



ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL



FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA

ANÁLISIS DE LA INCIDENCIA DE LA INCORPORACIÓN PROGRESIVA DE COCINAS DE INDUCCIÓN EN LA CALIDAD DE LA ENERGÍA DE LA RED ELÉCTRICA DE SUB-DISTRIBUCIÓN

TRABAJO DE TITULACIÓN PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE
MAGÍSTER EN EFICIENCIA ENERGÉTICA

ING. CARLOS FABIÁN ÁLVAREZ GALLO
carlosalvarezg@engineer.com

DIRECTOR:
Ing. MARCELO POZO PALMA, Ph.D.
marcelo.pozo@epn.edu.ec

Quito, noviembre 2023

CERTIFICACIÓN

Certifico que el presente trabajo fue desarrollado por **CARLOS FABIÁN ÁLVAREZ GALLO**, bajo mi supervisión.

Ing. Marcelo Pozo Palma, Ph.D.
DIRECTOR DE PROYECTO

DECLARACIÓN

Yo, **Carlos Fabián Álvarez Gallo**, declaro bajo juramento que el trabajo aquí descrito es de mi autoría; que no ha sido previamente presentado para ningún grado o calificación profesional; y, que he consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.

A través de la presente declaración cedo mis derechos de propiedad intelectual correspondiente a este trabajo, a la Escuela Politécnica Nacional, según lo establecido por la Ley de Propiedad Intelectual, por su Reglamento y por la normativa institucional vigente.

Carlos Fabián Álvarez Gallo

AGRADECIMIENTO

A: Johanna Marcela, María Fabiola, Carlos Gonzalo, Ana Lucía, David Gonzalo, Javier Ignacio, Telmo Aníbal, Juan Fernando, Alexis Juan Carlos, Gloria Lucía, Lucila Magdalena, Marco Antonio, Luis Marcial, Silvia Jacqueline, Carlos Javier y mucha gente que falta por nombrar, por contribuir tanto en mi vida y por su, siempre oportuna, cooperación en mis proyectos.

DEDICATORIA

A Faridé Sofía.

ÍNDICE

Certificación.....	i
Declaración	ii
Agradecimiento	iii
Dedicatoria	iv
Índice	v
Índice de tablas	vii
Índice de figuras	viii
Resumen	xi
Abstract	xii
Introducción.....	1
Pregunta de Investigación	2
Objetivo general	2
Objetivos específicos	2
1. Marco teórico	3
1.1. ¿Por qué se opta por cocinas de inducción?	3
1.2. Incidencia de las cocinas de inducción en el Sistema de Distribución Eléctrica.....	3
1.3. Calentamiento por inducción electromagnética	4
1.3.1. Transmisor, ley de Ampere.....	4
1.3.2. Receptor, ley de Faraday.....	5
1.3.3. Parámetros para el calentamiento por inducción	7
1.3.4. Componentes de un sistema de calentamiento por inducción.....	9
1.4. Cocinas de inducción en el mercado nacional.....	12
1.4.1. Datos de placa	12
1.5. Calidad de energía eléctrica	13
1.5.1. Ambiente electromagnético	16
2. Aspectos metodológicos	18
2.1. Mediciones y recopilación de datos técnicos	18
2.2. Definición del “Sistema eléctrico”	18
2.3. Periodo de muestreo y tamaño de la muestra	19
2.4. Determinación de parámetros técnicos.....	21
2.5. Determinación de indicadores	21

2.6.	Determinación de pérdidas	24
2.6.1.	Pérdidas en transformadores, factor K	24
2.6.2.	Pérdidas en conductores	25
2.6.3.	Caída de tensión y distorsión armónica en voltaje.....	26
3.	Resultados	28
3.1.	Mediciones en cocinas de inducción	28
3.1.1.	Cocina de inducción Mabe.....	28
3.1.2.	Cocina de inducción Indurama	29
3.2.	Formas de onda de parámetros de energía y electricidad.....	29
3.2.1.	Zona de cocción Mabe 16 booster.....	29
3.2.2.	Zonas de inducción Mabe 25 booster, Indurama 16, Indurama 16 boost e Indurama 25 boost	38
3.3.	Información de la CNEL EP Unidad de Negocio Guayaquil.....	57
3.3.1.	Indicadores de eficiencia e intensidad energética en la CNEL EP UN Guayaquil, por influencia de la incorporación de cocinas de inducción.....	59
3.3.2.	Determinación de pérdidas en transformadores	59
3.3.3.	Determinación de carga de cocinas de inducción.....	60
3.3.4.	Determinación de pérdidas en redes secundarias	61
3.3.5.	Determinación de pérdidas en acometidas principales.....	63
3.3.6.	Determinación de pérdidas en acometidas dedicadas de cocinas de inducción	64
4.	Conclusiones y recomendaciones	66
4.1.	Conclusiones	66
4.2.	Recomendaciones	68
5.	Bibliografía.....	69
6.	Anexos.....	72
	Anexo 01. Datos de placa de cocinas de inducción utilizadas	73
	Anexo 02. Componentes armónicas de corriente.....	76
	Anexo 03. Análisis de normativa vigente.....	86

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 3.1. Marcas y modelos de zonas de inducción de cocinas de maquila nacional.....	28
Tabla 3.2. Registro de Voltajes de alimentación.	42
Tabla 3.3. Relaciones I_1 / I_{rms} [%] mínima y máxima en zonas de cocción. ...	46
Tabla 3.4. Niveles de factor de potencia y potencia máxima registrada.....	57
Tabla 3.5. Transformadores de distribución, monofásicos y trifásicos.	57
Tabla 3.6. Usuarios de baja tensión, residenciales y beneficiarios de la tarifa preferencial por uso de cocinas de inducción.....	57
Tabla 3.7. Distancia de redes de distribución secundaria y distancias consolidada de acometidas de los usuarios.....	58
Tabla 3.8. Resumen de balance energético de la CNEL EP UN Guayaquil.....	58
Tabla 3.9. Balance de pérdidas reportadas por la Unidad de Negocio Guayaquil.	58
Tabla 3.10. Resumen de consumos de usuarios beneficiarios de tarifa PEC..	59
Tabla 3.11. Indicadores de eficiencia e intensidad energética.	59
Tabla 3.12. Distorsión armónica total, Distorsión total de demanda y cálculo de factor k en transformadores de 50kVA monofásicos.	60
Tabla 3.13. Impedancias típicas de conductores de aluminio con cable concéntrico y núcleo de acero.....	61
Tabla 3.14. Afectación a la calidad e incidencia en las pérdidas técnicas por el funcionamiento de una cocina de inducción a plena carga (6254 W).	62
Tabla 3.15. Impedancias típicas de conductores <600 Vac.	63
Tabla 3.16. Afectación a la calidad e incidencia en las pérdidas técnicas en la acometida principal por la acometida principal funcionamiento de una cocina de inducción a plena carga (6254 W).....	64
Tabla 3.17. Afectación a la calidad e incidencia en las pérdidas técnicas en “circuito expés” por el funcionamiento de una cocina de inducción a plena carga (6254 W).....	65
<i>Tabla 6.1. Niveles de eficiencia energética para cocinas de inducción de uso doméstico.</i>	97
Tabla 6.2. Plan de muestreo aplicando norma NTE INEN-ISO 2859-1.....	98

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1. Campo magnético alrededor de una corriente eléctrica.	5
Figura 1.2. Curva de histéresis de un material ferromagnético.	7
Figura 1.3. Componentes de un sistema de calentamiento por inducción.	10
Figura 1.4. Cocinas de inducción.	12
Figura 1.5. Dato de Placa de Cocina de Inducción.	13
Figura 1.6. Onda Sinusoidal.	14
Figura 2.1. Sistema Eléctrico.	19
Figura 2.2. Tamaño de la muestra analizada por nivel de potencia.	20
Figura 2.3. Ejemplo de gráfico de parámetro de una zona de cocción en todos sus niveles de potencia.	21
Figura 2.4. Distribución Gaussiana de los incrementos de consumo experimentados por los usuarios con tarifa PEC.	23
Figura 2.5. Distribución Gaussiana de la estabilidad de los incrementos de consumo experimentados por los usuarios con tarifa PEC entre los años 2016, 2017 y 2018.	24
Figura 3.1. Cocina de Inducción Mabe CMI6054SD.	28
Figura 3.2. Cocina de inducción Indurama EI – 4PVI60.	29
Figura 3.3. Ciclo de Operación, Mabe 16 booster.	30
Figura 3.4. Voltaje de Alimentación, Mabe 16 booster.	31
Figura 3.5. Corriente de alimentación, Mabe 16 booster.	32
Figura 3.6. Componente fundamental a distintos niveles de potencia (%), Mabe 16 booster.	32
Figuras 3.7. Composición armónica en corriente a distintos niveles de potencia, Mabe 16 booster.	35
Figura 3.8. THD medido en corriente, Mabe 16 booster.	36
Figura 3.9. THD calculado en corriente, Mabe 16 booster.	36
Figura 3.10. TDD en corriente en relación a corriente de potencia máxima de la cocina de inducción, Mabe 16 booster.	37
Figura 3.11. Potencia real y aparente de consumo, Mabe 16 booster.	37
Figura 3.12. Ciclo de Operación, Mabe 25 booster.	38
Figura 3.13. Ciclo de Operación, Indurama 1400 W.	39
Figura 3.14. Ciclo de Operación, Indurama 1100 W (Boost).	39

