459 y NTC 5001 respectivamente.

Para la simulación del sistema fue necesario seleccionar una plataforma de simulación que facilitara el diseño de funciones definidas por el usuario y permitiera desarrollar los algoritmos de control y medidas a implementar. Por lo cual, el software Excel utiliza un lenguaje de programación basado en Visual Basic, considerándose este la mejor opción dado la universalidad de utilización o licencia, facilidad en su interfaz, el potencial manejo y organización de la información y su gran fluidez gráfica.

Una vez interpretadas las normas, seleccionados los datos y organizada la información generando los cuadros de carga y realizando los cálculos respectivos, se procede a la caracterización dinámica de la carga, y se seleccionan intervalos de tiempo de 10 minutos, 2 horas y un día. En donde el diagnóstico completo de carga mediante mediciones directas tiene una capacidad de duración en tiempo de una semana tomando muestras de tres segundos de las variables eléctricas calculadas.

En este capítulo se describen los registros de información que se han diseñado e implementado para la realización de una caracterización dinámica del comportamiento de la carga eléctrica.

3.1 REGISTRÓ EN TIEMPO REAL DE ESTADO ESTACIONARIO.

Este registro permite observar las perturbaciones eléctricas de estado estacionario, en el sistema en tiempo actual, lo que a nivel industrial representa una oportunidad para optimizar las pérdidas de energía en el sistema y por ende disminuir los costos de facturación, como se expuso en el ejemplo del Capítulo 1.

3.1.1 Límites para los indicadores de los parámetros eléctricos.

Los indicadores de calidad de energía en la metodología de caracterización se desarrollaron de 2 formas:

Para las variables U_v , THD_i , THD_v y hasta el 25 armónico de todas las componentes de tensión y corriente, se aplicaron los límites de indicadores según la norma NTC 5001, estos límites se observan en las tablas 4,5 y 6 del numeral 2.1.2.

Para las demás variables se manejaron límites propuestos que se dejan a criterio del usuario modificarlos según sea la naturaleza de la carga para su estudio. Estos límites están basados en condiciones de lógica inversa, lógica directa y lógica entre rangos. La lógica inversa indica que entre mayor sea la magnitud de la variable, menor será la eficiencia del sistema, tal como lo muestra las tablas 10 y 11. La lógica directa, indica una proporcionalidad directa entre la magnitud de la variable y la eficiencia del sistema, ver Tabla 12, mientras que la lógica entre rangos, establece un rango óptimo de la variable, tal como lo presentan la Tabla 13.

En la lógica inversa se encuentran las relaciones I_1/I_{1+} e I_{10}/I_{1+} , las cuales relacionan las corrientes de desbalances I_1 o I_{10} respecto a la corriente útil del sistema de la componente fundamental I_{1+} . Se plantea inicialmente un indicador límite, el cual por debajo del 20 %, es aceptable y es simbolizado por un icono verde dentro del programa de la metodología de caracterización; si la relación está entre el 20 % y el 50 %, se considera una condición medianamente perjudicial para el sistema eléctrico señalado por un icono amarillo; y por encima del 50 % se advierte como una condición desfavorable marcado con un ícono rojo. Estas dos relaciones afectan directamente el incremento de la potencia de desbalance de la componente fundamental S_{U1} y dependiendo de qué tan elevada sea la carga eléctrica se aumentan las pérdidas de potencia también.

De la misma manera se aplica los límites de indicadores para las relaciones v_1/v_{1+} y v_{10}/v_{1+} , para evaluar la relaciones de tensión con sus respectivos límites descritos en la Tabla 10, observando las componentes de secuencia en tensión que pueden afectar la vida útil de equipos eléctricos en la red. Los límites de las corrientes de neutro fundamental I_{N1} , armónica I_{NH} y total I_N , se ajustaron en relación con la componente total eficaz I_e , caracterizando así la magnitud de corriente que proporcione mayor impacto en el conductor neutro, identificando si es a partir de la componente fundamental, no fundamental o ambas en el sistema eléctrico. También se plantean intervalos para los parámetros I_{Hsec+} , I_{Hsec-} e I_{Hsec0} en función de I_e , ver Tabla 10, con los cuales se cuantifica el impacto de las corrientes armónicas eficaces de secuencia con respecto a la corriente eficaz del sistema, identificando así el tipo de secuencia en corrientes armónicas que caracteriza la carga eléctrica.

Respecto a los límites de las otras potencias no activas (por distorsión, por desbalances y por reactivos de potencia), se establecieron en porcentaje de la potencia aparente de dimensionamiento S_e o la potencia útil del sistema P_{1+} según se seleccione el tipo de relación para caracterizar la carga eléctrica, aquí se

indica que tan desfavorable son las diferentes componentes de potencia no activas en función de la potencia útil P_{1+} o la potencia de dimensionamiento S_e en el sistema eléctrico.

En la lógica directa se establecen como límites los porcentajes en función de las variables descritas en la Tabla 11, que relacionan P_1 y P_{1+} en función de la potencia activa total del sistema P , S_{e1} y S_{e1+} en función de la potencia aparente total de dimensionamiento S_e para evaluar que componentes de potencia (fundamentales y fundamentales de secuencia positiva) son útiles en relación a las componentes totales de potencia. Los valores óptimos propuestos de los factores de potencia F_{pe} , F_{pe1} y F_{pe1+} están por encima de 0,9, de lo contrario se puede observar el tipo de ineficiencia que presenta el sistema eléctrico ya sea por presencia de armónicos, desbalances de potencia, reactivos fundamentales de secuencia positiva o combinaciones de los anteriores en el punto de medida.

En la lógica entre rangos, para los valores eficaces de las tensiones de fase plantea inicialmente un rango entre el 0,9 y 1,05 en p.u. de acuerdo con la recomendación de la norma NTC 5001, para prevenir el deterioro de artefactos eléctricos que se pueden ver afectados en su vida útil ante variaciones del valor eficaz de la tensión en el sistema eléctrico. Estos límites pueden ser ajustados por el usuario. En cuanto a los valores eficaces de las corrientes, se podría evaluar si se tienen conductores sobredimensionados o sobrecargados en el sistema eléctrico, es decir, observar si los conductores eléctricos se están usando de manera óptima en relación a la carga instalada, proponiendo inicialmente que el consumo de corriente eléctrica por cada fase este entre el 0,7 y 1,2 en p.u.

Tabla 10. Límites de lógica inversa para ineficiencias tensiones y corrientes.




LIMITES DE INDICADORES DE LOGICA INVERSA PARA LAS RELACIONES DE TENSIONES Y CORRIENTES			
Símbolo del indicador			
Relación de tensión inversa y tensión directa V_1/V_{1+}	$X < 1\%$	$1\% < X < 2\%$	$X > 2\%$
Relación de tensión homopolar y tensión directa V_{10}/V_{1+}	$X < 1\%$	$1\% < X < 2\%$	$X > 2\%$
Relación de corriente inversa y corriente directa I_1/I_{1+}	$X < 20\%$	$20\% < X < 50\%$	$X > 50\%$
Relación de corriente homopolar y corriente directa I_{10}/I_{1+}	$X < 20\%$	$20\% < X < 50\%$	$X > 50\%$
Valor eficaz de las corrientes armónicas de secuencia positiva $I_{H_{sec+}} (\%I_e)$	$X < 15\%$	$15\% < X < 20\%$	$X > 50\%$
Valor eficaz de las corrientes armónicas de secuencia negativa $I_{H_{sec-}} (\%I_e)$	$X < 15\%$	$15\% < X < 20\%$	$X > 20\%$
Valor eficaz de las corrientes armónicas de secuencia cero $I_{H_{sec0}} (\%I_e)$	$X < 15\%$	$15\% < X < 20\%$	$X > 20\%$
Corriente de neutro total $I_N (\%I_e)$	$X < 20\%$	$20\% < X < 60\%$	$X > 60\%$
Corriente de neutro fundamental $I_{N1} (\%I_e)$	$X < 20\%$	$20\% < X < 50\%$	$X > 50\%$
Corriente de neutro no fundamental $I_{NH} (\%I_e)$	$X < 20\%$	$20\% < X < 50\%$	$X > 50\%$

Tabla11. Límites de lógica inversa para las relaciones de potencias




LIMITES DE INDICADORES DE LOGICA INVERSA PARA LAS RELACIONES DE POTENCIA			
Símbolo del indicador			
Potencia Aparente no fundamental efectiva S_{eN} (% P_{1+} o S_e)	$X < 25\%$	$25\% < X < 40\%$	$X > 40\%$
Distorsión de potencia por tensión D_{eV} (% P_{1+} o S_e)	$X < 2\%$	$2\% < X < 5\%$	$X > 5\%$
Distorsión de potencia por corriente D_{eI} (% P_{1+} o S_e)	$X < 10\%$	$10\% < X < 20\%$	$X > 20\%$
Potencia de distorsión armónica D_{eH} (% P_{1+} o S_e)	$X < 5\%$	$5\% < X < 15\%$	$X > 15\%$
Potencia activa armónica P_H (% P)	$X < 2\%$	$2\% < X < 3\%$	$X > 3\%$
Potencia aparente efectiva armónica S_{eH} (% P_{1+} o S_e)	$X < 10\%$	$10\% < X < 20\%$	$X > 20\%$
Potencia reactiva fundamental de secuencia positiva Q_{1+} (% P_{1+} o S_e)	$X < 25\%$	$25\% < X < 40\%$	$X > 40\%$
Potencia de desbalance S_U (% P_{1+} o S_e)	$X < 25\%$	$25\% < X < 40\%$	$X > 40\%$

Tabla12. Límites de lógica directa para las potencias y factores de potencia.







LIMITES DE INDICADORES DE LOGICA DIRECTA PARA LAS POTENCIAS Y FACTORES DE POTENCIA			
Símbolo del indicador			
Potencia Aparente fundamental efectiva $S_{e1} (\%S_e)$	$X < 70\%$	$70\% < X < 90\%$	$X > 90\%$
Potencia activa fundamental $P_1 (\%P_1)$	$X < 70\%$	$70\% < X < 90\%$	$X > 90\%$
Potencia aparente fundamental de secuencia directa $S_{1+} (\%S_e)$	$X < 70\%$	$70\% < X < 90\%$	$X > 90\%$
Potencia activa fundamental de secuencia directa $P_{1+} (\%P_1)$	$X < 70\%$	$70\% < X < 90\%$	$X > 90\%$
Factor de Potencia efectivo (FP_e)	$X < 0,85$	$0,85 < X < 0,95$	$X > 0,9$
Factor de Potencia Fundamental (FP_1)	$X < 0,85$	$0,85 < X < 0,95$	$X > 0,9$
Factor de Potencia Fundamental de secuencia directa (FP_{e1+})	$X < 0,85$	$0,85 < X < 0,95$	$X > 0,9$

Tabla13. Límites de lógica entre rangos para perturbaciones de tensiones y corrientes.

LIMITES DE INDICADORES DE LOGICA ENTRE RANGOS PARA PERTURBACIONES DE LOS PARAMETROS ELECTRICOS			
Símbolo del indicador			
Tensión eficaz de fase A (V_A)	$X < 0,9$	$0,9 < X < 1,05$	$X > 1,05$

LIMITES DE INDICADORES DE LOGICA ENTRE RANGOS PARA PERTURBACIONES DE LOS PARAMETROS ELECTRICOS			
Tensión eficaz de fase B (V_B)	$X < 0,9$	$0,9 < X < 1,05$	$X > 1,05$
Tensión eficaz de fase C (V_C)	$X < 0,9$	$0,9 < X < 1,05$	$X > 1,05$
Tensión eficaz de línea AB (V_{AB})	$X < 1,56$	$1,56 < X < 1,82$	$X > 1,82$
Tensión eficaz de línea BC (V_{BC})	$X < 1,56$	$1,56 < X < 1,82$	$X > 1,82$
Tensión eficaz de línea CA (V_{CA})	$X < 1,56$	$1,56 < X < 1,82$	$X > 1,82$
Corrientes eficaz de línea A (I_A)	$X < 0,7$	$0,7 < X < 1,2$	$X > 1,2$
Corrientes eficaz de línea B (I_B)	$X < 0,7$	$0,7 < X < 1,2$	$X > 1,2$
Corrientes eficaz de línea C (I_C)	$X < 0,7$	$0,7 < X < 1,2$	$X > 1,2$

Figura 8. Forma visual de los límites de los indicadores dentro del programa de caracterización

INDICADORES PLANTEADOS POR LA NORMA NTC-5001 DE TENSION Y CORRIENTES
Para tensiones < 69 kV y 50>ISC/IL>20 kA

INDICADORES DE TENSION	
DESBALANCE DE TENSION (UV)	2%
DISTORSION INDIVIDUAL DE TENSION	3%
DISTORSION TOTAL DE TENSION	5%

INDICADORES DE CORRIENTES					
ARMONICOS (DI)	2	3	4	5	6
LIMITE (DI)	1,75%	7,00%	1,75%	7,00%	1,75%
ARMONICOS	7	8	9	10	11
LIMITE (DI)	7,00%	1,75%	7,00%	1,75%	3,50%
ARMONICOS	12	13	14	15	16
LIMITE (DI)	0,88%	3,50%	0,88%	3,50%	0,88%
ARMONICOS	17	18	19	20	21
LIMITE (DI)	2,50%	0,63%	2,50%	0,63%	1,00%
ARMONICOS	22	23	24	25	
LIMITE (DI)	0,25%	1,00%	0,25%	1,00%	

DISTORSION TOTAL DE CORRIENTE TDHI	5%
------------------------------------	----

INDICADORES DE POTENCIA Y DEMAS VARIABLES PROPUESTOS

	X1<LIMITE <X2	LIMITE>X2
V ⁻ /V+	1%	2%
V ₀ /V+	1%	2%
I ⁻ /I+	20%	50%
to/I+	20%	50%
IN (%Ie)	20%	60%
INI (%Ie)	20%	50%
INH (%Ie)	20%	50%
SHV (%P1+)	2%	5%
SHI (%P1+)	10%	20%
SH (%P1+)	10%	20%
PH (%P)	2%	3%
DEH (%P1+)	5%	15%
SeN (%P1+)	25%	40%
N (%P1+)	40%	60%
Q1+ (%P1+)	25%	40%
SU (%P1+)	25%	40%
IHsec+ (%Ie)	15%	20%
IHsec- (%Ie)	15%	20%
IHsec0 (%Ie)	15%	20%

Indicadores logica Inversa

	X1<LIMITE <X2	LIMITE>X2
Fpe	0,85	0,90
Se1 (%Se)	70%	90%
P1 (%P)	70%	90%
FPe1	0,85	0,90
S1+ (%Se)	70%	90%
P1+ (%P)	70%	90%
FPe1+	0,85	0,90

Indicadores logica directa

	LIMITE <X1 O LIMITE >X2	
Va	0,95	1,05
Vb	0,95	1,05
Vc	0,95	1,05
Vab	1,65	1,82
Vbc	1,65	1,82
Vca	1,65	1,82
Ia	0,70	1,30
Ib	0,70	1,30
Ic	0,70	1,30

Indicadores logica entre rangos

Seleccione el tipo de relacion para caracterizar la carga electrica
SU/P1+, SeN/P1+, Q1+/P1+

3.1.2 Representación gráfica en tiempo actual de los parámetros eléctricos en estado estacionario.

En la interfaz gráfica del registro dinámico se hace uso de un conjunto de controles llamado Active X, de manera que permite una interacción más fluida, sencilla y amigable mediante botones de comando (combobox), los cuales representan cada uno de los parámetros eléctricos utilizados y que se desean conocer su valor o graficar. Igualmente, esta interfaz admite graficar hasta cinco parámetros a la vez, facilitando al usuario la posibilidad de comparar los comportamientos en simultáneo presentando sus magnitudes e indicadores.

Del mismo modo, esta interfaz consta de dos ventanas gráficas y una ventana de gestión, en donde la ventana grafica ubicada a la izquierda habilita al usuario para seleccionar los parámetros de potencia que desee visualizar, mientras que la de la derecha habilita los parámetros de: distorsión y desbalance tanto de tensión como de corriente, las tensiones eficaces de fase y línea, y las corrientes eficaces de neutro y de fase como se muestra en la Figura 6.

Mediante las curvas de comportamiento y los respectivos indicadores se puede establecer en tiempo actual, la presencia de ineficiencias según las condiciones medidas de un sistema. Por lo que posteriormente es posible generar un diagnóstico y plantear posibles estrategias para la optimización del mismo, lo que se conoce como gestión de la información.

3.2 REGISTRO HISTÓRICO

Este registro permite acceder gráficamente al comportamiento de los parámetros eléctricos obtenidos desde la base de datos en intervalos de tiempo de diez

minutos, dos horas y un día. Ubicándose en la fecha que el usuario desee caracterizar.

Así por ejemplo, si se ha almacenado el registro histórico de datos con fecha de iniciación a las 05:10:00 del día 14/01/2013 y se quiere observar el comportamiento dinámico de la carga con el intervalo de agregación de 2 horas, se obtendrá una caracterización con todos los datos desde las 05:10:00 del día 14/01/2013 hasta 07:10:00 del día 14/01/2013 contando con los siguientes aspectos adicionalmente:

1. Los indicadores presentados en las tablas 10, 11, 12 y 13 con selección de los parámetros que se desean diagnosticar.
2. Registra el promedio eficaz del rango de datos establecidos.
3. Genera la interpretación de los resultados obtenidos.

3.2.1. Establecimiento de los límites para los indicadores de los parámetros eléctricos.

Para establecer los límites de los parámetros eléctricos se considera la información registrada en las tablas 10, 11, 12 y 13. A su vez se sacan promedios eficaces de los datos que están en el rango de observación asignado por el usuario.

También se consideran los indicadores de valores normalizados de los conjuntos de datos seleccionados, donde se podrá observar que tan volátil son los datos evaluados contando con los valores máximos y mínimos de cada variable eléctrica.

3.2.2 Representación gráfica del registro histórico de los parámetros eléctricos mediante ventanas de observación.

En esta interfaz, se hace uso de botones de comando (combobox) para generar la interacción y habilitar la selección de parámetros a visualizar de la misma manera que se hace en registro de tiempo actual de estado estacionario.

Esta visualización consta de una ventana gráfica, una ventana de gestión y una ventana con magnitudes de promedios eficaces, máximos y mínimos de los parámetros eléctricos, también consta de unas listas desplegables que permiten ubicar al usuario en una fecha y hora específica para seleccionar el intervalo a graficar por medio de los botones combobox, y otra lista desplegable adicional para seleccionar el display de gráficos, el cual permite graficar las variables en valores en eficaces donde se puede graficar hasta 5 parámetros en simultáneo o valores en frecuencias que permite graficar todas las componentes armónicas de tensiones y corrientes individualmente para así analizar el comportamiento de la carga eléctrica como se muestra en la Figura 7 del Capítulo 2 o en ejemplo del Numeral 3.4.

3.3 GESTIÓN DE LA INFORMACIÓN DE LOS PARÁMETROS DEL SISTEMA

Continuando con la metodología establecida para la caracterización dinámica de los parámetros de carga, se propone administrar de manera concisa la información obtenida de los parámetros eléctricos calculados, ya sea en tiempo actual de estado estacionario o en un registro histórico mediante los intervalos de agregación sugeridos por la IEC 61000-4-30, donde los datos con intervalo de agregación de 10 minutos son promediados a partir de los de 3 segundos y los datos con intervalo de agregación de 2 horas son promediados a partir de los de 10 minutos. Al caracterizar de esta forma, un usuario analiza el comportamiento de su carga eléctrica a partir de la ventana de observación que considere más conveniente.

3.3.1 Gestión en tiempo actual de estado estacionario.

En este escenario de gestión de parámetros eléctricos, se evalúan varios ítems de calidad de la energía eléctrica, siendo los dos primeros de ellos el factor de potencia (Fp_e) y el desequilibrio de tensión (Uv). Según la norma NTC 5001 para niveles de tensión menores a 69 kV, la magnitud de Uv debe ser menor del 2% (ver Tabla 4 del Capítulo 2). Con relación al factor de potencia, la normatividad colombiana exige que este deber estar por debajo de 0,9.

Otros indicadores que permiten cuantificar ineficiencias en un sistema trifásico son los siguientes:

$$1. \frac{S_{U1}}{P_{1+}} \text{ o } \frac{S_{U1}}{S_e} \quad (4.1)$$

$$2. \frac{S_{eN}}{P_{1+}} \text{ o } \frac{S_{eN}}{S_e} \quad (4.2)$$

$$3. \frac{Q_{1+}}{P_{1+}} \text{ o } \frac{Q_{1+}}{S_e} \quad (4.3)$$

Estos indicadores permiten obtener una relación de las componentes de potencia no activas con respecto a la potencia útil del sistema P_{1+} o la potencia de dimensionamiento del sistema eléctrico S_e , pudiéndose establecer qué efecto afecta más la eficiencia en el transporte de energía eléctrica, si los reactivos fundamentales, las componentes armónicas o el desbalance que se presente en la componente fundamental del sistema trifásico, lo cual permitirá establecer que acciones se deben implementar para reducir la ineficiencia del sistema eléctrico. A partir de las variables de las ecuaciones **4,1**, **4,2** y **4,3** se propone gestionar también otras variables correlacionadas con éstas o las causas que pueden

generar las ineficiencias, donde según la Tabla 11, con un 25 % se considera desfavorable la magnitud de estas variables. Para justificar este límite se analiza la siguiente consideración visto desde la óptica de dimensionamiento térmico de los sistemas. Regularmente en tensión, la normatividad admite que el valor eficaz puede estar hasta un 5% por encima de su valor nominal mientras que en la corriente, las protecciones de sobre-corrientes se dimensionan para que actúen por encima del 20 % de su valor nominal, por tanto si se combinan ambos efectos de tensión y corriente para tener un equivalente en potencia, se obtiene $1,05 \times 1,2 = 1,26$, por tanto en potencia, esto implicaría un límite permisible entre el 20 y 30 %, por encima de este límite ya se requiere corregir estas distorsiones. Normalmente las distorsiones en la corriente son las de mayor impacto.

Otras variables a evaluar según el grado de impacto al FP_e de acuerdo a los tres criterios anteriores son:

1. I_1/i_{1+} e I_{10}/I_{1+} , siempre que los resultados del indicador $\frac{S_{U1}}{P_{1+}}$ o $\frac{S_{U1}}{S_e}$ superen el límite del 20%, ya que no tiene sentido analizar las ineficiencias de corrientes sino se tiene un impacto considerable en potencia, la gestión de estas variables se encuentran en la Figura 11.
2. $I_{H_{sec+}}$, $I_{H_{sec-}}$ e $I_{H_{sec0}}$, siempre que los resultados del indicador $\frac{S_{eN}}{P_{1+}}$ o $\frac{S_{eN}}{S_e}$ superen el 20%, ya que tiene importancia considerar las ineficiencias con consumo de potencia no útil elevada. La gestión de estas variables se muestra en la Figura 12.
3. $\frac{Q_{1+}}{P_{1+}}$ o $\frac{Q_{1+}}{S_e}$, si este supera el 20%, es adecuado analizar esta variable ya que la potencia reactiva puede ser penalizada con variaciones superiores a este rango. La gestión de estas relaciones se muestra en la Figura 13.

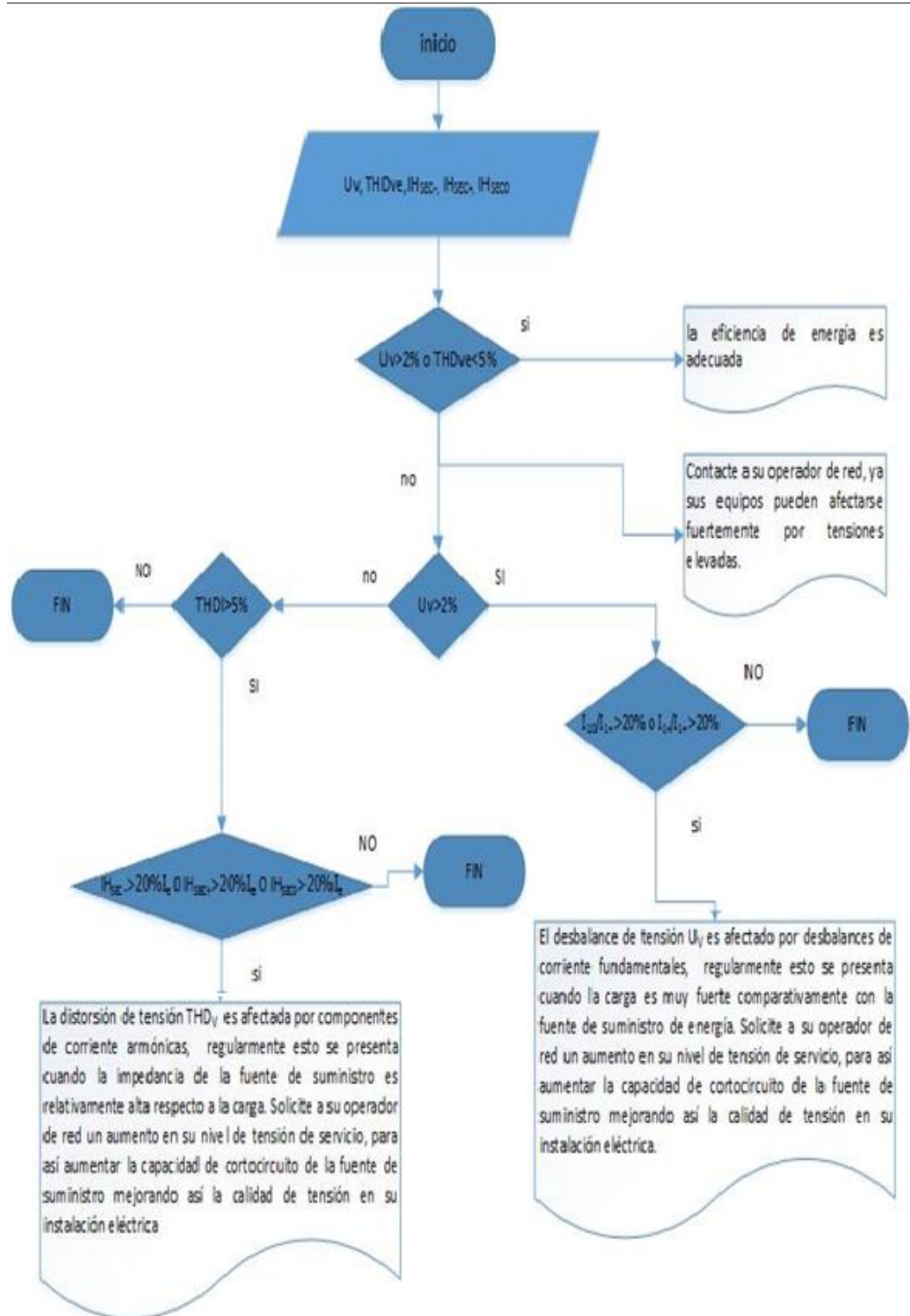
Regularmente se observan las relaciones S_{U1} , S_{eN} y Q_{1+} con respecto a la potencia de dimensionamiento del sistema S_e , siendo esta la más utilizada. Sin embargo desde el punto de vista térmico, se debería cuantificar las ineficiencias de

potencias con relación a P_{1+} , dado que esta potencia es la que finalmente se aprovecha para convertirla en trabajo útil. En consideración a esto, los diagramas de flujo para explicar la metodología de gestión con la relación de indicadores de las ecuaciones 4,1 4,2y 4,3, se realizaron con relación a P_{1+} .

El procedimiento para la gestión de información a partir de la ventana de observación de los parámetros eléctricos viene dado como se muestra a continuación:

- 1) **Evaluación de U_v :** Si este parámetro está por encima del 2%según la norma NTC 5001, el sistema presenta riesgos por desbalances que pueden afectar el aislamiento del sistema y en algunos casos la vida útil de elementos como ejes de motores o generadores eléctricos. Esta variable también se evalúa junto con las ineficiencias THD_v y THD_i . En el siguiente diagrama de flujo se representa el funcionamiento lógico de su gestión.