Figura 3.15. Ciclo de Operación, Indurama 1850 W (Boost).....	39
Figura 3.16. Voltaje de Alimentación, Mabe 25 booster.	40
Figura 3.17. Voltaje de Alimentación, Indurama 1400 W.	40
Figura 3.18. Voltaje de Alimentación, Indurama 1100 W (Boost).....	41
Figura 3.19. Voltaje de Alimentación, Indurama 1850 W (Boost).....	41
Figura 3.20. Corriente de alimentación [A], Mabe 25 booster.	43
Figura 3.21. Corriente de alimentación [A], Indurama 1400 W.....	43
Figura 3.22. Corriente de alimentación [A], Indurama 1100 W (Boost).	43
Figura 3.23. Corriente de alimentación [A], Indurama 1850 W (Boost).	44
Figura 3.24. Componente fundamental a distintos niveles de potencia (%), Mabe 25 booster.	44
Figura 3.25. Componente fundamental a distintos niveles de potencia (%), Indurama 1400 W.....	45
Figura 3.26. Componente fundamental a distintos niveles de potencia (%), Indurama 1100 W.....	45
Figura 3.27. Componente fundamental a distintos niveles de potencia (%), Indurama 1850 W.....	45
Figura 3.28. Composición armónica en corriente a distintos niveles de potencia, Mabe 25 booster.	47
Figura 3.29. Composición armónica en corriente a distintos niveles de potencia, Indurama 1400 W.....	48
Figura 3.30. Composición armónica en corriente a distintos niveles de potencia, Indurama 1100 W (Boost).	49
Figura 3.31. Composición armónica en corriente a distintos niveles de potencia, Indurama 1850 W (Boost).	50
Figura 3.32. THD medido en corriente, Mabe 25 booster.	51
Figura 3.33. THD calculado en corriente, Mabe 25 booster.	51
Figura 3.34. THD medido en corriente, Indurama 1400 W.....	51
Figura 3.35. THD calculado en corriente, Indurama 1400 W.	52
Figura 3.36. THD medido en corriente, Indurama 1100 W (Boost).	52
Figura 3.37. THD calculado en corriente, Indurama 1100 W (Boost).....	52
Figura 3.38. THD medido en corriente, Indurama 1850 W (Boost).	53
Figura 3.39. THD calculado en corriente, Indurama 1850 W (Boost).....	53

Figura 3.40. TDD en corriente en relación a corriente de potencia máxima, Mabe 25 booster.	54
Figura 3.41. TDD en corriente en relación a corriente de potencia máxima, Indurama 1400 W.....	54
Figura 3.42. TDD en corriente en relación a corriente de potencia máxima, Indurama 1100 W. (Boost)	54
Figura 3.43. TDD en corriente en relación a corriente de potencia máxima, Indurama 1100 W. (Boost)	55
Figura 3.44. Potencia real y aparente de consumo, Mabe 25 booster.	55
Figura 3.45. Potencia real y aparente de consumo, Indurama 1400 W.....	56
Figura 3.46. Potencia real y aparente de consumo, Indurama 1100 W (Boost).....	56
Figura 3.47. Potencia real y aparente de consumo, Indurama 1850 W (Boost).....	56
Figura 6.1. Cocina de Inducción Mabe CMI6054SD.	73
Figura 6.2. Datos de placa de cocina MABE.....	73
Figura 6.3. Cocina de inducción Indurama EI – 4PVI60.....	74
Figura 6.4. Datos de placa de cocina Indurama.....	75

RESUMEN

El presente trabajo es un análisis de la incidencia de la incorporación de cocinas de inducción en la calidad de la energía eléctrica de un sistema de distribución, para lo cual, se ha realizado mediciones al consumo de 5 zonas de inducción presentes en cocinas de maquila nacional y, como caso de análisis, se ha utilizado la información de la Corporación Nacional de Electricidad, CNEL EP, Unidad de Negocio Guayaquil. Se destaca como resultados relevantes, que debido a que la utilización de esta tecnología aún es reducida en el Ecuador, la influencia sobre los distintos parámetros de calidad de producto y la cargabilidad del sistema es baja. Por otro lado, los resultados globales de los consumidores que se han acogido al Programa de Eficiencia en Cocción, PEC, demuestran que estos no perciben los beneficios que se esperaba al acogerse a esta tecnología, lo cual dificulta que más usuarios se incorporen a la misma.

Palabras Clave: Calidad de Energía, Cocinas de Inducción, Pérdidas técnicas, Red de distribución.

ABSTRACT

The present work is an analysis of how the incorporation of induction cooktops incidence in the power quality of the electrical distribution system, for which, measurements have been made to the consumption of 5 induction zones presents in cooktops of national manufacturing and, as a case under analysis, the information of the Corporacion Nacional de Electricidad, CNEL EP, Unidad de Negocio Guayaquil, has been used. As relevant results are highlighted, that because the use of this technology is still reduced in Ecuador, the influence on the different parameters of power quality and the system's chargeability is low. On the other hand, the overall results of consumers who have taken the Cooking Efficiency Program, PEC, show that they don't feel the expected benefits when they use this technology, which makes difficult, new users join.

Keywords: Power Quality, Induction Cooktops, Technical Losses, Distribution systems.

ANÁLISIS DE LA INCIDENCIA DE LA INCORPORACIÓN PROGRESIVA DE COCINAS DE INDUCCIÓN EN LA CALIDAD DE LA ENERGÍA DE LA RED ELÉCTRICA DE SUB-DISTRIBUCIÓN

INTRODUCCIÓN

El Estado Ecuatoriano, con el afán de cambiar la matriz energética nacional, ha apostado por la implementación de cocinas de inducción eléctrica, en reemplazo de las que funcionan por combustión de *gas licuado de petróleo, GLP*, esto debido a que el funcionamiento de las estas, representa grandes erogaciones de dinero que cubren el subsidio con el cual este combustible es beneficiario.

No obstante, la incorporación de las cocinas de inducción en el sistema de distribución eléctrico, representa el ingreso de cargas “no lineales” a dicho sistema, lo que puede generar una disminución de la calidad de la energía eléctrica y el aumento de pérdidas técnicas en el sistema de distribución.

Debido a esto, es necesario analizar el impacto que generaría el ingreso de las cocinas de inducción en la calidad, y en las pérdidas técnicas en los componentes del sistema de distribución residencial en baja tensión como en transformadores, redes secundarias y acometidas.

En este contexto, la presente investigación se enfoca en determinar el aumento de grado de distorsión armónica (THD), composición armónica de la onda, el nivel de pérdidas y riesgos que se experimentaría en la red debido a los consumos generados por las cocinas de inducción. Los resultados a obtener apuntan a establecer parámetros y condiciones que merecen tener cuidado y especial atención para mantener un sistema de distribución suficientemente robusto, que pueda admitir el notable aumento de la demanda por la entrada de dichas cargas no lineales.

Pregunta de Investigación

¿Qué aspectos son importantes a tomar en cuenta en la infraestructura del sistema de distribución eléctrico, ante el ingreso de cocinas de inducción?

Objetivo general

Analizar la incidencia de la incorporación progresiva de cocinas de inducción en la calidad de la energía eléctrica en un sistema de distribución.

Objetivos específicos

- Analizar el grado de distorsión de las curvas de onda de corriente y de voltaje en la red eléctrica de sub-distribución generadas con la inserción de cocinas de inducción.
- Simular el comportamiento de un sistema distribución eléctrica de baja tensión para determinar el grado de incidencia a nivel de transformador de distribución residencial de baja tensión ante la incorporación de las cocinas de inducción.
- Estimar las pérdidas técnicas producidas y riesgos que se presentan en líneas de alimentación y transformadores de distribución debido a la alimentación de cargas no lineales como las cocinas de inducción.

1. MARCO TEÓRICO

1.1. ¿Por qué se opta por cocinas de inducción?

Las políticas implementadas por el Estado para el cambio de la matriz energética a nivel nacional impulsan la adquisición de cocinas de inducción para uso doméstico por sus características de mayor eficiencia energética y consecuentemente, menor desperdicio energético.

1.2. Incidencia de las cocinas de inducción en el Sistema de Distribución Eléctrica

El funcionamiento de estas cocinas se logra por la oscilación de campos magnéticos a frecuencias entre 50 y 70 kHz que son inducidos directamente al recipiente, el cual es fabricado con materiales ferromagnéticos que contienen los alimentos a ser calentados, de esta manera, se reduce la radiación de calor hacia el ambiente al centrarlo en el recipiente y por ende, en los alimentos.

Para lograr esto, es necesaria la conversión estática de la energía eléctrica por medio de convertidores AC/DC y DC/AC, lo cual puede reflejarse en la red de distribución como cargas no lineales, ya que alteran la forma de onda de corriente. Esto hace que los componentes de la red de distribución cambien sus características técnicas como son: nivel de aislamiento de conductores, saturación de núcleos ferromagnéticos, temperatura de aceites dieléctricos en transformadores, etc.

Por otro lado, el Sistema Eléctrico Ecuatoriano está dividido en tres etapas definidas por su función dentro del sistema, estas son: Generación, Transmisión y Distribución.

La etapa de Distribución comprende desde la toma de energía eléctrica de la red de Transmisión, hasta el suministro de dicha energía a los usuarios finales de la misma. Esta etapa está a su vez técnicamente dividida en 6 subetapas, definidas por la Agencia de Regulación y Control de Electricidad, ARCONEL, que corresponden a:

- Líneas de subtransmisión
- Subestaciones de distribución
- Redes de primarias
- Transformadores de distribución
- Redes secundarias
- Acometidas

Debido a que las cocinas de inducción inciden directamente en el funcionamiento de acometidas, redes secundarias y lado de baja de transformadores de distribución y Sub-distribución, el desarrollo de esta investigación se enfoca a estas subetapas.

Adicionalmente, cabe resaltar que los problemas de calidad y eficiencia energética suelen ser más complejos, conforme se presentan en niveles superiores de tensión y por lo tanto su solución suele ser más costosa. De existir problemas de esta índole, es en las etapas consideradas en el presente estudio donde deben ser resueltas.

1.3. Calentamiento por inducción electromagnética

Debido a que este trabajo de investigación se centra en los efectos que las cocinas de inducción pueden presentar a la red de distribución eléctrica, se realizará primero, en este apartado un repaso breve del funcionamiento de las cocinas de inducción.

La inducción electromagnética se entiende como la transferencia de energía mediante el acoplamiento magnético entre un transmisor y un receptor, los cuales utilizan las siguientes leyes y efectos, (E. Cushicondor, 2009).

1.3.1. Transmisor, ley de Ampere

En el transmisor se aplica la ley de Ampere, que se expresa como: al hacer circular una corriente i por un conductor, se genera un campo magnético a su alrededor,

como se presenta en la Figura 1.1, cuya distribución viene dada por la Ecuación 1.1 (E. Cushicondor, 2009).