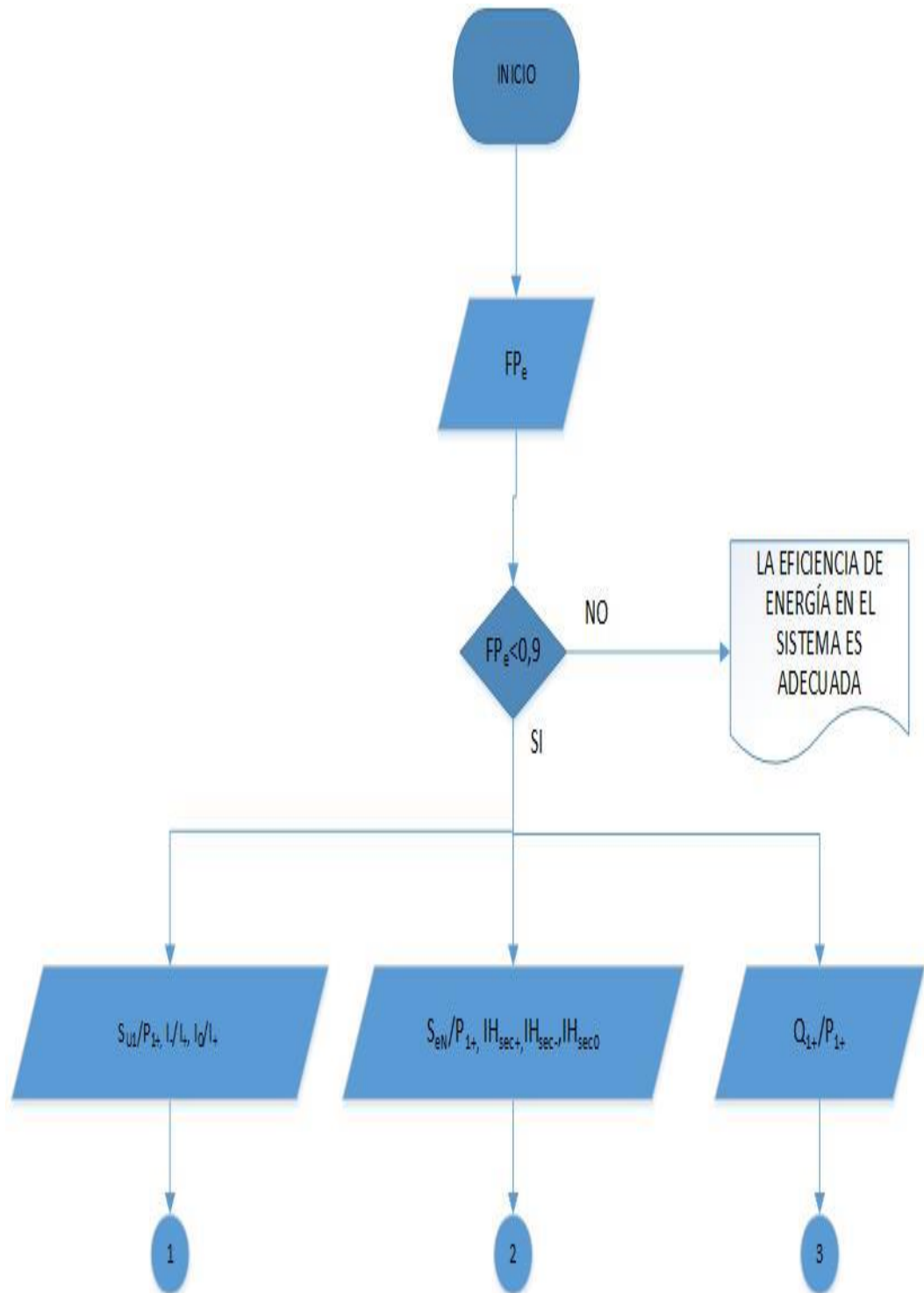
Figura 9. Evaluación de U_v



Como se puede observar, si ninguna de las ineficiencias U_v o THD_v supera el límite de indicadores propuestos en el numeral 3.1.1 se considera que la tensión de suministro es adecuada. Teniendo en cuenta la condición contraria a lo anterior, se evalúa si U_v supera el límite permitido de la Tabla 4, entonces se considera importante realizar un análisis de las corrientes del sistema trifásico para establecer si el desbalance es producido por las cargas conectadas al sistema, también se analiza el límite THD_v donde se verifica si supera el límite permitido de la Tabla 5, donde se evalúa si el parámetro de distorsión de corriente THD_i supera el límite de indicadores de la Tabla 6 (para $1\text{kV} < v_n < 69\text{kV}$), en cuyo caso, es recomendable revisar la capacidad de cortocircuito del fuente de suministro de la energía eléctrica, ya que la distorsión de tensión es influenciada fuertemente por la distorsión de la corriente de la carga conectada al sistema.

- 2) **Evaluación de FP_e :** Si el factor de potencia es menor de 0,9, se muestran los siguientes indicadores: $\frac{S_{U1}}{P_{1+}}, \frac{S_{en}}{P_{1+}}$ y $\frac{Q_{1+}}{P_1}$, para establecer el efecto(s) que más está impactando en la reducción de FP_e y por consiguiente en la eficiencia del sistema.

Figura 10. Evaluación de FP_e



3) Evaluación de los siguientes indicadores

$\frac{S_{u1}}{P_{1+}}$, $\frac{S_{en}}{P_{1+}}$ y $\frac{Q_{1+}}{P_1}$, si cualquiera de estos 3 indicadores presenta un porcentaje por encima del 25 % se muestran las causas de sus ineficiencias con sus variables de corrientes correlacionadas respectivamente.

Figura 11. Evaluación de S_{u1}/P_{1+}

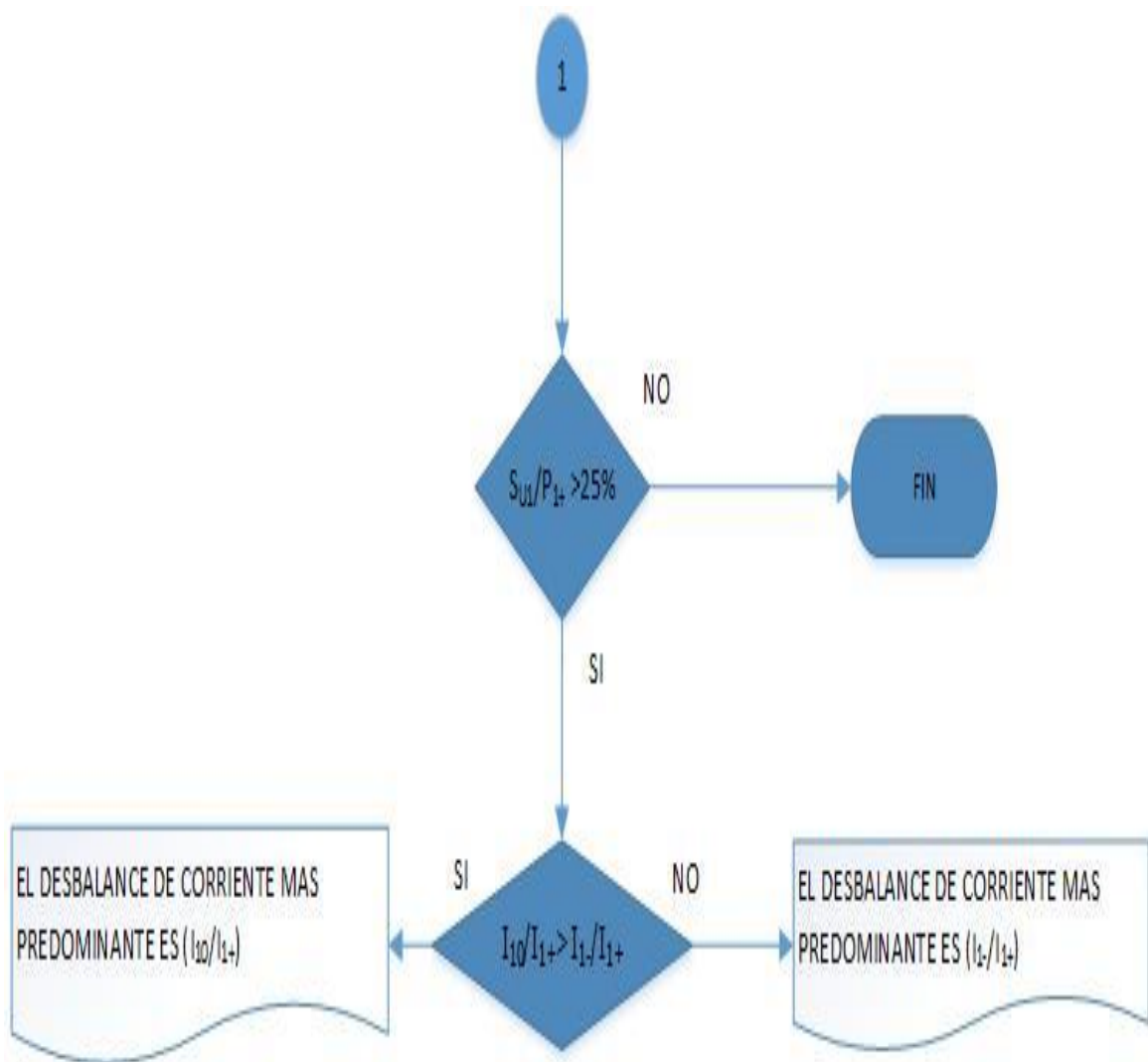


Figura 12. Evaluación de S_{eN}/P_{1+}

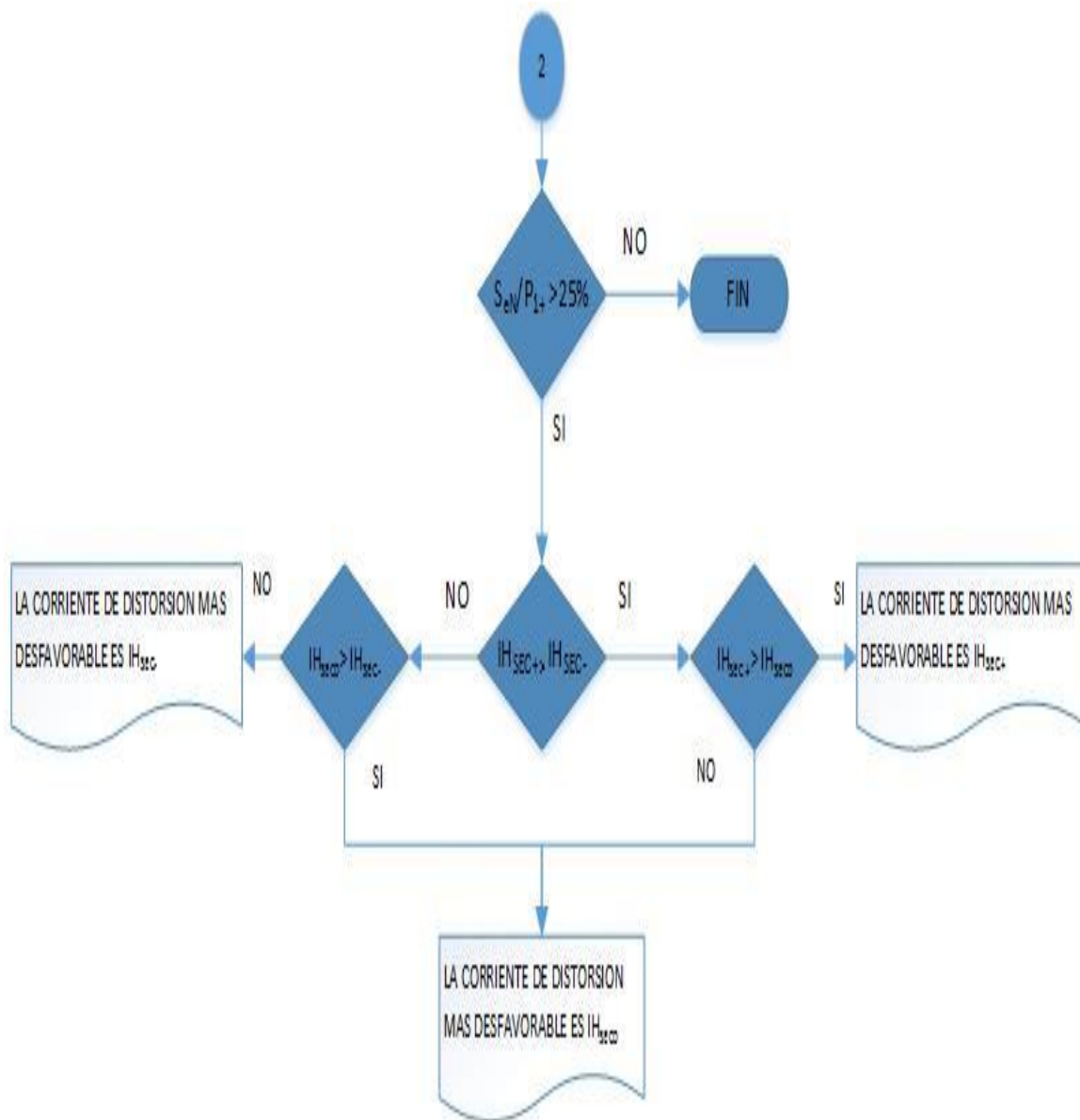
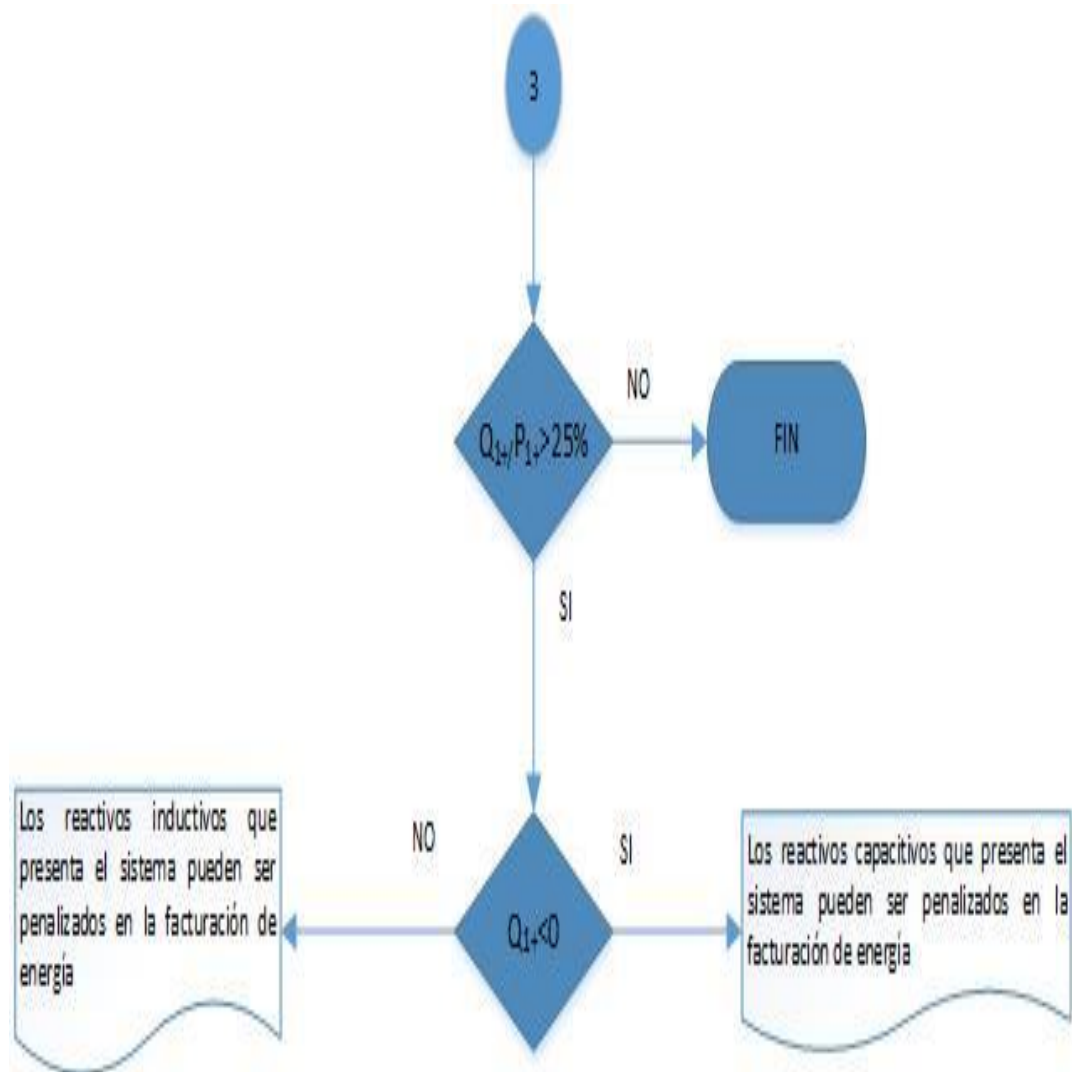


Figura 13. Evaluación de Q_{1+}/P_{1+}



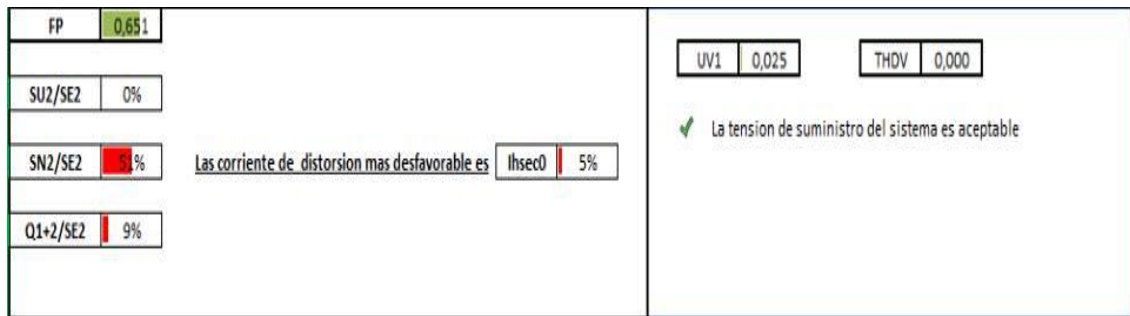
- 4) **Evaluación de la ineficiencia más alta:** se determina y se presenta cual de todas las ineficiencias individuales de corrientes y de reactiva es la más alta,

$$I_1/I_{1+}, I_{10}/I_{1+}, IH_{sec+}, IH_{sec-}, IH_{sec0} \text{ o } \frac{Q_{1+}}{P_{1+}}$$

Con este procedimiento para la gestión y con el análisis de los indicadores en este escenario, se llega a tener una información para que el usuario

pueda verificar y tomar decisiones respecto a su consumo de energía eléctrica.

Figura 14. Ventana de gestión de tiempo actual en estado estacionario



3.3.2 Gestión histórica

Al igual que en la anterior gestión dinámica (para cargas analizadas en tiempo real), se evalúan los mismos ítems establecidos en el procedimiento para la gestión de información de registro histórico a partir de la ventana de observación de los parámetros eléctricos de calidad de energía con los mismos indicadores descritos en el numeral 3.1.1. De esta forma se dispone de un conjunto de datos históricos promediados, que son utilizados para la ventana de observación, la cual es una información guía para diagnosticar el sistema y establecer posibles soluciones mediante sugerencias a partir de las relaciones de los parámetros: I_1/I_{1+} , I_{10}/I_{1+} , para desbalances, I_{Hsec+} , I_{Hsec+} e I_{Hsec0} para armónicos y $\frac{Q_{1+}}{P_{1+}}$ para reactivos fundamentales de secuencia cero según sea el nivel de impacto sobre el sistema. A continuación se evalúan los anteriores indicadores junto con el factor de potencia FP_e y U_v con la misma metodología que en el numeral 3.3.1, con la diferencia que ahora se dispone de una gestión programada para las ventanas de observación de 10 minutos, 2 horas y un día.

El FP_e y la U_v se evalúan con la misma lógica que el diagrama de flujo de la Figura 10, solo que no se depende de un dato. Los parámetros característicos en estas ventanas se obtienen a partir de un conjunto de datos históricos que a su vez han sido obtenidos a partir de la agregación de los datos.

Figura 15. Evaluación para las variables I_1/I_{1+} , I_{10}/I_{1+}

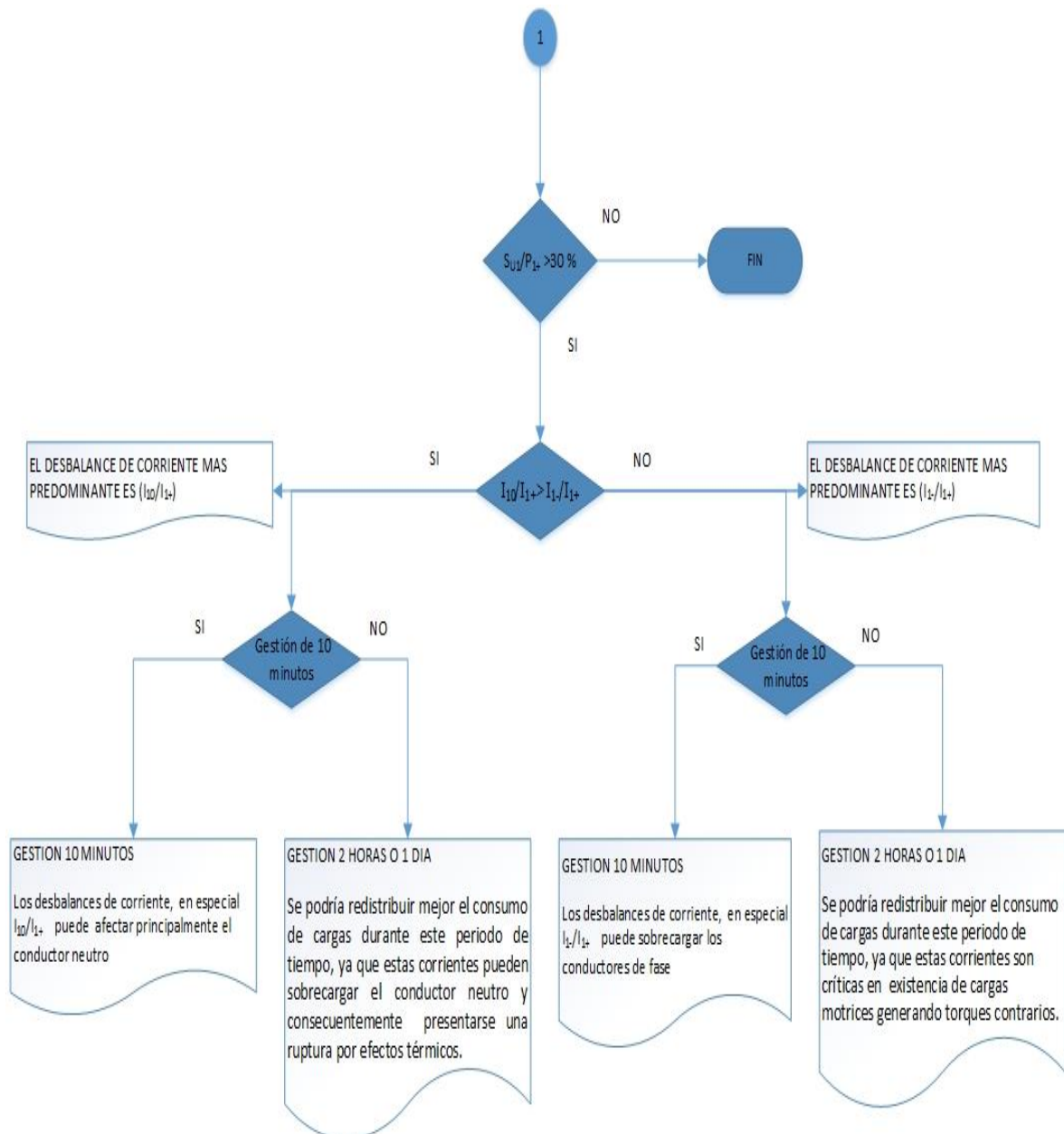


Figura 16. Evaluación de las variables I_{Hsec+} , I_{Hsec-} e I_{Hsec0}

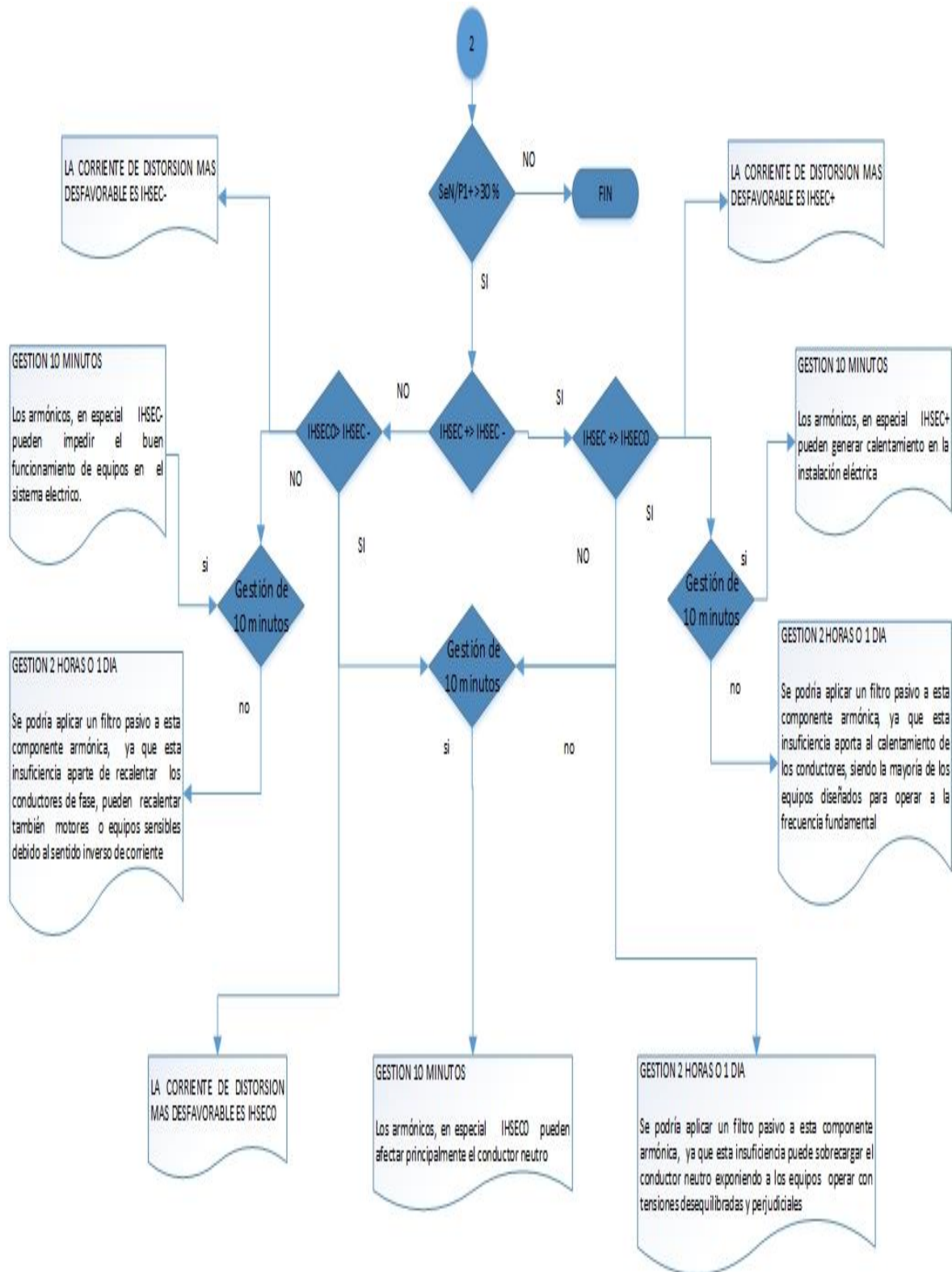
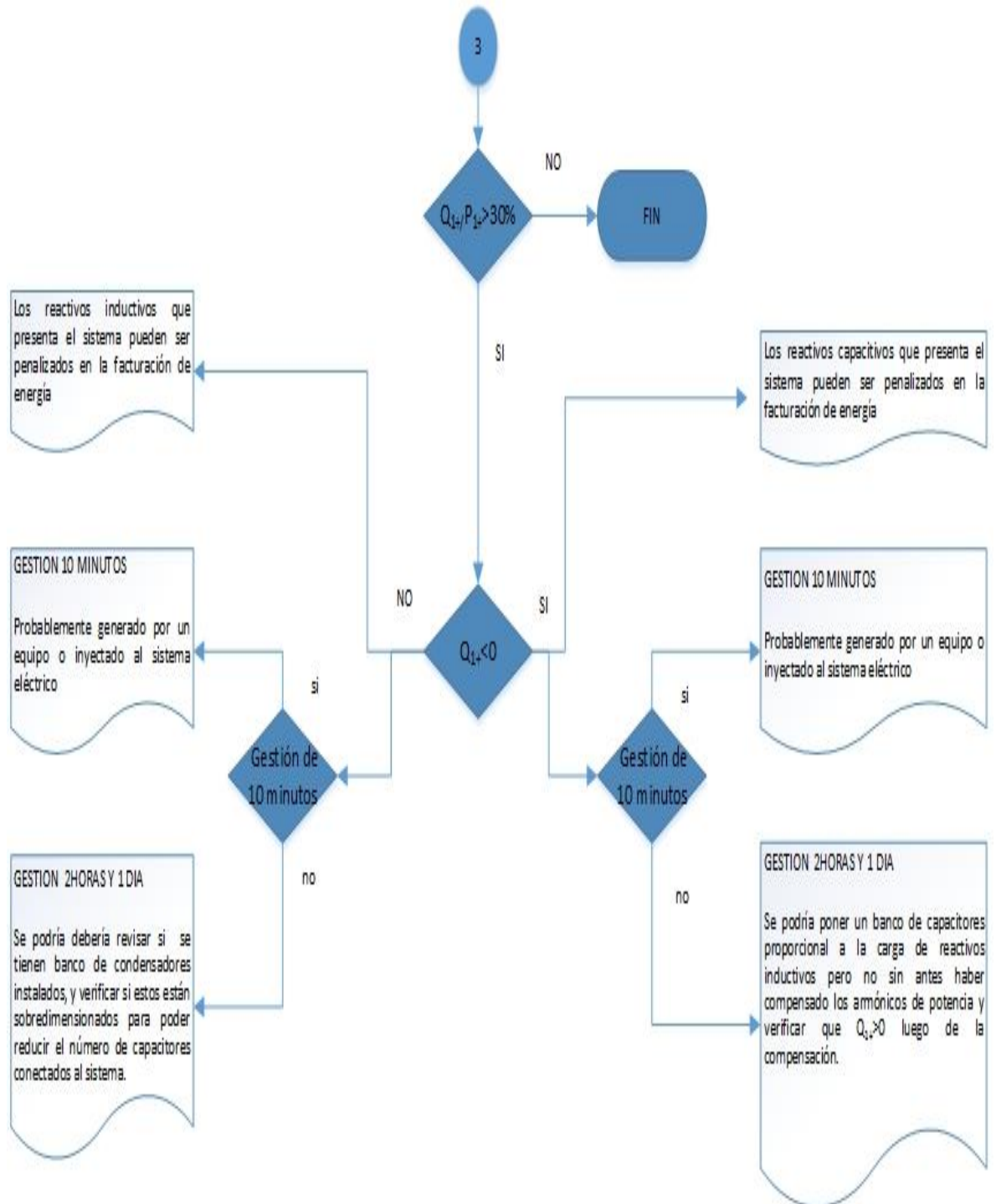



Figura 17. Evaluación de la potencia reactiva de secuencia positiva Q_{1+}



A partir de los valores máximos y mínimos de cada variable, se puede determinar qué tan disperso están los parámetros de carga en la ventana de observación seleccionada respecto a su valor eficaz, de esta manera se puede realizar un diagnóstico más detallado. Con esta información se determina si se requiere analizar la información disponible sobre la evolución de los parámetros eléctricos estableciendo las causas por la cual las variables eléctricas sobrepasan los límites establecidos, lo que le permitirá al usuario conocer mejor el comportamiento del sistema eléctrico y si es necesario tomar decisiones sobre cambios o implementaciones que puedan ser requeridas para mejorar la eficiencia del mismo.

Para caracterizar la carga eléctrica en este escenario, se deben observar los parámetros eléctricos que caracterizan la carga en las ventanas de observación, identificando el intervalo de ocurrencia de las mismas, para así analizar los rangos de tiempo de observación (10 min, 2 horas, 1 día), evaluando con más detalle los comportamientos de la carga eléctrica, obteniéndose una información más elaborada con un valor agregado adicional, lo que permitirá tomar mejores decisiones.