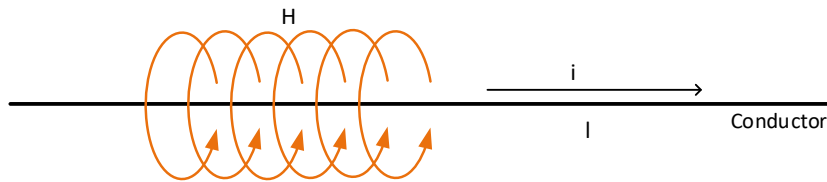


Figura 1.1. Campo magnético alrededor de una corriente eléctrica.
Fuente: (Propia)

$$N i = \oint \vec{H} \vec{dl} = Hl \quad \text{Ecuación 1.1}$$

Dónde:

- N : Número de vueltas del conductor
- i : Corriente que circula por el conductor
- l : Longitud del conductor
- H : Intensidad del campo magnético

1.3.2. Receptor, ley de Faraday

Una de las principales condiciones para poder aplicar la ley de Faraday en el receptor es que debe existir un flujo magnético que sea variable en el tiempo, eso conlleva a que el transmisor genere un campo magnético alternante, lo cual se consigue teniendo una corriente también alterna (E. Cushicondor, 2009).

La ley de Faraday describe que al tener una variación del flujo magnético en el tiempo aplicado a un conductor, este produce una fuerza contra-electromotriz, misma que se manifiesta matemáticamente según la Ecuación 1.2.

$$\varepsilon = -N \frac{d\Phi}{dt} \quad \text{Ecuación 1.2}$$

Dónde:

ε : Fuerza contra-electromotriz inducida

N : Número de vueltas del conductor

Φ : Flujo de campo magnético

1.3.2.1. Efecto Joule

Junto a la fuerza contra-electromotriz inducida, circulan corrientes en el receptor conocidas como corrientes de inducción, también conocidas como corrientes de Eddy-Foucault, corrientes circulantes o corrientes parásitas, dependiendo de la literatura y de la región. Estas corrientes son las que principalmente causan del efecto Joule, (E. Cushicondor, 2009).

El calentamiento por inducción electromagnética es gracias a las “pérdidas” que se producen por el efecto Joule en el receptor. Estas “pérdidas” se pueden expresar por medio de la Ecuación 1.3.

$$P = i^2 R \quad \text{Ecuación 1.3}$$

Dónde:

i : Corriente circulante por el conductor.

R : Resistencia del material

P : Potencia eléctrica

La Ecuación 1.3 describe a la potencia disipada en forma de calor por medio de un conductor y es igual al cuadrado de la corriente inducida (i) por la resistencia de la pieza a calentar.

Por ende, los dos parámetros para un calentamiento adecuado por inducción son la corriente en el transmisor y en el receptor, y el valor de resistencia.

1.3.2.2. Ciclo de histéresis de un material ferromagnético

Otra ventaja de los materiales ferromagnéticos y que se aprovecha para el calentamiento por inducción, es la curva de histéresis que presentan, esto se puede describir como pérdidas de potencia en el material provocado por la ventana de histéresis en el redireccionamiento de los campos magnéticos en el material a calentar. Para explicar este fenómeno de los materiales ferromagnéticos en su ciclo de histéresis se tiene la Figura 1.2.

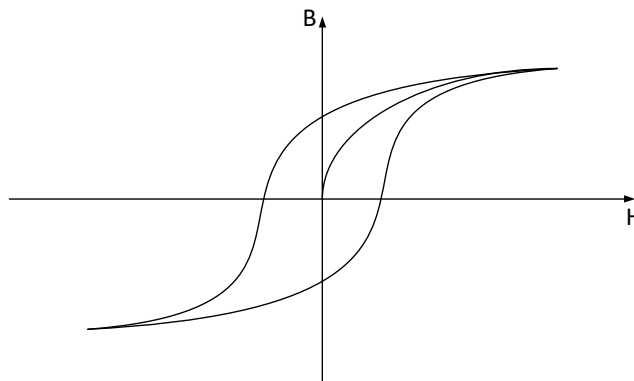


Figura 1.2. Curva de histéresis de un material ferromagnético.
Fuente: (Propia)

En la cual se puede ver que al aplicar una intensidad de campo magnético (H) cambiante en el tiempo, podemos llegar a una saturación positiva o negativa de la densidad de flujo magnético (B) en el material, provocando su magnetización, desmagnetización y cambio de sentido de dicha magnetización, lo que conlleva “pérdidas” de potencia en forma de calor del material, (E. Cushicondor, 2009), calor que para los fines de cocción es aprovechado.

1.3.3. Parámetros para el calentamiento por inducción

1.3.3.1. Efecto skin o piel

Este efecto se produce cuando por un conductor se hace circular corriente alterna a una frecuencia en orden de algunos kHz. Esta corriente tiende a circular por la superficie del conductor provocando el efecto skin o piel. Este efecto produce que la resistencia del conductor tienda a aumentar considerablemente en función de la frecuencia, por ende, al aumentar la resistencia se tiene mayores pérdidas de potencia por efecto Joule que también es bien aprovechado en el calentamiento por inducción (E. Cushicondor, 2009).

1.3.3.2. Profundidad de penetración

La profundidad de penetración de un campo magnético (H) para el calentamiento por inducción es muy importante, de modo que, se puede determinar según el tipo de material, con qué potencia se la puede calentar. La profundidad de penetración se la calcula por medio de la deducción de las ecuaciones de Maxwell, (Laborelec, 2014) y para un tipo de carga cilíndrica, se la puede calcular por la Ecuación 1.4.

$$\delta = \sqrt{\frac{\rho}{\pi f \mu_0 \mu_r}} \quad \text{Ecuación 1.4}$$

Dónde:

ρ : Resistividad del material.

μ_0 : Permeabilidad magnética en el vacío, $4\pi * 10^{-7} NA^{-2}$.

μ_r : Permeabilidad magnética relativa del material.

f : Frecuencia de trabajo.

Uno de los parámetros más importantes de los materiales que se va a utilizar para el calentamiento es la permeabilidad (μ), que es la capacidad del material de hacer pasar un campo magnético (H) a través del mismo. Los materiales ferromagnéticos cumplen con permeabilidades muy grandes, y por el contrario en el caso de los materiales diamagnéticos son de permeabilidad cercanos a uno y siendo pésimos para el calentamiento por inducción, por esta razón se debe entregar mayor potencia para calentarlos disminuyendo la eficiencia del calentamiento.

1.3.3.3. Resistencia equivalente del material

En el proceso de cocción por inducción otro parámetro que se debe tomar en cuenta para mejorar el rendimiento es la resistencia equivalente del material. De la Ecuación 1.5 que representa matemáticamente el efecto Joule se tiene que existe mayor disipación de potencia a mayor valor de resistencia del material y se la calcula por la Ecuación 1.6 para una pieza cilíndrica, (E. Cushicondor, 2009).

$$R_{eq} = K_R N^2 \rho \frac{2\pi r}{\delta l} \quad \text{Ecuación 1.5}$$

$$K_R = 1 - e^{-\frac{2r}{\delta}} \quad \text{Ecuación 1.6}$$

Dónde:

N : Número de espiras de la bobina de calentamiento

ρ : Resistividad del material

r : Radio de la pieza

l : Longitud de la pieza

δ : Profundidad de penetración del campo magnético

Mediante dichas ecuaciones se puede observar que, la resistencia del material depende de la profundidad de penetración del campo magnético. Por lo que se puede decir que un material con menor penetración de campo magnético disipará mayor potencia en forma de calor.

Otro punto a tomar en cuenta de la Ecuación 1.4 es la frecuencia del campo magnético, misma que debe ser suficientemente baja como para garantizar la orientación alterna de los flujos magnéticos y debe ser suficientemente alta, pues en la alternancia de los flujos es en los que se logra la transmisión electromagnética y aprovechar así la mayoría de calor generado en la histéresis que presenta el cambio de dichos flujos esta frecuencia suele situarse entre los 50 y 70 kHz, (E. Cushicondor, 2009).

1.3.4. Componentes de un sistema de calentamiento por inducción

Los componentes básicos de un sistema de calentamiento por inducción se describen a través de la Figura 1.3, (E. Cushicondor, 2009):

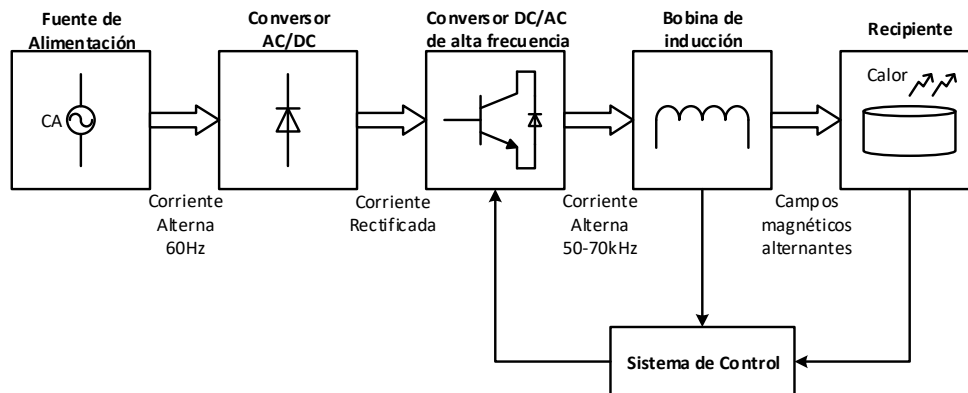


Figura 1.3. Componentes de un sistema de calentamiento por inducción.
Fuente: (E. Cushicondor, 2009)

1.3.4.1. Sistema de alimentación eléctrica

Se encarga de suministrar la energía necesaria para todo el sistema, dependiendo de la potencia y el tipo de convertor. La fuente puede ser de corriente alterna con voltajes que pueden estar en un rango determinado de 110V, 220V o mayor voltaje para aplicaciones industriales, y a una frecuencia fija de 50Hz o 60Hz de las redes de distribución.

1.3.4.2. Etapa de rectificación

Esta etapa se encarga de convertir la corriente alterna (AC) de la fuente de energía eléctrica en corriente continua (DC) mediante un arreglo de semiconductores.

1.3.4.3. Filtro de interferencia electromagnética, EMI

Previo a la etapa de rectificación, numeral 1.3.4.2, se encuentra un filtro EMI y algunas protecciones de sobre y baja tensión. Este filtro garantiza que la etapa de rectificación puedan funcionar de acuerdo con su propósito, a la vez que cumple con directivas de compatibilidad electromagnética, EMC, (International Electrotechnical Commission, IEC, 2002), que regulan el nivel de las perturbaciones que pueden generar, así como su inmunidad frente a las interferencias generadas por otros equipos, (González, 2012).

1.3.4.4. Inversor de alta frecuencia

Esta etapa toma la señal en DC de la etapa de rectificación y genera una señal de corriente alterna a la frecuencia necesaria para la alimentación del inductor de calentamiento o bobina de trabajo.