Figura 18. Ventana gestión histórica

FP	0,833		Uv1	0,014	THDV	0,000
SU2/SE2	4%		 La tension de suministro del sistema es aceptable			
SN2/SE2	8%					
Q1+2/SE2	0%					
La ineficiencia del sistema mas perjudicial es		IHsec0				

3.3.3 Gestión centralizada

La gestión central, es un cuadro de mando integral que reúne de cada punto las no conformidades del sistema mediante el registro histórico de los parámetros de la carga eléctrica. Aquí se evalúan las no conformidades predominantes y se dispone de información base para que un usuario pueda tomar decisiones al respecto.

A continuación se evalúa la metodología de caracterización de la carga a partir de diagramas de flujo, identificando los comportamientos de carga en cada punto de medida, para dar un dimensionamiento general de la dinámica de las variables eléctricas que modelan los comportamientos de carga.

Para evaluar los factores de potencia FP_e y los desbalances de tensión U_v se presentan los esquemas de las figuras 19 a 20, considerando tres puntos de medida.

Figura 19. Evaluación de los factores de potencia en todos los puntos de medida.

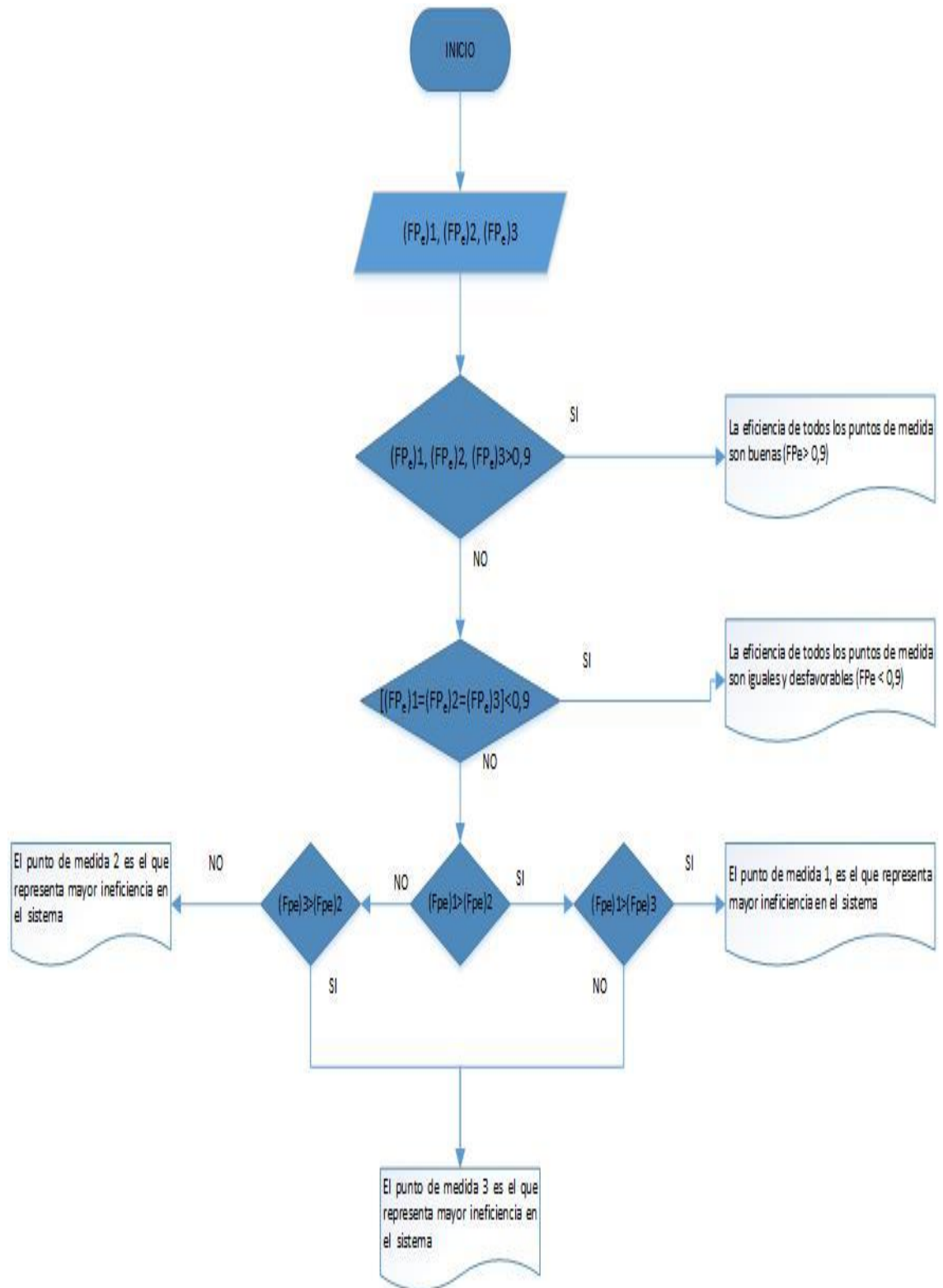
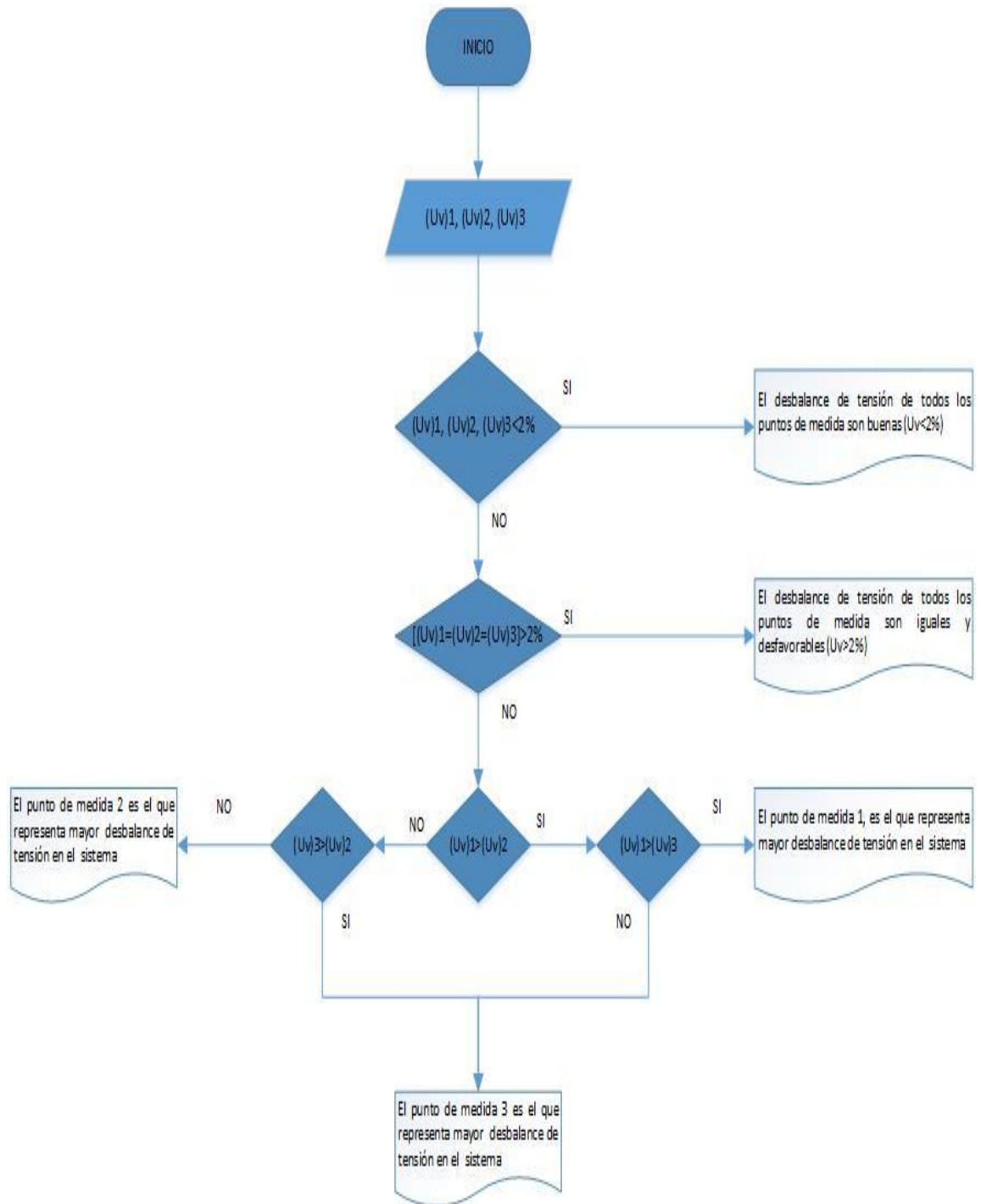


Figura 20. Evaluación de los desbalances de tensión en todos los puntos de medida.



Al igual que en el numeral 3.3.1, se manejan las mismas relaciones de potencias de distorsión S_{eN} , desbalances en la componente fundamental S_{U1} y reactivos de la componente fundamental Q_{1+} con respecto a P_{1+} o de S_e según se realice la selección de la relación dentro del programa de metodología de caracterización de la carga eléctrica de una edificación.

Estas tres relaciones permiten establecer tanto el tipo de comportamiento de la carga eléctrica como la caracterización de las ineficiencias predominantes en cada punto de medida, ver figuras 21 a 23.

Figura 21. Evaluación de las distorsiones de potencia en todos los puntos de medida.

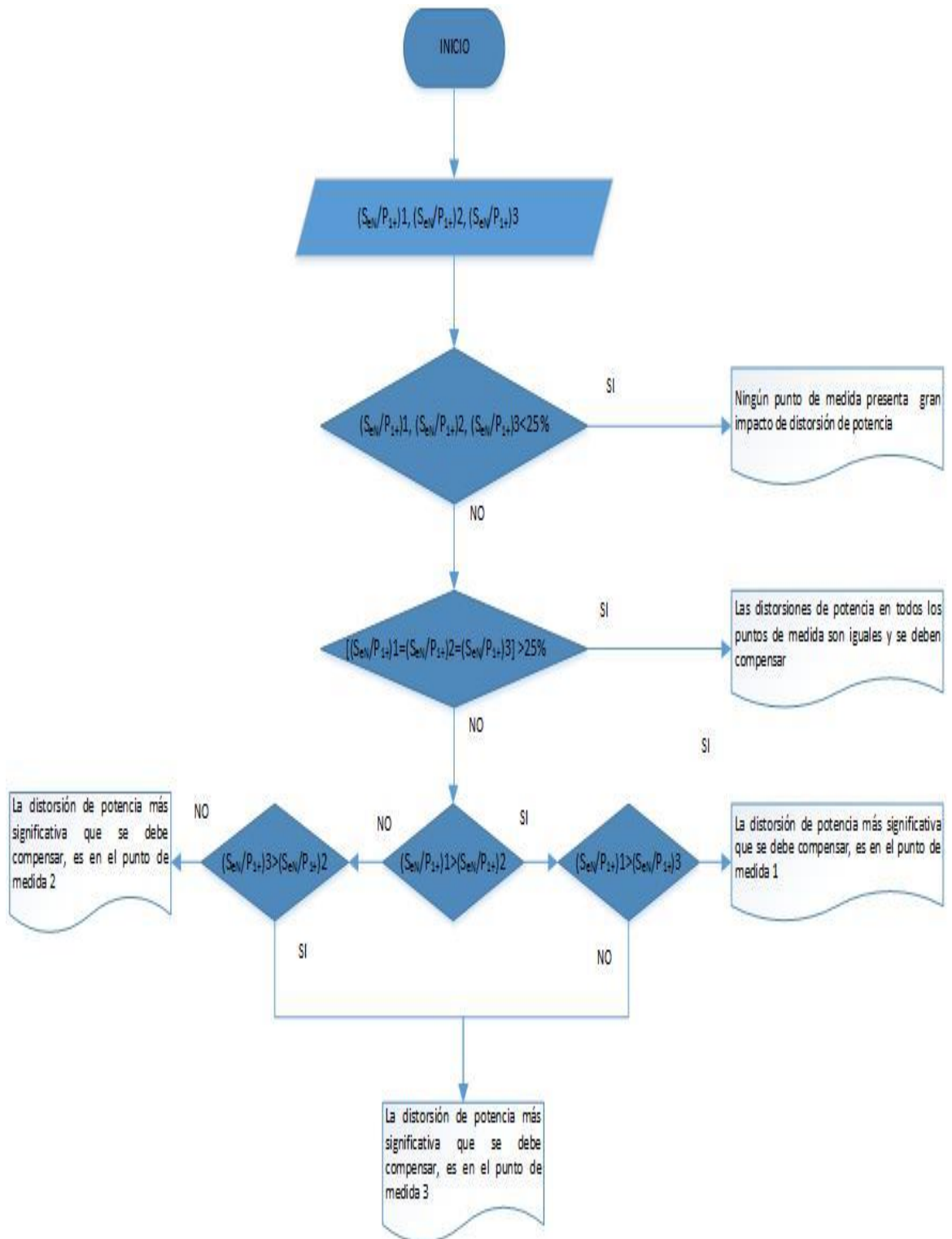


Figura 22. Evaluación de los desbalances de potencia en todos los puntos de medida.