Existe una estrecha relación entre la frecuencia de operación de la corriente que genera el campo y la profundidad de penetración sobre la pieza o material. La corriente inducida que fluye sobre la pieza es más intensa en la superficie, y decae rápidamente bajo la superficie. Por ello, el exterior se calienta más rápido que el interior. Aproximadamente el 80% del calor producido en la pieza se concentra en la parte exterior. Cuanto mayor es la frecuencia de operación, menor es la profundidad de penetración, es decir, más superficial es el efecto.

1.3.4.5. Bobinas de trabajo

Son las responsables directas de la generación de campos magnéticos en las proximidades del material a calentar. La concepción geométrica del inductor está en función de la aplicación del calentamiento y su diseño.

1.3.4.6. Sistema de refrigeración

El inductor y demás componentes (condensadores, bobina, elementos de potencia, etc.) necesitan disipar grandes potencias de pérdidas. El elemento refrigerante utilizado en la mayoría de las aplicaciones suele ser agua aunque, en cocinas, basta con utilizar ventiladores.

1.3.4.7. Sistema de control

Se encarga de regular el sistema de calentamiento por inducción, a través de la alimentación a las bobinas de trabajo y su ciclo de operación, así como también, la entrada y salida del sistema de refrigeración.

1.3.4.8. Carga o elemento a calentar

Los materiales magnéticos, particularmente los ferromagnéticos, se calientan más fácilmente que los no-ferromagnéticos.

Un aspecto a tener en cuenta en relación a la pieza a calentar es la distancia entre el inductor que genera los campos magnéticos y el material a calentar, cuanto más pequeña sea esta distancia, mayor será la corriente inducida sobre el material y por esta razón la cantidad de calor es mayor.

1.4. Cocinas de inducción en el mercado nacional

Dada la promoción de este sistema de cocción en el país, las casas comerciales y fabricantes se han tornado alrededor de esta iniciativa, encontrando cocinas de marcas como: Indurama, Mabe, Ecasa, entre otras, y como ejemplo se muestran en la Figura 1.4.



Figura 1.4. Cocinas de inducción.
Fuente: (Indurama, 2018) y (Mabe, 2018)

1.4.1. Datos de placa

Mediante la Figura 1.5, se presenta un modelo de datos de placa de una cocina disponible en el mercado nacional



Figura 1.5. Dato de Placa de Cocina de Inducción.
Fuente: (Cocina MABE)

Donde se presentan las siguientes características:

Dimensiones físicas: 58 x 50.5 cm

Nivel de tensión: 220VAC

Potencia eléctrica: 7200W

Intensidad: 32.73A

Frecuencia: 50 / 60 Hz

Como se puede observar, no se muestra datos técnicos específicos del equipo a utilizar, como: potencia de salida, frecuencia de magnetización de inductores, factor de potencia, normas nacionales o internacionales que avalen su construcción, etc.

Además, no se expone datos que garanticen el equipo, como: firma de garantía a nivel nacional o tiempo de garantía exigido por organismos nacionales, a pesar que dichos requisitos sí debe cumplir el equipo para poder comercializarlo

1.5. Calidad de energía eléctrica

El avance de la electrónica de potencia está permitiendo la construcción de equipos con mejor aprovechamiento de energía, pero que consumen corrientes cuya forma de onda resulta ser no sinusoidal. Estas corrientes no sinusoidales o con corrientes

armónicas tienen grandes consecuencias para el funcionamiento de los sistemas eléctricos de potencia, incrementando las pérdidas, destruyendo equipos con baja inmunidad, variando la tensión e incluso provocando resonancia eléctrica en las redes.

La calidad de energía eléctrica, referida comúnmente como *Power Quality*, *PQ* por las siglas en inglés, se la puede definir como: mantener la señal de alimentación eléctrica con una forma de onda sinusoidal de amplitud de onda y frecuencia constantes, como se muestra en la Figura 1.6, (Hernández, 2011)

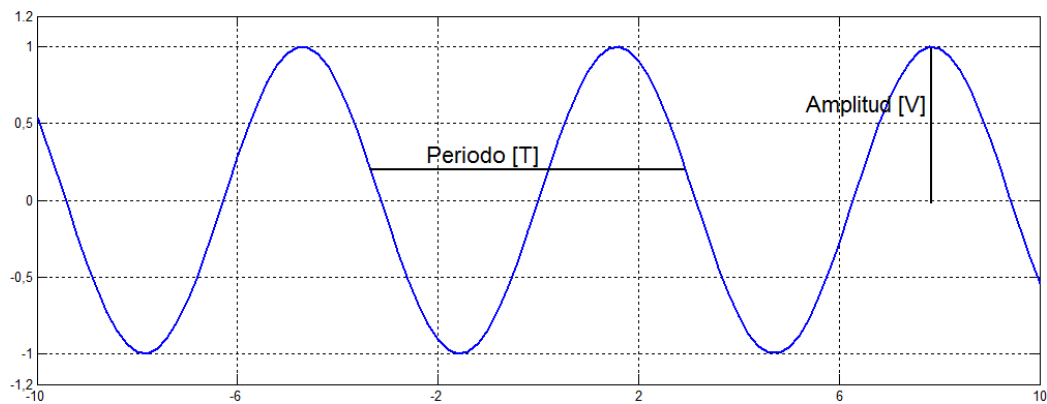


Figura 1.6. Onda Sinusoidal.
Fuente: (Propia)

A continuación, se detallan las definiciones, que en su mayoría constan en la Regulación Nro. CONELEC 004/01, mismas que constituyen un estándar en el sector eléctrico nacional. Los términos que no se encuentran definidos en forma expresa en la regulación, tienen el mismo significado que los establecidos en los demás reglamentos y regulaciones vigentes, (Consejo Nacional de Electricidad, CONELEC, 2001).

Armónicas: Son ondas sinusoidales de frecuencia igual a un múltiplo entero de la frecuencia fundamental de 60 Hz.

Barras de salida: Corresponde a las barras de Alto Voltaje en las subestaciones de elevación y a las barras de Bajo Voltaje de subestaciones de reducción.

Centro de transformación: Constituye el conjunto de elementos de transformación, protección y seccionamiento utilizados para la distribución de energía eléctrica.

Factor de potencia: Es la relación entre la potencia activa y la potencia aparente.

Fluctuaciones de Voltaje: Son perturbaciones en las cuales el valor eficaz del voltaje de suministro cambia con respecto al valor nominal.

Frecuencia de las interrupciones: Es el número de veces, en un periodo determinado, que se interrumpe el suministro a un consumidor.

Interrupción: Es el corte parcial o total del suministro de electricidad a los consumidores del área de concesión del distribuidor.

Niveles de voltaje: Se refiere a los niveles de alto voltaje (AV), medio voltaje (MV) y bajo voltaje (BV) definidos en el reglamento de suministro del servicio.

Periodo de medición: A efectos del control de la *Calidad del Producto*, se entenderá al lapso en el que se efectuarán las mediciones de nivel de voltaje, perturbaciones y factor de potencia, mismo que será de siete (7) días continuos.

Perturbación rápida de voltaje (flicker): Es aquel fenómeno en el cual el voltaje cambia en una amplitud moderada, generalmente menos del 10% del voltaje nominal, pero que pueden repetirse varias veces por segundo. Este fenómeno conocido como efecto "Flicker" (parpadeo) causa una fluctuación en la luminosidad de las lámparas a una frecuencia detectable por el ojo humano.

Voltaje armónico: Es un voltaje sinusoidal de frecuencia igual a un múltiplo entero de la frecuencia fundamental de 60 Hz del voltaje de suministro.

Voltaje nominal (Vn): Es el valor del voltaje utilizado para identificar el voltaje de referencia de una red eléctrica.

Voltaje de suministro (Vs): Es el valor del voltaje del servicio que el Distribuidor suministra en el punto de entrega al consumidor en un instante dado.

Definiciones de perturbaciones electromagnéticas no consideradas en la Normativa CONELEC 004/01:

Huecos y cortes de tensión: Disminución temporal e interrupciones totales de la tensión, son clasificadas según su profundidad y duración

Sobretensiones: incremento de la amplitud de la onda de tensión por encima de los valores nominales, se las clasifica según la duración y origen de la misma.

Transitorios: constituyen cambios muy rápidos que ocurren en señales de voltaje y de corriente, pueden ser impulsivos u oscilatorios, dependiendo de su origen.

Muestras: perturbaciones periódicas de tensión que ocurren en cada ciclo debido al cortocircuito entre fases durante el proceso de rectificación de rectificadores.

Desbalances de tensión: Es la pérdida de simetría entre las señales de tensión de fases en un sistema trifásico.

Variación de la frecuencia: considerando que la distribución de energía eléctrica en el Ecuador se da a 60Hz, su variación puede ser ocasionada fundamentalmente por el desbalance entre la capacidad de generación del sistema y la demanda de la carga.

1.5.1. Ambiente electromagnético

Es el conjunto de fenómenos electromagnéticos existentes en una ubicación dada. Los ambientes electromagnéticos no son estáticos, cambian con el tiempo y la ubicación, (Hernández, 2011), por ejemplo, los motores eléctricos en zonas sub tropicales debido a las elevadas temperaturas y humedad, son más vulnerables a sobrecargas y toleran menor contaminación en la tensión que en otras partes del Ecuador.

A continuación se enumeran algunos conceptos comprendidos en un ambiente electromagnético.

Interferencia electromagnética: Degradación del funcionamiento de un dispositivo, equipos, sistema o cosa en general debido a una o varias perturbaciones electromagnéticas.

Compatibilidad electromagnética: Es la capacidad, de un equipo o sistema, de funcionar correctamente en un ambiente electromagnético, sin introducir ni afectarse sensiblemente por perturbaciones electromagnéticas existentes en el ambiente.

Inmunidad a las perturbaciones: Capacidad, de los dispositivos, equipos o sistemas, de operar adecuadamente sin que se afecte su funcionamiento con la presencia de perturbaciones.

Susceptibilidad electromagnética: Incapacidad de los dispositivos, equipos o sistemas, de operar adecuadamente con la presencia de perturbaciones.

Límite de emisión: Máximo nivel permitido para una emisión dada

Nivel de inmunidad: Es el máximo nivel de inmunidad que presenta un dispositivo, equipo o sistema a una perturbación sin que se afecte su funcionamiento.

Límite de inmunidad: Máximo nivel de inmunidad requerida para un ambiente electromagnético.

2. ASPECTOS METODOLÓGICOS

2.1. Mediciones y recopilación de datos técnicos

En el presente trabajo de investigación se ha realizado mediciones de las formas de onda de voltaje y corriente que se experimentan en cocinas de inducción comerciales, además se ha recopilado resultados de investigaciones previas y datos catastrales de la CNEL EP Unidad de Negocio Guayaquil, así como también su información reportada a la ARCONEL mediante los formularios de Calidad, Infraestructura y Transacciones, del Sistema de Datos del Sector Eléctrico, SISDAT, (Agencia de Regulación de Electricidad, ARCONEL, 2018).

El Objetivo de estas mediciones es caracterizar la forma de consumo de energía y analizar la calidad de la misma, para posteriormente, evaluar el nivel de incidencia que tiene sobre los componentes de las subetapas de distribución en las cuales tiene incidencia directa, es decir el “Sistema eléctrico” numeral 2.2, sobre el cual se desarrolla esta investigación.

2.2. Definición del “Sistema eléctrico”

Como se expuso en el numeral 1.2, las subetapas de la etapa de distribución del Sistema Eléctrico Nacional a ser consideradas son: Transformadores de Distribución, Redes secundarias y Acometidas; junto a estas se debe considerar a las acometidas internas, que si bien, no forman parte de la infraestructura de las Empresas de Distribución, son necesarias para llegar a la carga que consume dicha energía, definiendo y delimitando así, al que en adelante se hará referencia como “Sistema Eléctrico”, dentro del cual se desarrolla el presente análisis.

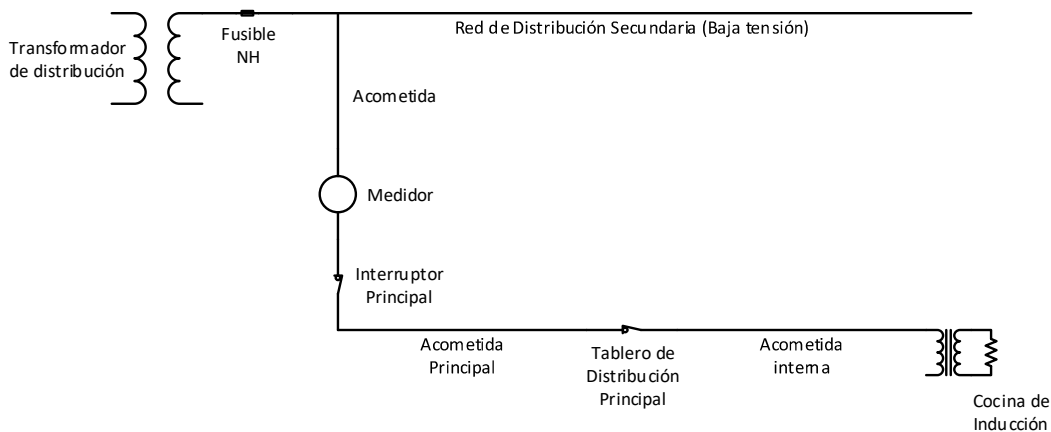


Figura 2.1. Sistema Eléctrico
Fuente: (Propia)

2.3. Periodo de muestreo y tamaño de la muestra

Se realizó la medición de los parámetros técnicos del consumo que presenta cada zona de inducción eléctrica de cocción, *zona de cocción*, es decir, manteniendo una señal de voltaje sinusoidal en la red de alimentación, se verificó el comportamiento de la corriente y potencia eléctrica a los distintos niveles que el sistema de control de la cocina lo permite.

Se evitó etapas transitorias al momento de cambiar el nivel de potencia aplicado en la zona de cocción, tomando en cuenta solo las condiciones estables en los distintos niveles, al igual que se evitó saturar las condiciones de temperatura del elemento a calentar, debido a que por seguridad, la potencia podría limitarse y generar situaciones fuera de un estado estable.

Para esto se recurrió a la norma IEC-61000-4-30 que indica cuatro ventanas o intervalos de observación estándar, en general, con estadísticos con 95% de probabilidad de repetitividad (Balcells, 2001), los cuales son:

- Ventana base de observación de 200 ms (10 ciclos para 50 Hz y 12 ciclos para 60 Hz)
- Intervalos muy cortos: Promedios de 3 segundos, observando todos los ciclos
- Intervalos cortos: Promedios y estadísticos 10 minutos
- Intervalos largos: Promedios y estadísticos 10 minutos

Con base en estas recomendaciones, en cada zona de cocción se ha tomado un tiempo de 3 minutos y un periodo de muestreo de 3 segundos en cada nivel de potencia, esto representa 60 muestras, de las cuales, se ha eliminado las 10 primeras y las 10 últimas para evitar efectos transitorios, lo que entrega finalmente, 40 muestras por nivel de potencia. Un ejemplo de este muestreo y tamaño de la muestra se presenta mediante la Figura 2.2:

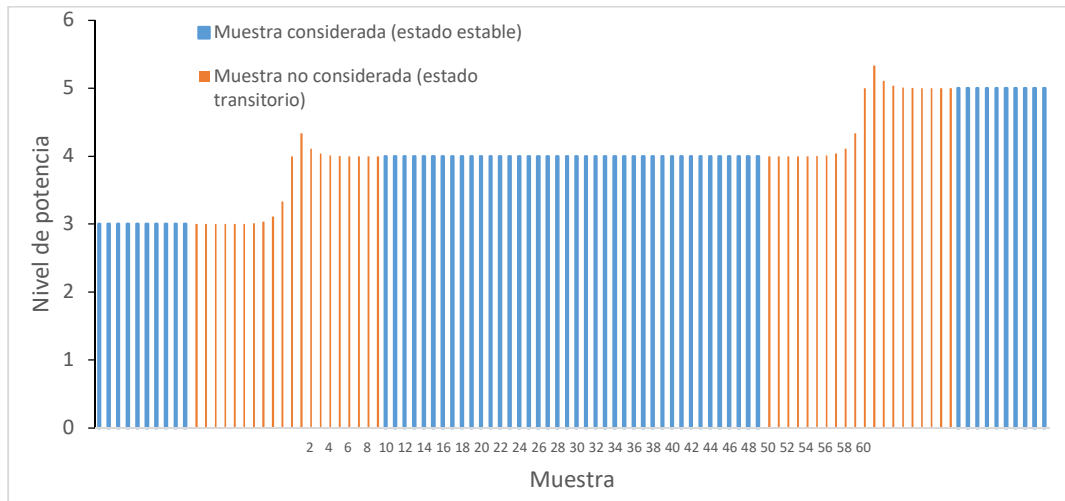


Figura 2.2. Tamaño de la muestra analizada por nivel de potencia.
Fuente: (Propia)

A partir de estas 40 muestras de cada nivel de potencia, se ha escogido 10 de forma aleatoria, con la finalidad de poder ubicar en un mismo gráfico el comportamiento de los parámetros analizados en todos los niveles de potencia. A continuación se presenta un modelo del gráfico construido, Figura 2.3.

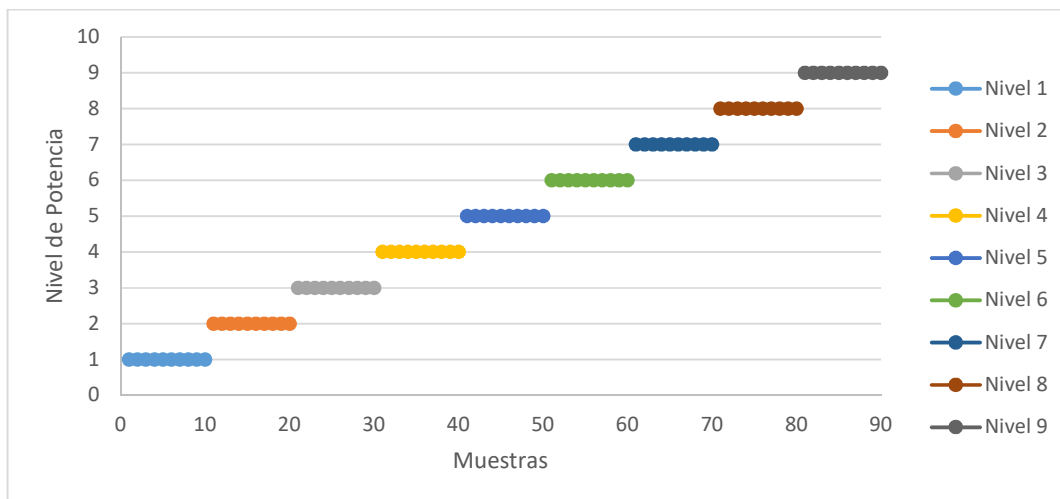


Figura 2.3. Ejemplo de gráfico de parámetro de una zona de cocción en todos sus niveles de potencia.
Fuente: (Propia)

2.4. Determinación de parámetros técnicos

El enfoque principal de este estudio es la calidad de la forma de onda tanto de voltaje como de corriente y su repercusión en el sistema eléctrico definido en el numeral 2.2, por lo que se han analizado los siguientes parámetros que muestran el comportamiento eléctrico de las zonas de inducción:

- Relación de operación
- Valor eficaz de voltaje
- Valor eficaz de corriente
- Valor corriente fundamental
- Componentes armónicas de corriente
- Distorsión armónica total en corriente
- Distorsión de demanda total
- Potencia activa
- Potencia aparente
- Factor de potencia

2.5. Determinación de indicadores

Para determinar pérdidas, consumos, potencias, y demás información, se ha realizado un estudio con base en la información catastral de la CNEL EP Unidad de

Negocio Guayaquil, así como la información que esta distribuidora reporta a la ARCONEL, a través de los formularios de Calidad, Infraestructura y Transacciones del SISDAT, (Agencia de Regulación de Electricidad, ARCONEL, 2018), dichos formularios son:

- Formulario INF-040, Redes de media tensión, a mayo 2018
- Formulario INF-040, Redes de media tensión, a mayo 2018
- Formulario INF-060 Redes secundarias, a mayo 2018
- Formulario INF-070 Acometidas, a mayo 2018
- Formularios TRA-040 Balance de energía, a mayo de 2018
- Formulario TRA-060 Pérdidas a mayo de 2018
- Formulario TRA-130 Facturación de clientes regulados a mayo de 2018
- Catastro de usuarios de la Unidad de Negocio a mayo de 2018

A partir de la información de la distribuidora a nivel macro, se ha establecido indicadores particulares que se hallan dentro del Programa de Cocción Eficiente, PEC.