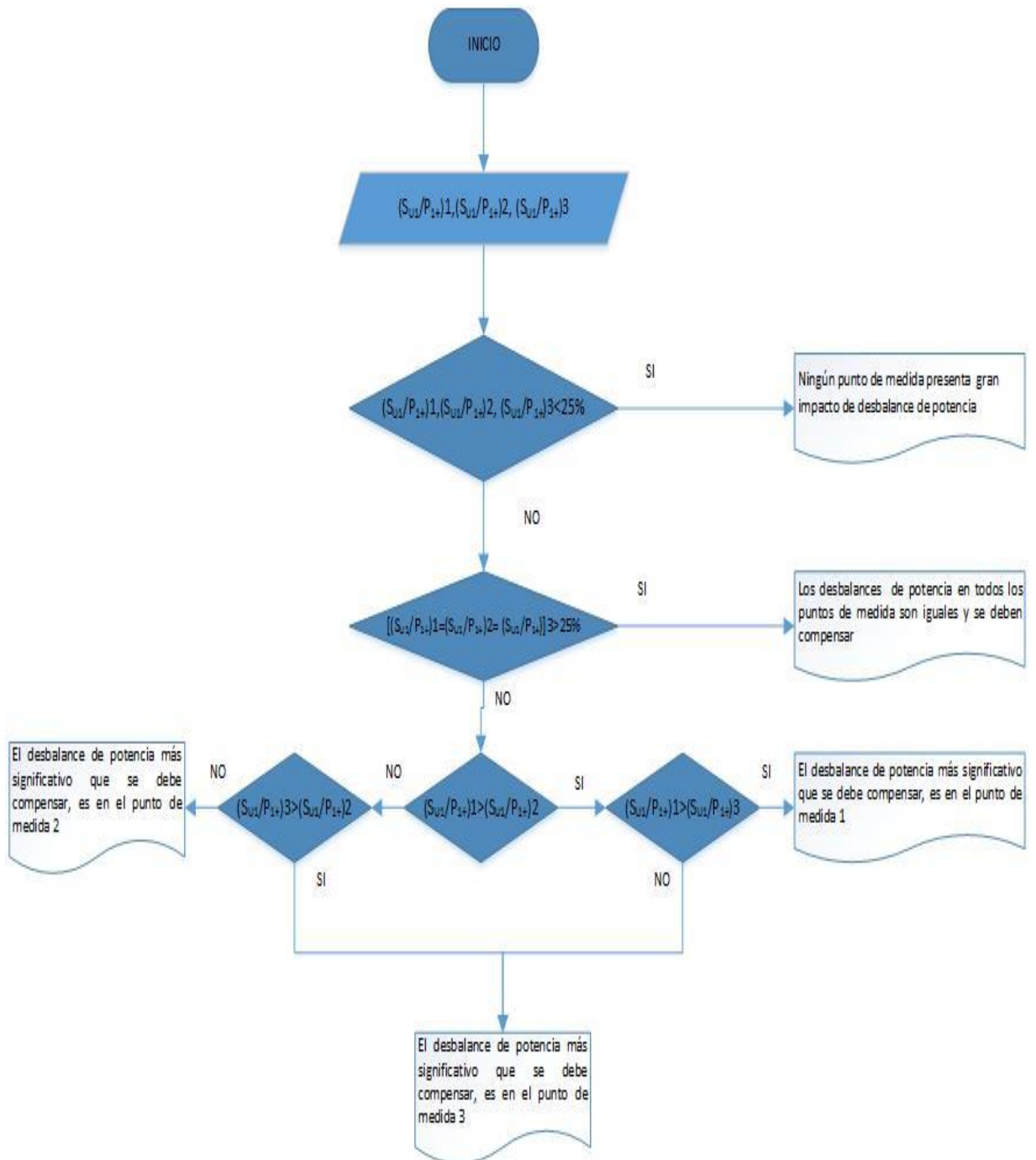
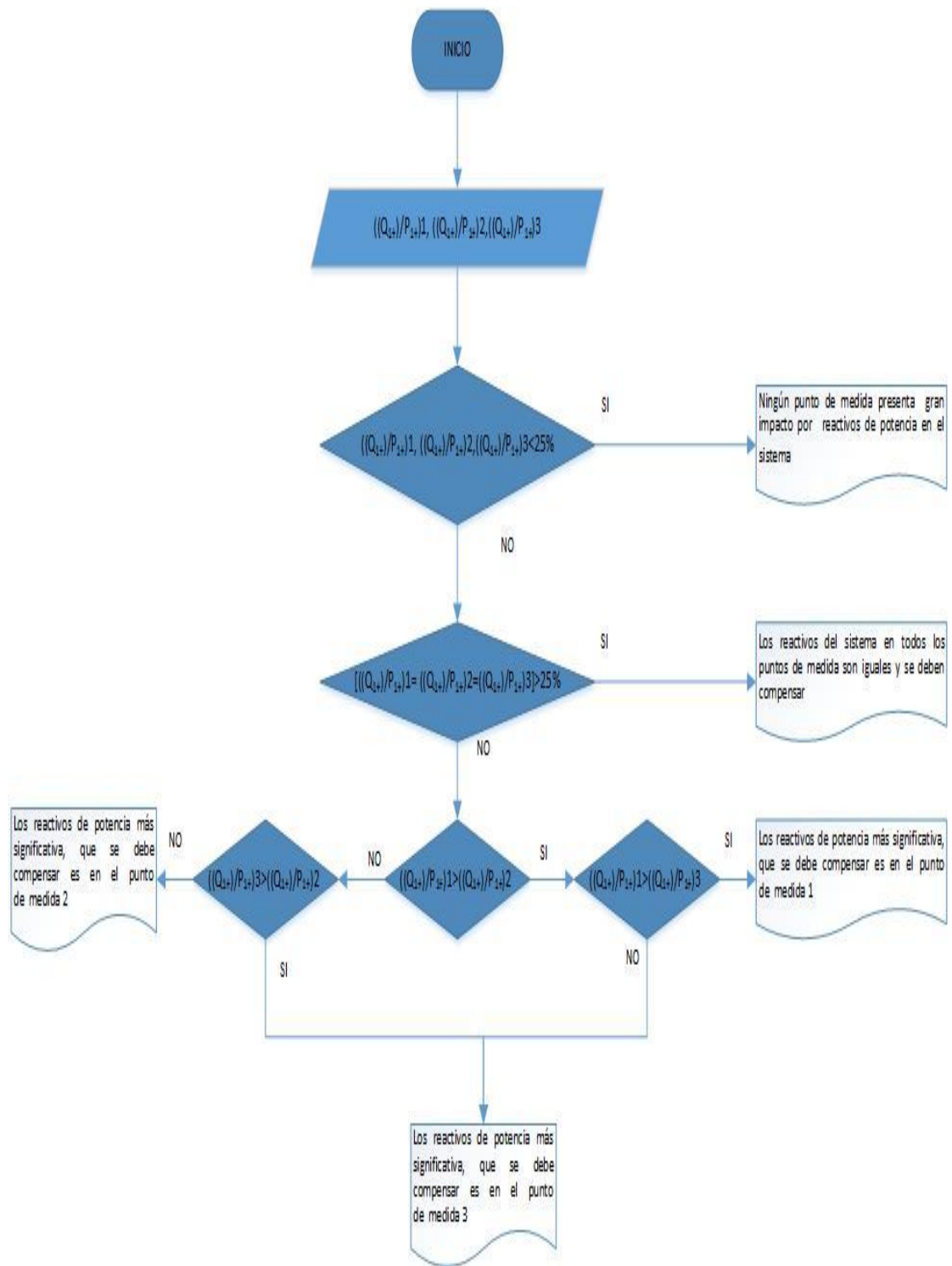
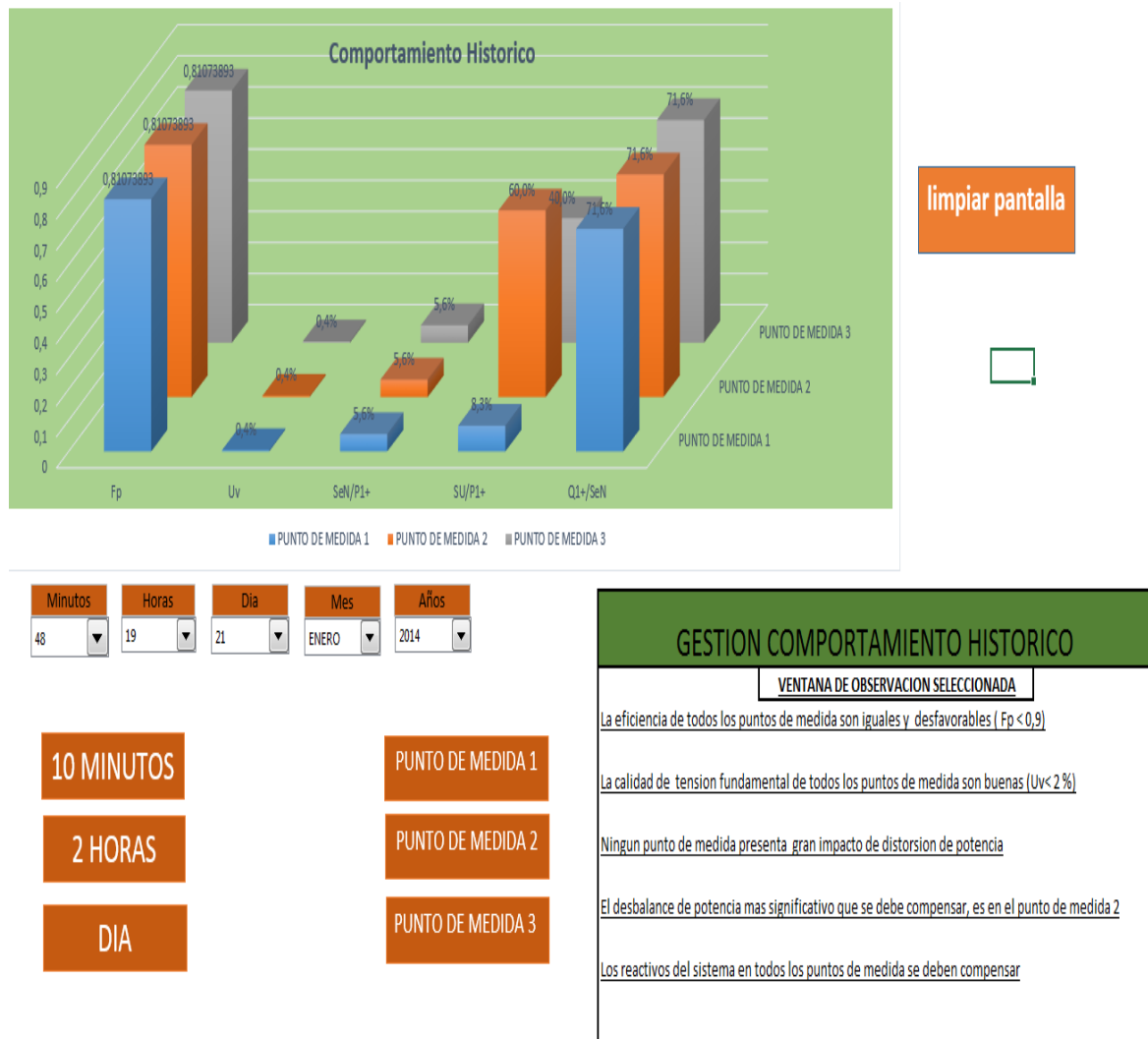


Figura 23. Evaluación de los reactivos de potencia en todos los puntos de medida.



Por último se muestra la Figura 24. Donde se observa el vistazo principal de la ventana de gestión central.

Figura 24. Ventana de gestión central



3.4. EJEMPLO DE CARACTERIZACIÓN DE LA CARGA ELÉCTRICA DE UNA EDIFICACIÓN CON GESTIÓN DE LA INFORMACIÓN.

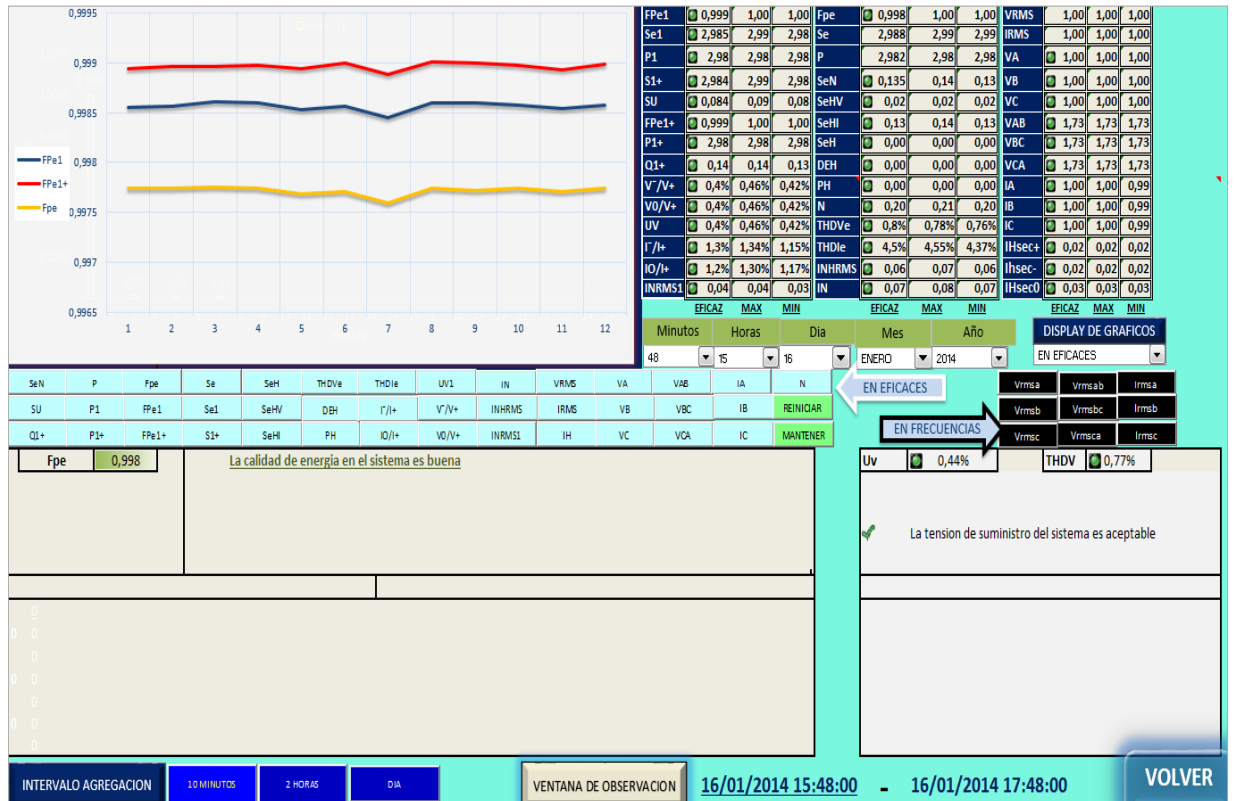
Previamente se ha descrito la metodología para evaluar el comportamiento de una carga eléctrica de acuerdo con los límites de los parámetros de cada variable eléctrica descritos en las tablas 10,11,12 y 13, además se realizan algunas sugerencias a manera de gestión de la información de los datos en función de cada caso de perturbación eléctrica.

A continuación se describe un ejemplo realizado a partir del programa de metodología de caracterización de la carga eléctrica de una edificación, simulando los seis cuadros de carga sintéticos descritos en el numeral 2.3.1 con hora de inicio 15:48:01 del 16/01/2014 y duración 12 horas. Los seis cuadros de carga se relevan cada 2 horas, para de esta manera generar 6 casos de caracterización dinámica de la carga con el intervalo de agregación de datos de 2 horas establecido por la norma IEC-61000-430. El archivo para este ejemplo se llama PUNTODEMEDIDA1. Como soporte para realizar simulaciones de diversos ejemplos de cargas en un sistema eléctrico, se anexa un video tutorial donde se explica el funcionamiento del programa y la caracterización de los cuadros de carga sintéticos. Esto permite verificar e iterar otros intervalos de tiempo y ubicación de la ventana de observación para analizar el comportamiento de la carga eléctrica, facilitando así la gestión de información con los indicadores de las variables eléctricas.

El ejemplo se desarrolló con fines prácticos con un punto de medida (un solo archivo en Excel), donde a partir de los datos ya almacenados con un histórico de 12 horas, se interpreta a continuación cada caso de caracterización.

Primer caso: Carga trifásica lineal balanceada.