Sin embargo, las empresas distribuidoras no realizan mediciones puntuales del consumo de las cocinas de inducción, de hecho, solo registran la energía incremental que un usuario presenta tras haber aplicado al programa de cocción eficiente y con base en ello, se calcula el subsidio al que es acreedor, por lo que si él varía sus patrones de consumo por causas ajenas a la cocción, estas variaciones alteran el beneficio esperado.

Por dicha razón, en este estudio ha sido necesario depurar el universo de usuarios, aplicando los siguientes criterios:

- Se han considerado usuarios que hayan ingresado al programa antes de mayo de 2016

- Los usuarios deberán presentar incrementos de consumo en tres años, 2016, 2017 y 2018, con respecto al consumo base¹ determinado al momento de entrar al beneficio PEC
- No se considera usuarios que en uno de los años haya tenido un decremento en su consumo
- Se descartan usuarios cuya información presente observaciones en el catastro de la distribuidora, por ejemplo:
 - o Información duplicada o incompleta del usuario
 - o Consumo base con variaciones entre los tres años
 - o Consumo base cero

De esta manera, de los 106.984 usuarios beneficiarios de la tarifa PEC, se ha establecido un conjunto de 17.141, cuyo incremento de consumo se vincularía al uso de las cocinas de inducción. Con base en dicho conjunto, se ha caracterizado al consumidor promedio del programa PEC. Las Figura 2.4 y Figura 2.5 presentan el comportamiento de este conjunto de usuarios.

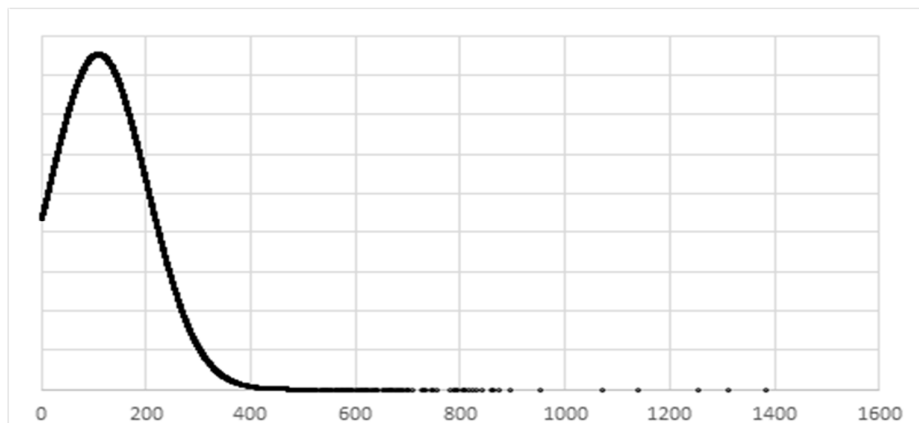


Figura 2.4. Distribución Gaussiana de los incrementos de consumo experimentados por los usuarios con tarifa PEC.

Fuente: (Propia)

La Figura 2.4, muestra que los 17.141 usuarios PEC, en promedio han incrementado su consumo en 109,26 kWh por mes, este promedio presenta una

¹ **Consumo base**, se refiere al consumo promedio de los últimos meses, mediante los cuales se determina el la energía que el usuario ha consumido antes de incorporar el uso de la cocina de inducción.

desviación estándar de $\pm 93,53\text{kWh}$. Al mismo tiempo, mediante la Figura 2.5, se muestra que dicho consumo incremental, en los años 2016, 2017 y 2018, presentan un 41,30% de estabilidad con una desviación estándar de 23,83%.

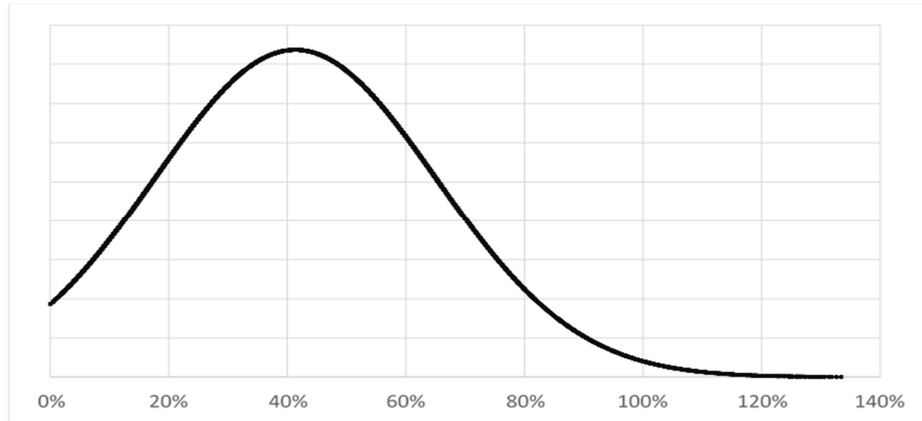


Figura 2.5. Distribución Gaussiana de la estabilidad de los incrementos de consumo experimentados por los usuarios con tarifa PEC entre los años 2016, 2017 y 2018.
Fuente: (Propia)

2.6. Determinación de pérdidas

Como se indicó en la definición del “sistema eléctrico”, los componentes en los que se pueden presentar pérdidas de energía son transformadores y conductores, por esta razón, a continuación se describen los métodos aplicados.

2.6.1. Pérdidas en transformadores, factor K

El procedimiento para el cálculo del factor K está basado en la Norma ANSI/IEEE C57.110-1986, que proporciona un método para calcular el calentamiento adicional o la pérdida en vatios que puede ocurrir en un transformador, cuando alimenta a una carga que genera un nivel específico de distorsión armónica (Enríquez, 1999).

Básicamente, cada valor de corriente $I_h(\text{pu})$ corresponde a cada orden armónico, este se eleva al cuadrado y se multiplica por el cuadrado de la armónica (h^2), por lo tanto, se obtiene:

$$\text{Relación de incremento de pérdidas} = I_h^2(\text{pu}) * h^2 \quad \text{Ecuación 2.1}$$

Se realiza este cálculo para cada orden presente en el sistema y se suma, obteniendo así, el *factor k*.

$$k = \sum_{i=1}^n I h_i^2 (pu) * h_i^2 \quad \text{Ecuación 2.2}$$

Cabe resaltar que el impacto de la distorsión armónica se relaciona con la cargabilidad que presenta un transformador, es decir, una carga contaminante generaría mayor nivel de pérdidas si su corriente fuese más cercana a la corriente nominal del transformador, por el contrario, si la carga contaminante fuese pequeña, puede no representar mayor calentamiento al transformador, pues su incidencia también sería menor.

2.6.2. Pérdidas en conductores

El método para determinar las pérdidas en conductores, se aplica tanto a acometidas como en redes de distribución secundaria y básicamente es la aplicación de la *Ley de Ohm*, Ecuación 2.3, para determinar las pérdidas adicionales producidas por la circulación de corrientes distorsionadas.

$$Z = \frac{V}{I} \quad \text{Ecuación 2.3}$$

Donde:

Z: Impedancia

I: Corriente

V: Voltaje

Cabe considerar que las pérdidas de energía se dan exclusivamente por la componente resistiva de la impedancia, por lo que la potencia de pérdidas se expresa de la siguiente manera:

$$P = I^2 R \quad \text{Ecuación 2.4}$$

Donde:

P: Potencia

R : Resistencia

I : Corriente

Para determinar la totalidad de las pérdidas producidas, es necesario realizar la sumatoria de las pérdidas ocasionadas en cada orden de armónicos, Ecuación 2.5.

$$P = \sum_{i=1}^n I_i^2 * R \quad \text{Ecuación 2.5}$$

2.6.3. Caída de tensión y distorsión armónica en voltaje

La responsabilidad de la Empresa Distribuidora es garantizar la forma de onda de voltaje, puesto que la forma de corriente de consumo la determina el usuario, quien controla o administra las cargas que conecta a la red. El uso de cocinas de inducción o cargas no lineales, altera directamente la forma de onda de corriente, lo cual en menor medida, se observa como una alteración a la forma de onda de voltaje, esta contaminación puede determinarse por la variación de voltaje que genera el paso de las corrientes armónicas i_k , a través de un conductor, lo cual se determina también por la *ley de Ohm*.

$$v_k = z_k * i_k \quad \text{Ecuación 2.3}$$

Donde

\vec{v} : Voltaje

\vec{z} : Impedancia

\vec{i} : Corriente

k : Orden de armónico

Cabe resaltar que la impedancia definida por el fabricante se establece a una frecuencia de 60 Hz, pero en esta expresión debe considerarse la impedancia inductiva del conductor X_l la cual varía con la frecuencia. Por lo que se procede de la siguiente manera:

$$Z_1 = Z_{60hz} = R + jX_{l1} \quad \text{Características definidas por el material}$$

del conductor y el fabricante

Donde:

X_l : Impedancia inductiva

$$X_{l_k} = 2 \pi f_k L \quad \text{Ecuación 2.6}$$

Es decir:

$$X_{l_1} = 2 \pi (60\text{hz}) L$$

$$L = \frac{X_{l_1}}{2 \pi (60\text{hz})} \quad \text{Ecuación 2.7}$$

Remplazando (Ecuación 2.7) en (Ecuación 2.6):

$$X_{l_k} = \frac{f_k}{(60\text{hz})} X_{l_1} \quad \text{Ecuación 2.8}$$

Finalmente se determina la distorsión armónica total en voltaje, THD_V , definida por la siguiente expresión:

$$THD_V = \frac{\sqrt{\sum_{i=2}^n v_i^2}}{v_1} \quad \text{Ecuación 2.9}$$

Donde

v_i : Variaciones de voltaje a distinto orden de frecuencia armónica

v_i : Voltaje nominal de la red

3. RESULTADOS

3.1. Mediciones en cocinas de inducción

Las mediciones de los parámetros mencionados se han realizado en cocinas de inducción cuya maquila es nacional, como son las marcas Mabe e Indurama, de las cuales se ha registrado 5 zonas de cocción, presentes en dichas cocinas, en algunos modelos que las marcas comercializan, estas zonas de cocción se enumeran a continuación.

Tabla 3.1. Marcas y modelos de zonas de inducción de cocinas de maquila nacional.