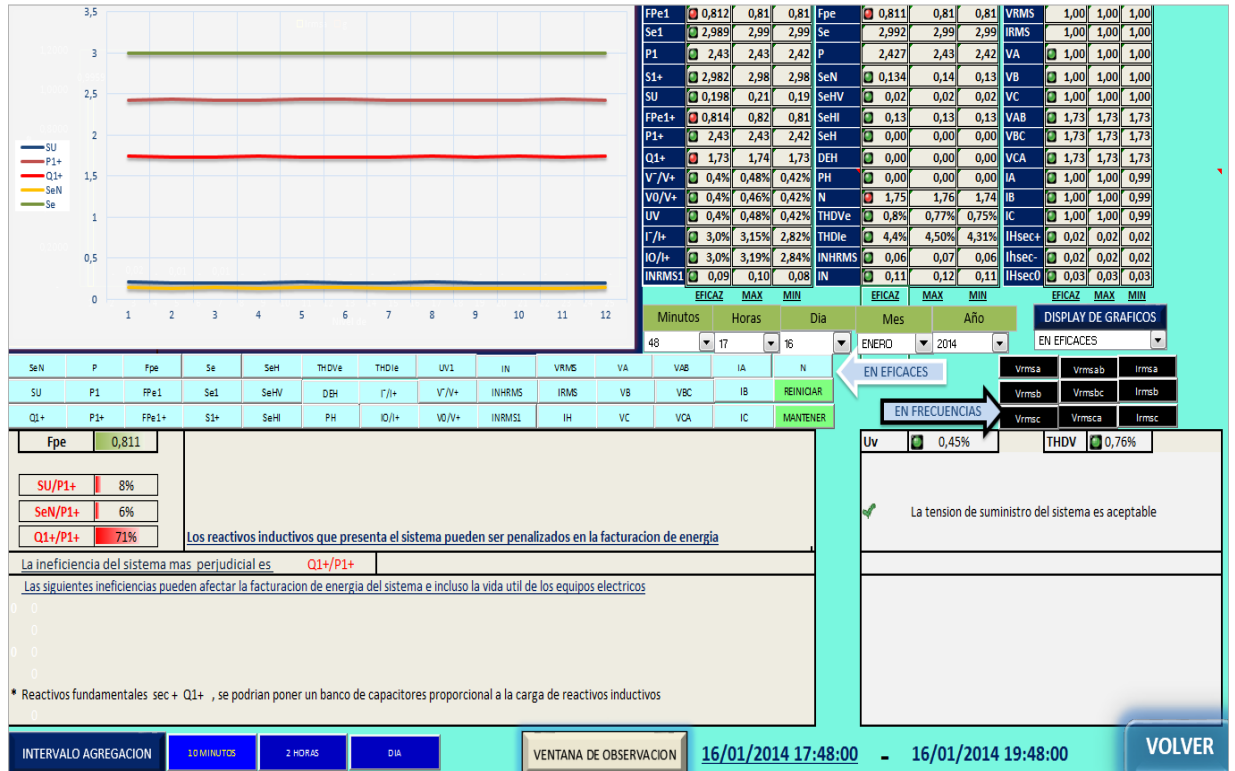
Figura 25. Primer caso.



En la Figura 25 se observa que todos los indicadores de las variables calculadas tienen un icono verde, el cual representa que la carga en este intervalo de tiempo tiene una adecuada calidad de energía eléctrica de acuerdo con la normatividad colombiana, ya que F_{pe} es mayor de 0,9. Además en la ventana gráfica de la Figura 25 se observan los tres factores de potencia F_{Pe} , F_{Pe1} y F_{Pe1+} con valores entre 0,9975 y 0,999 en las dos primeras horas.

Segundo caso: Carga trifásica inductiva balanceada.

Figura 26. Segundo caso.

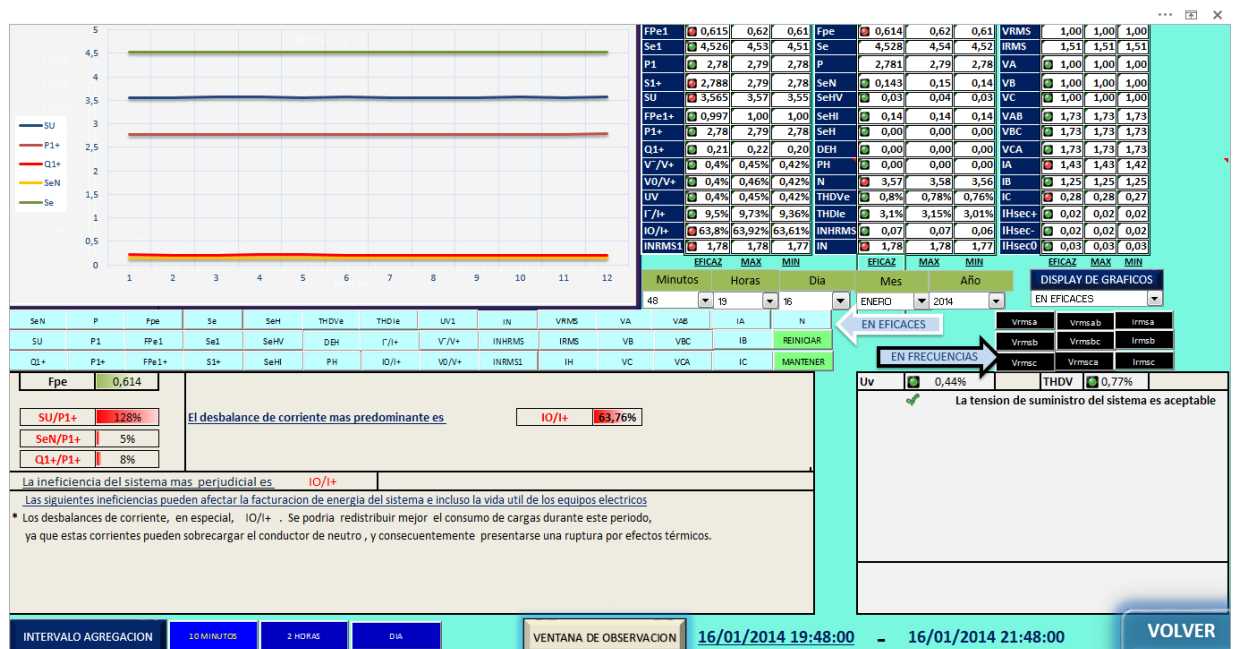


De acuerdo con la gestión del programa, la potencia reactiva de secuencia positiva del sistema se debería compensar, ya que la relación Q_{1+}/P_{1+} supera el 25% (indicador propuesto para limitar esta componente de reactiva en relación a la potencia útil del sistema P_{1+}), y además se advierte que antes de compensar esta ineficiencia se debe verificar que no haya presencia de armónicos de potencia ya que estos podrían empeorar el sistema eléctrico, y verificar que $Q_{1+} > 0$ luego de la compensación. Como es de esperar todos los factores de potencia son bajos,

simbolizados con un icono rojo. La potencia no activa N también indica un uso inadecuado de la energía eléctrica. En la ventana de visualización de la Figura 26 se puede observar que la Q_{1+} (grafico de color rojo) es incluso más de la mitad de la potencia útil del sistema P_{1+} (grafico de color violeta), mientras que las potencia S_{u1} y S_{eN} son muy pequeñas (gráficos de color azul y amarillo respectivamente).

Tercer caso: Carga trifásica con desbalances de corriente.

Figura 27. Tercer caso.



A partir de la gestión que realiza el programa, se sugiere que para disminuir los desbalances de corriente se deben redistribuir las cargas monofásicas que estén conectadas al sistema trifásico, ya que la fuerte ineficiencia de I_{10}/I_{1+} pueden sobrecargar el conductor neutro y consecuentemente presentarse una ruptura por

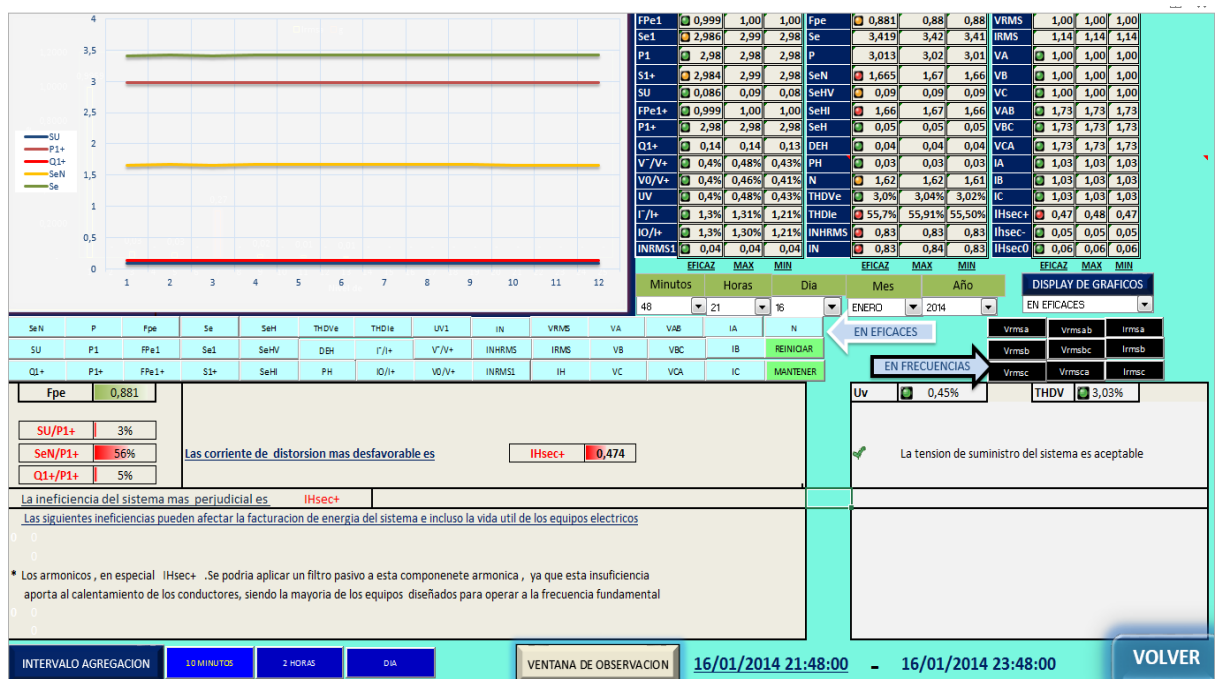
efectos térmicos. Esta gestión se considera necesaria si la relación S_{U1}/P_{1+} es mayor al 25% (indicador propuesto para limitar esta componente de potencia de desbalance en relación a la potencia útil del sistema P_{1+}).

En este caso FP_e y FP_{e1} están por debajo del límite de calidad de energía según los indicadores de la Tabla 12. Como la relación I_{10}/I_{1+} es elevada, este aumenta también la potencia de desbalance fundamental S_{U1} . Es decir que en este caso el bajo factor de potencia es debido al desbalance del sistema trifásico.

Como se muestra en la Figura 27, la variable S_{U1} (gráfico azul), está por encima de las otras variables Q_{1+} y S_{eN} (gráficos rojo y amarillo respectivamente) destacando su predominancia en el sistema.

Cuarto caso: Carga trifásica no lineal con presencia de armónicos de secuencia positiva (7 armónico).

Figura 28. Cuarto caso.



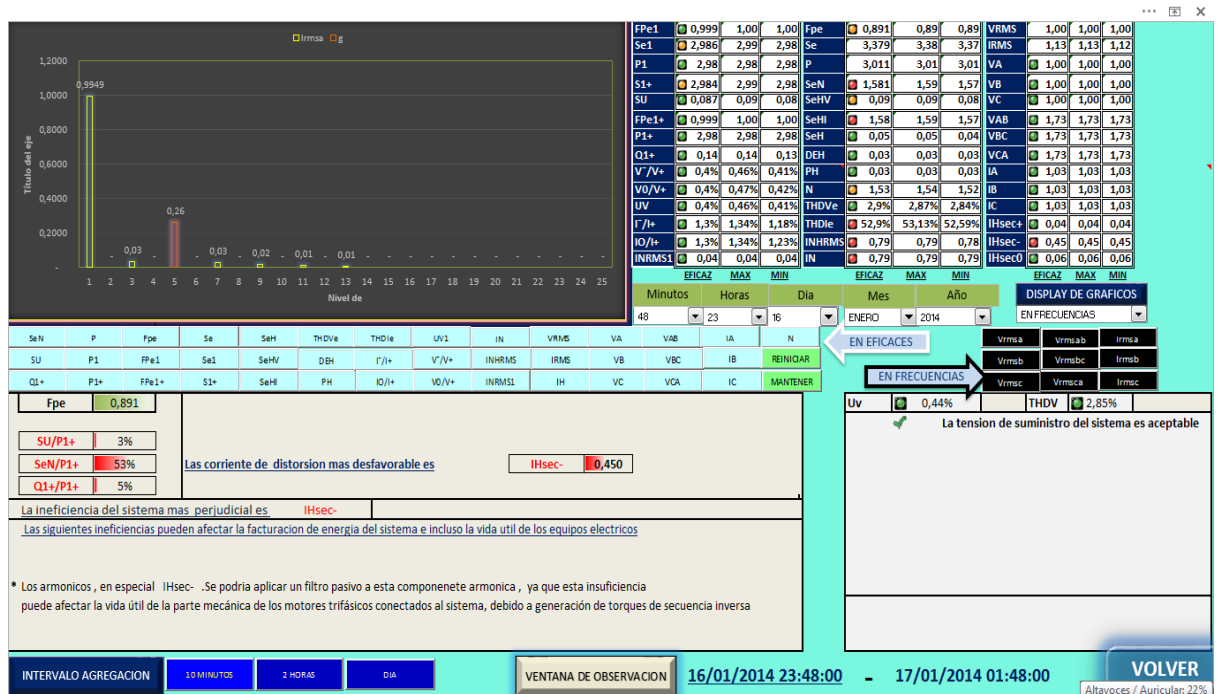
Para esta situación, el sistema de gestión del programa, sugiere que se podría instalar un filtro pasivo a la componente de armónica séptima, ya que la ineficiencia de $I_{H_{sec+}}$ puede hacer sobrecargar los conductores de fase y generar calentamiento en los mismos. Esta gestión se considera necesaria si la relación S_{eN}/P_{1+} es superior al 25%(indicador propuesto para limitar esta componente de potencia no fundamental en relación a la potencia útil del sistema P_{1+}), ya que lo útil sería compensar este tipo de ineficiencias bajo consumo de cargas importantes o elevadas en el sistema eléctrico.

El factor de potencia FP_e es menor a 0,9 y se detecta que la componente de potencia no activas S_{eN} está por encima de los límites descritos en las Tabla 11.La distorsión de corriente también es elevada ($THD_I=55,7\%$).

Como se muestra en la Figura 28, la variable S_{eN} (gráfico de color amarillo) está por encima de las otras variables Q_{1+} y S_{U1} (gráficos rojo y azul respectivamente) destacando su predominancia en el sistema.

Quinto caso: Carga trifásica no lineal con presencia de armónicos de secuencia negativa (5 armónico).

Figura 29. Quinto caso.