ITEM	Marca	Modelo
1	Mabe	16 booster
2	Mabe	25 booster
3	Indurama	16
4	Indurama	16 boost
5	Indurama	25 boost

Fuente: (Indurama, 2018) y (Mabe, 2018)

3.1.1. Cocina de inducción Mabe

Las mediciones de calidad de energía se han realizado en la cocina de inducción Mabe CMI6054SD, que tiene una potencia nominal de 3500 W, Figura 3.1, y una máxima de 4000 W al activar el amplificador de potencia “Booster”, el cual puede ser activado por un máximo de 10 minutos. Tiene cuatro zonas inductivas, tres de 16 centímetros de diámetro y una potencia de 1200 W (1500 W booster) y una de 25 centímetros de diámetro y una potencia de 1600 W (2200 W booster), (Mabe, 2018).

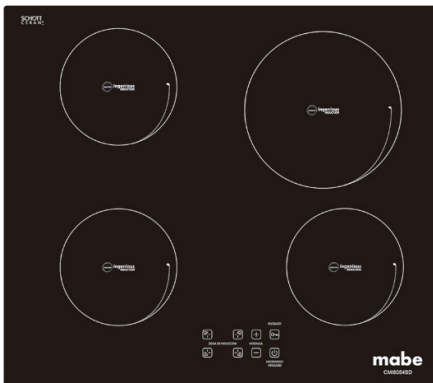


Figura 3.1. Cocina de Inducción Mabe CMI6054SD.

Fuente: (Mabe, 2018)

Otros modelos de cocinas de la misma marca se presentan zonas de igual potencia, variando solamente el número de zonas de inducción y la potencia total de la cocina, llegando a ser hasta de 7200 W.

3.1.2. Cocina de inducción Indurama

La segunda cocina de inducción utilizada es la Indurama EI – 4PVI60, Figura 3.2, misma que tiene una potencia nominal de 6300 W al activar el amplificador de potencia “Booster”, el cual puede actuar por un máximo de 10 minutos. Tiene cuatro zonas de cocción: una de 16 centímetros de diámetro y una potencia de 1100 W (1400 W booster), dos de 16 centímetros de diámetro y 1400 W de potencia y una de 25 centímetros de diámetro y una potencia de 1850 W (2100 W booster), (Indurama, 2018).



Figura 3.2. Cocina de inducción Indurama EI – 4PVI60.
Fuente: (Indurama, 2018)

Al igual que Mabe, Indurama presenta zonas de cocción de igual potencia en otros modelos de sus cocinas, variando solamente el número de zonas de cocción y la potencia total.

3.2. Formas de onda de parámetros de energía y electricidad

3.2.1. Zona de cocción Mabe 16 booster

A continuación se presenta el comportamiento registrado en la alimentación de energía de la cocina de inducción Mabe, al funcionar la zona de cocción *16 booster* en condiciones estables.

3.2.1.1. Ciclo de operación

La potencia utilizada para generar el campo magnético varía según el nivel seleccionado, mismo que establece un ciclo de operación o modo de servicio, que en el caso de las cocinas de inducción se define en la norma UNE 20-113-73, en el ciclo de operación S3: *Ciclos formados por un periodo con carga constante y otro de reposo, lo suficientemente cortos para que la máquina no alcance el equilibrio térmico* (Puche, 2012).

Mediante la Figura 3.3, se presentan la relación de operación porcentual en un modo de servicio S3, con un periodo de 5 segundos, dicha relación no es un valor fijo, puesto que el controlador puede variar el ciclo de operación en función de la temperatura y la potencia total de la cocina de inducción.

Cabe destacar que, en los niveles superiores cuyo ciclo de operación es del 100%, la potencia continúa incrementándose mediante una mayor amplitud de onda de corriente.

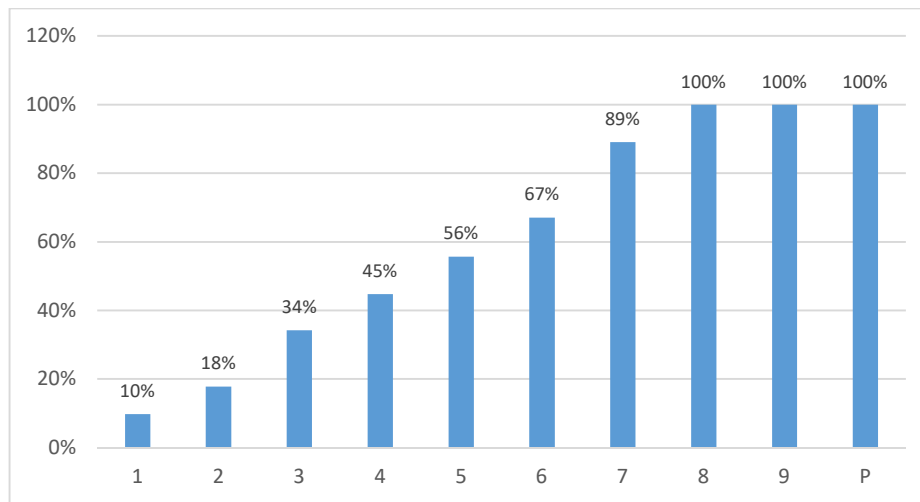


Figura 3.3. Ciclo de Operación, Mabe 16 booster.
Fuente: (Propia)

3.2.1.2. Valor eficaz de voltaje

Mediante la Figura 3.4, se muestra la variación del voltaje de alimentación, como se puede observar, la banda de variación alcanza un máximo 0,53%, por encima y

por debajo de una medición promedio, por lo que incluso, no presentaría una incidencia en la generación de flickers PST.

También se puede observar que en los niveles de potencia más altos (7, 8, 9 y P), la banda de fluctuación del voltaje incluso se reduce a un 0,07% y a su vez su valor promedio disminuye 0,7 V en relación al incremento de la potencia, esto se debe a que el voltaje de alimentación depende más de la carga de la cocina y es menos influenciada por las cargas externas.

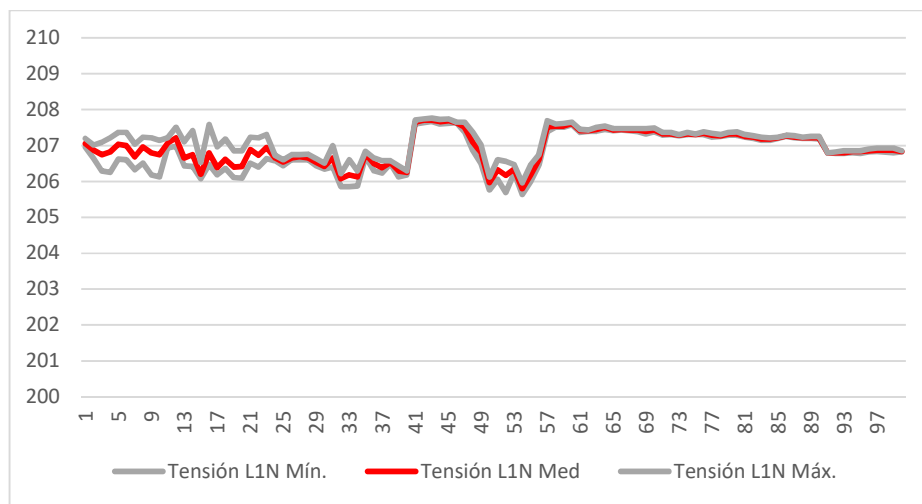


Figura 3.4. Voltaje de Alimentación, Mabe 16 booster
Fuente: (Propia)

3.2.1.3. Valor eficaz de corriente

En la Figura 3.5, se muestra la corriente máxima que alcanza, la cual, entre los niveles 1 y 7, fluctúa debido a los tiempos de reposo del modo de operación, entre 0 y 3,46 A, sin embargo, entre los niveles 1 y 3, la corriente no siempre alcanzó dicho valor en el periodo de muestreo, por lo que se presentan fracciones de dicha corriente, mientras que en los niveles 4, 5 y 6, se registró claramente que la corriente alcanzó los 3,46 A.

En esta medición el nivel 7 presentó una relación de operación de 100% con una corriente permanente de 3,46 A. mientras que en los niveles superiores 8, 9 y P, el ciclo de operación se mantuvo en un 100% y se incrementó la intensidad de la corriente a 3,93 A, 4,59 A y 6,17 A, respectivamente.

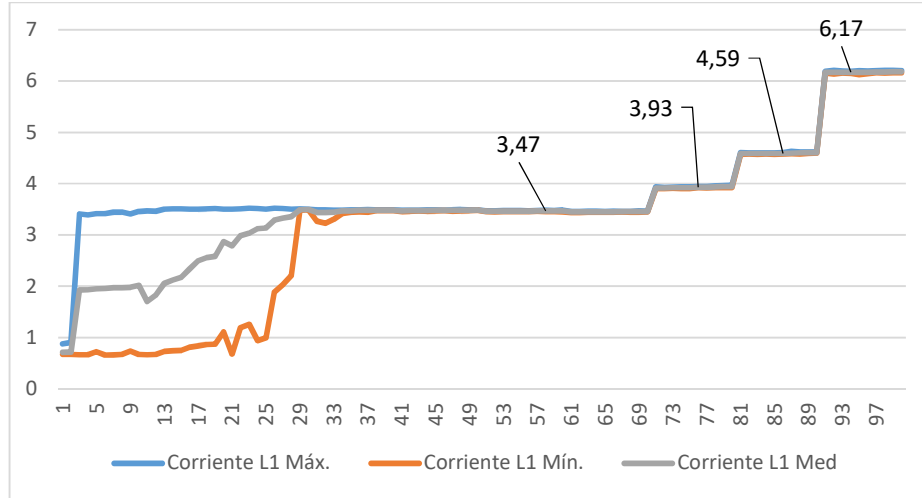


Figura 3.5. Corriente de alimentación, Mabe 16 booster.
Fuente: (Propia)

3.2.1.4. Valor eficaz de corriente fundamental

En el numeral anterior se analizó el valor RMS de la corriente de alimentación, sin embargo, la potencia real es generada por la corriente fundamental, por lo cual, en la Figura 3.6, se presenta el porcentaje de dicha corriente fundamental en relación a la corriente RMS. Esta relación se incrementa desde un 99,5% en el nivel 1, hasta un 99,88% en el nivel P.