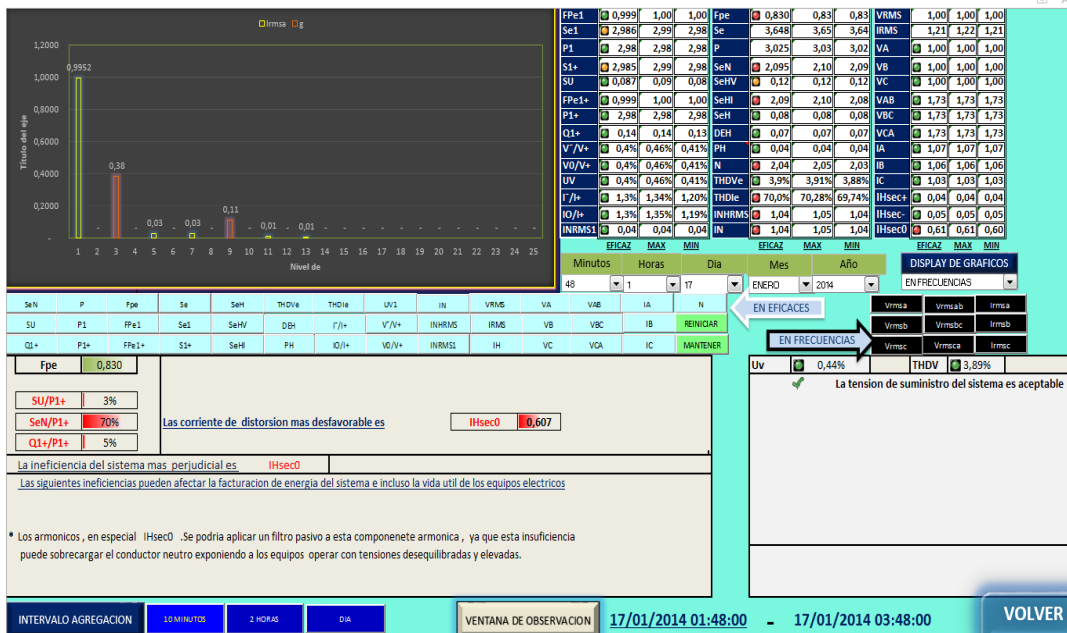


El sistema de gestión del programa, sugiere que se podría instalar un filtro pasivo a la componente del quinto armónico, ya que la ineficiencia de I_{Hsec} puede afectar la vida útil de la parte mecánica de los motores trifásicos conectados al sistema, debido a generación de torques de secuencia inversa. Este caso tiene un comportamiento similar al anterior estando S_{eN} por encima de los límites descritos en la Tabla 11. Adicionalmente, la distorsión de corriente también es elevada ($THD_I = 70\%$).

La Figura 29 muestra un comportamiento similar a la Figura 28 (cuarto caso), donde se observa que la corriente armónica que incide en el alto valor de S_{eN} es la del quinto armónico.

Sexto caso: Carga trifásica no lineal con presencia de armónicos de secuencia cero (3 y 9 armónico).

Figura 30.Sexto caso.



El sistema de gestión del programa, sugiere que se podría instalar un filtro pasivo a la componente del tercer armónico, ya que la ineficiencia de IH_{sec0} puede sobrecargar el conductor neutro exponiendo a los equipos operar con tensiones desequilibradas y elevadas. Este caso tiene el mismo comportamiento de los dos casos anteriores donde los parámetros: Se_N , THD_i , IN_H e IN están por encima de los límites establecidos en las tablas 6 y 11.

Las gráficas de la **Figura 30** son similares a las de los casos cuarto y quinto. Se observa que las corrientes armónicas que impactan en el valor del parámetro Se_N son la de los armónicos triplados: 3 y 9, pero en especial la del tercer armónico.

Hasta el momento se han caracterizado los seis casos propuestos a partir de los seis cuadros de carga que se relevan en un tiempo de 2 horas. A continuación se plantea un séptimo caso, con una caracterización general a partir de las 12 horas del día simuladas. Por tanto se seleccionó el intervalo de agregación de un día,

donde se puede observar el comportamiento de las doce horas que contiene seis datos con muestras de dos horas.

Anteriormente se ha identificado la predominancia del comportamiento de carga de cada caso presentando en el intervalo de agregación de datos de 2 horas seleccionado, en donde siempre coincidida que los valores máximos y mínimos de cada variable estaban muy cerca del valor promedio eficaz de estas mismas, por tanto había estabilidad en el patrón caracterizado. Caso diferente es el de la Figura 31, ya que se usó el intervalo de agregación de datos de un día, donde se pueden observar que se debe compensar la S_{U1} y la S_{eN} , durante las 12 horas y la Q_{1+} estuvo cerca al límite también para compensarla.

Figura 31. Séptimo caso



En este caso la metodología de caracterización de la carga eléctrica de una edificación, muestra que los valores máximos y mínimos de las variables que

inicialmente se plantea compensar, son dispersos en este intervalo de observación. Adicionalmente, al analizar los gráficos de S_{U1} , S_{eN} , y Q_{1+} se observa que: Q_{1+} solo presenta un valor por encima del límite durante la segunda muestra de 2 horas, mientras que S_{U1} sobrepasa el límite en la tercera muestra de 2 horas y por último S_{eN} tiene un valor por encima del límite en las muestras 4, 5 y 6 es decir durante 6 horas del día simulado. Por consiguiente, se concluye que si se va a caracterizar con una ventana de observación relativamente grande en tiempo, los comportamientos de carga que se puedan presentar, pueden ser dispersos y por consiguiente, tomar una decisión para todo el intervalo de agregación de datos no es adecuado, por tanto ya es criterio del usuario, empezar a analizar los comportamientos de carga en intervalos de agregación más pequeños de ser necesario.

Solo se debería trabajar con intervalos de tiempo grandes si se observa un mismo patrón de comportamiento de la carga a partir de los intervalos de tiempo más pequeños.

4. CONCLUSIONES, RECOMENDACIONES Y FUTUROS DESARROLLOS.

A continuación se presentaran las conclusiones más relevantes del trabajo de grado, algunas recomendaciones y posibles futuros desarrollos.

4.1 CONCLUSIONES

Una vez finalizado el trabajo de grado, se puede concluir que:

- La metodología de caracterización dinámica a partir de cuadros de cargas sintéticos, simulada en la herramienta de análisis de datos Excel ofrece la posibilidad de interactuar con ella a quien lo requiera.
- La gestión automática implementada en la simulación con los cuadros de cargas sintéticos, facilitan la toma de decisiones, ya que este ofrece información suficiente de manera clara y concisa.
- La gestión centralizada de los cuadros de carga sintéticos como puntos de medida, facilitó la visualización de todas las posibles no conformidades que se puedan presentar en un sistema eléctrico, comparando entre cada una de ellas, las variables eléctricas con mayor predominancia en el sistema.
- El diagnóstico en tiempo real de los parámetros eléctricos, que se evalúan con criterios de entrada ajustados por el usuario, contribuyen como insumo a un sistema de medición inteligente (*Smart Metering*), donde el aporte dado por la metodología planteada en este trabajo de grado permite la integración de información entre diferentes puntos de medida de un sistema eléctrico.
- Por medio del registro dinámico es posible observar las perturbaciones eléctricas en el sistema en tiempo real, lo cual representa una oportunidad para monitorizar las condiciones eficientes en el sistema y contribuirá minimizar las

pérdidas de energía en el sistema y de este modo disminuir los costos de facturación.

- El desarrollo del Trabajo de Grado, muestra los alcances y ventajas que ofrecen los sistemas de medición inteligente, además de la posibilidad de implementar estos sistemas en la herramienta Excel.
- En el ejemplo del séptimo caso en el numeral 3.4, donde se realizó con un intervalo de agregación de un día, se observó que dependiendo de la dispersión de datos del comportamiento de una carga es favorable seleccionar un intervalo de agregación de datos más adecuado (ya sea más pequeño o más grande). Los datos reales de los que se podría disponer del comportamiento de una carga eléctrica podrían ser muy dispersos con un patrón de carga desconocido, entonces se puede ir iterando y observando que conjunto de intervalos de datos pequeños son similares para una mejor selección de intervalo de agregación de datos mayor y así caracterizar la carga con más detalle con intervalos de datos combinados.
- La utilidad de simular un comportamiento de carga eléctrico a partir de los cuadros de carga sintéticos (que se pueden modificar), es la posibilidad de iterar y analizar casos que se podrían presentar en cualquier instalación eléctrica y/o verificar el comportamiento después de hacer alguna acción frente a una ineficiencia ya intervenida.
- El valor agregado que se puede obtener de los límites de indicadores propuestos de las variables eléctricas, depende del tiempo con el que se involucre manejando el programa y analizando también, las correlaciones que tienen todas las variables eléctricas entre sí a partir de ejemplos de diferentes comportamientos de cargas.

- Los parámetros más relevantes que se deben analizar como prioridad, son el factor de potencia y el desbalance de tensión, los cuales indican globalmente la calidad y la seguridad de una red eléctrica respectivamente.
- El programa diseñado para la metodología de caracterización de la carga eléctrica de una edificación, presenta especificaciones básicas debido a las limitaciones del software Excel, mencionadas cada una así:
 - a) La visualización de la ejecución modo instantáneo, se puede ejecutar cada segundo, por lo cual se eligió el intervalo de agregación de 3 segundos en vez de 200 ms, establecidos por la norma IEC 61000-4-30.
 - b) La visualización de la ejecución modo histórico, tiene como limitante el ingreso de cerca de 1 043 000 datos por parámetro eléctrico, pero por limitaciones de la ejecución de la herramienta Excel, es favorable trabajar hasta con 201 600 datos por parámetro eléctrico con el fin de tener una velocidad aceptable en el procesamiento de los datos a analizar.
- El programa diseñado para la metodología se puede implementar hasta con tres puntos de medida y un gestor central. De esta manera, puede manejarse cada punto de medida como una edificación siendo el gestor central quien evalúa el comportamiento de las tres edificaciones, o se puede manejar como un piso de una edificación siendo el gestor central quien evalúa el comportamiento de la edificación que contiene los pisos como puntos de medida.
- El programa desarrollado en la herramienta Excel puede ser utilizado en el sector industrial y/o residencial, teniendo en cuenta las condiciones y limitaciones anteriormente mencionadas.

- La realización de este trabajo de grado permitió visionar más de cerca uno de los proyectos de vida que parece ser muy provechoso profundizar, ya que se puede obtener beneficios caracterizando comportamientos de cargas eléctrica reduciendo las pérdidas de energía en un sistema eléctrico, con la ventaja de que se ya dio un primer paso en la investigación, y sacando también valor agregado de herramientas básicas de computación que facilitan la gestión de la información.

4.2 RECOMENDACIONES

- Los datos de los parámetros eléctricos que se almacenan en el programa de Excel para la metodología de caracterización de la carga eléctrica de una edificación, tanto para modo instantáneo e histórico, deben tener su fecha e ingreso, un requisito que dentro del programa es primordial para seleccionar la ventana de observación que se desee analizar, por tanto para el modo ingreso de datos que se puede seleccionar desde la ventana principal de cada libro de Excel (que representa un punto de medida) es necesario que se ingresen los datos históricos con fecha de registro: día/mes/año hora:minuto que representa el formato en Excel dd/mm/yyyy hh:mm.
- Para el modo ingreso de datos, si se dispone de datos con tiempos menores de 1 s, es decir, datos con registro en ms por ejemplo, se debe tener en cuenta que la herramienta Excel, reconoce tiempos hasta de mínimo 1 segundo en registro por fechas, por tanto para este tipo de situación, solo es necesario ingresar los datos en el formato dd/mm/yyyy hh:mm:ss, por lo que se reduciría los 2 016 00 datos por parámetro eléctrico que disponía para seleccionar la ventana de observación en el escenario histórico.

- Si se desea caracterizar una carga eléctrica a partir de datos históricos con todas las variables calculadas y tiempo de almacenamiento entre datos de 3 segundos, se puede hacer desde el archivo “punto de medida1” de la carpeta Control central o desde el archivo “punto de medida” ubicado en la carpeta caracterización individual, donde se guardarían los datos en la hoja de registro con el formato que se encuentra allí. El archivo “punto de medida” no tiene archivos almacenados, aquí se puede iniciar una nueva simulación si se desea, apoyado con los cuadros de carga sintéticos modificables, con la ventaja que sin datos almacenados, es más rápido iniciar la simulación.

4.3 FUTUROS DESARROLLOS

- Para la implementación de este programa a una red inteligente, podría ser necesario ingresar datos de entrada, tales como, número de ingreso de personas y área por punto de medida, costo de penalización por bajo factor de potencia y temperatura entre otros. Todo esto con el fin de integrar todos los parámetros asociados para un diagnóstico más adecuado de la calidad de la energía eléctrica que interactúa con muchas condiciones del lugar de medida.
- Teniendo en cuenta las limitaciones del software Excel, mencionadas anteriormente sobre el programa diseñado para la metodología de caracterización de la carga eléctrica de una edificación, se plasman algunas ideas que contribuyen a la universalidad del programa frente a cualquier cantidad de datos:
 - a) Si se desea ingresar datos con intervalos de agregación menores de 3 s en la ejecución modo instantáneo, se deben ingresar los datos en una nueva hoja que se debe crear dentro de cada libro que sustituye un punto de

medida, luego se les aplicaría un filtro avanzado (función de Excel) promediando la cantidad de datos existentes que representan los 3 segundos. Posteriormente estos datos se envían a la hoja donde se realizan los cálculos cada 3 segundos y de esta manera la ejecución seguiría con su funcionamiento normal.

- b) Si se desea ingresar una cantidad de datos superior a 86 400 en la ejecución modo histórico, se debe agregar nuevas hojas en cada libro que representa un punto de medida, por lo que esto implicaría agregar en la programación de la metodología de caracterización un selector de hoja de datos para realizar análisis dentro de todo el rango de datos la ventana de observación que se necesite, pero se seguirá teniendo la limitación de solo poder graficar al tiempo máximo 86 400 por parámetro eléctrico, de esta manera la ejecución seguiría con su funcionamiento normal.
- Para complementar la metodología de caracterización de este trabajo de grado, se puede implementar modelos de circuitos equivalentes para cada caso que se evalúa junto con los límites de indicadores de carga aplicados y en el intervalo de agregación seleccionado, de esta manera se obtendría una manera ilustrativa de los comportamientos de carga ampliando mejor la gestión de estos.



BIBLIOGRAFÍA

- [1] Academia de Ciencias, “Hoy día existen equipos para controlar las perturbaciones eléctricas” Marzo 25, 2013 <http://www.academiadeciencias.com>
- [2] Calidad de la Energía Eléctrica, Universidad Politécnica Salesiana, <http://dspace.ups.edu.ec/bitstream/123456789/145/2/CAPITULO%20I.pdf>
- [3] Eguíluz Morán, Luis Ignacio et al., Estrategias para el consumo racional de la electricidad. Nueva filosofía para su facturación: Universidad de Cantabria, Grupo de ingeniería y tecnología eléctrica (GITEL).
- [4] Higuera, José M, “Colombia cada vez más eficiente energéticamente”, Marzo 5, 2013. <http://www.portafolio.co/economia/colombia-cada-vez-mas-eficiente-energéticamente>
- [5] Martínez, Roberto, Javier Martínez, “Seguimiento y medición”, Fundación Másfamilia <http://www.certificadoefr.org/files/images/10SEGUIMIENTO.pdf>
- [6] Ministerio de Industria, Turismo y Comercio, “Reglamento unificado de puntos de medida del sistema eléctrico español”.
<http://www.fenercom.com/pdf/normativa/RD-1110-2007.pdf>
- [7] Norma Técnica NTC Colombiana 5001, calidad de la potencia eléctrica. Límites y metodología de evaluación en punto de conexión común, mayo de 2008.



[8] Normativas aplicables a la calidad eléctrica UNE-EN 50160, CEI 61000-4-30
<http://www.isotest.es/web/Soporte/Formacion/REGLAMENTOS/Normas%20PQ.pdf>

[9] Ordoñez Plata, Gabriel, Mediciones ELÉCTRICAS I, II, III, IV, V, Universidad Industrial de Santander <http://tic.uis.edu.co/ava/course/view.php?id=1189>