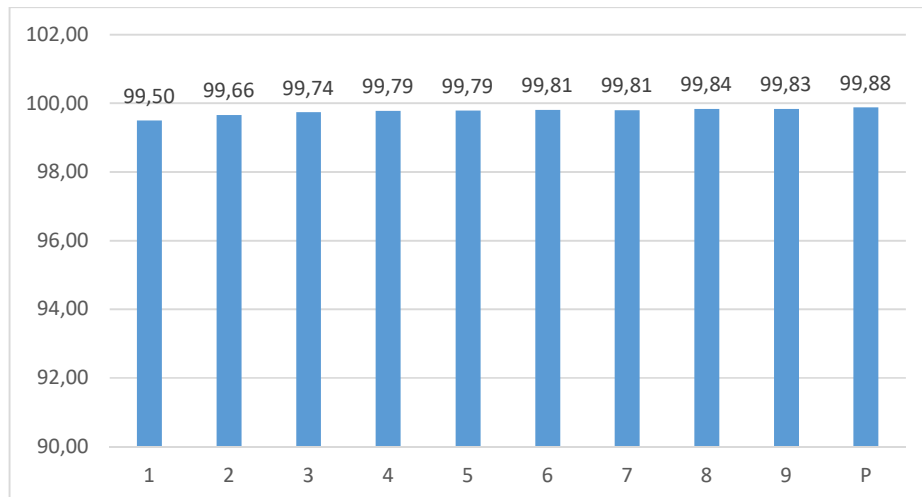
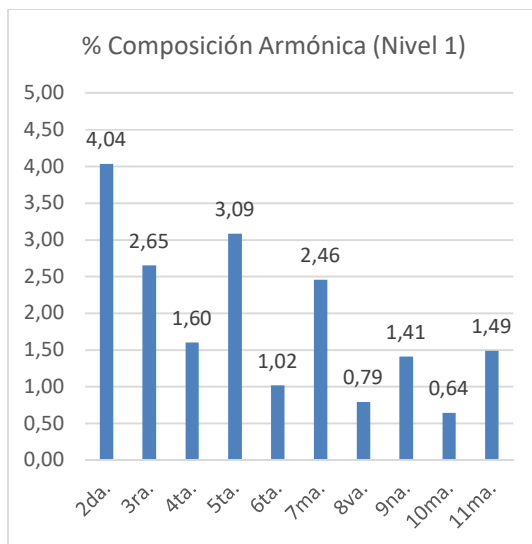


Figura 3.6. Componente fundamental a distintos niveles de potencia (%), Mabe 16 booster.
Fuente: (Propia)

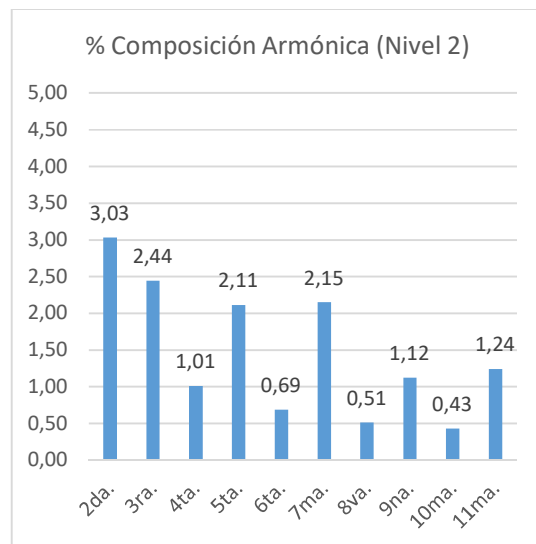
3.2.1.5. Componentes armónicas de corriente

De forma complementaria al análisis anterior, a continuación se presenta las componentes armónicas de menor orden, por lo tanto, de mayor incidencia en la corriente de alimentación a la zona de cocción. Este análisis se lo ha realizado para cada uno de los niveles de potencia, encontrando lo siguientes hallazgos:

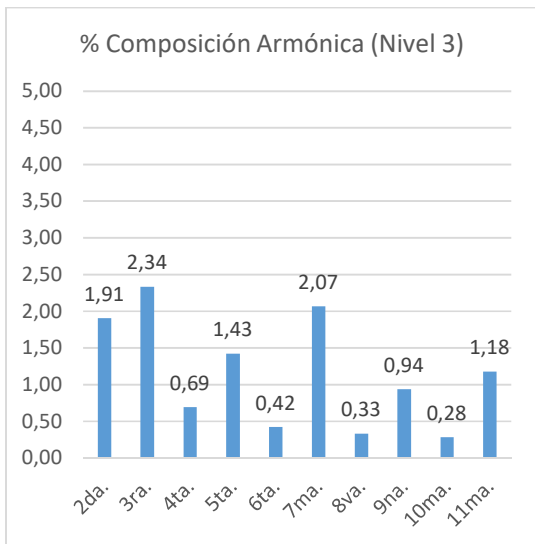
- Las componentes armónicas, como era de esperarse, se mantienen en valores bajos que a la postre, no generan una contaminación armónica fuera de los rangos permitidos por la normativa vigente.
- Los armónicos pares siempre son decrecientes en función de que su orden se incrementa, e incluso decrecen en función de nivel de potencia
- El tercer armónico es el único que presenta incrementos en función del nivel de potencia, pasando desde 2,65% en el nivel 1, hasta 3,49% en el nivel P, sin embargo, no excede los valores permitidos por la regulación vigente.
- Los armónicos de orden par siempre son menores a los armónicos de orden impar consecutivos, a excepción de lo registrado en los armónicos de segundo orden en los niveles de potencia 1 y 2, esto resulta importante, pues dichos armónicos representan fuerzas electromotrices de torque negativo.



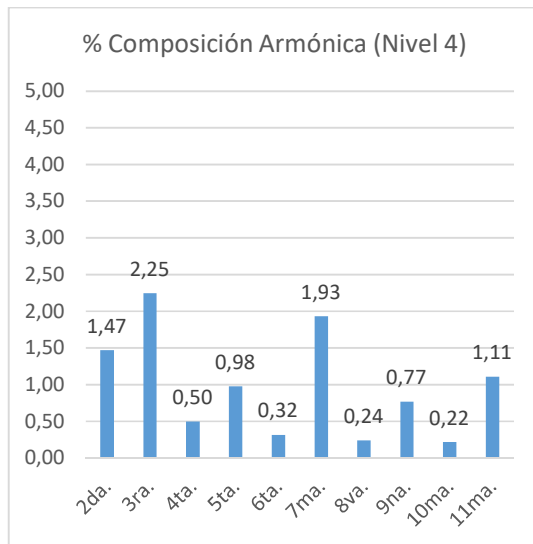
(a)



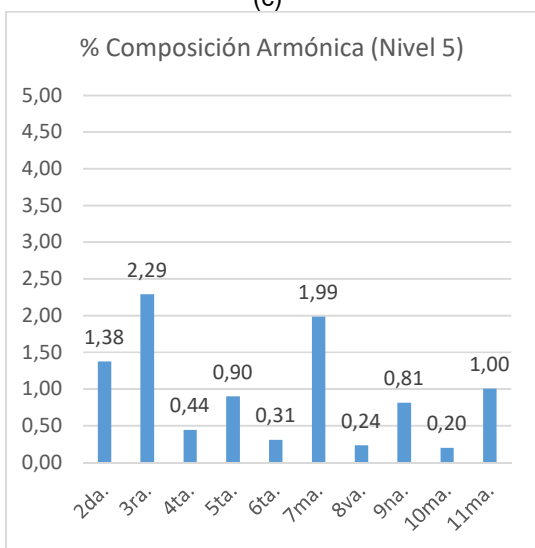
(b)



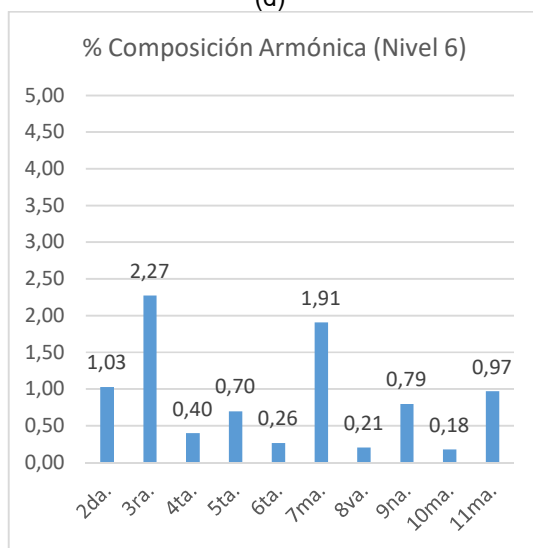
(c)



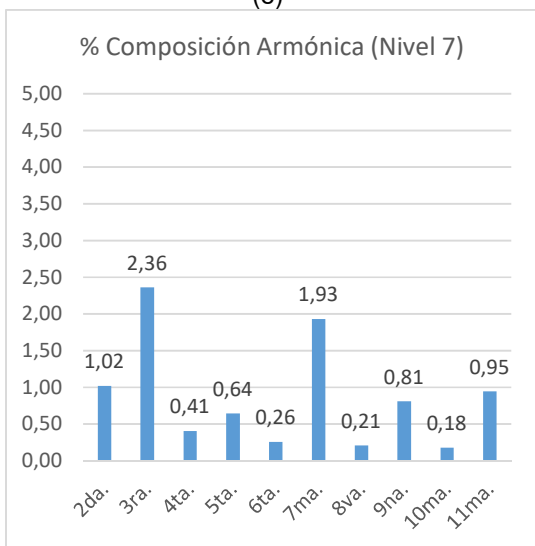
(d)



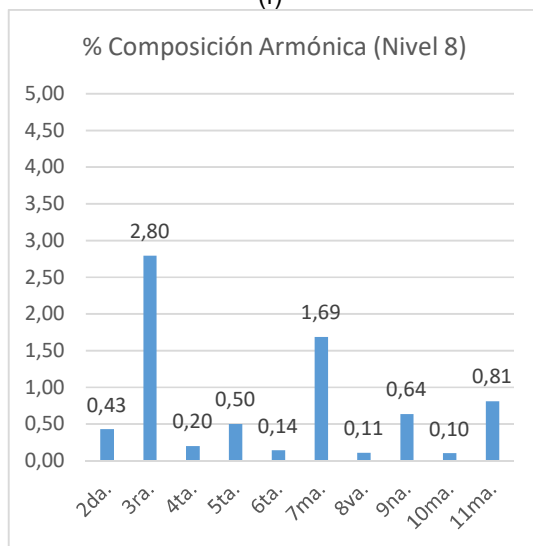
(e)



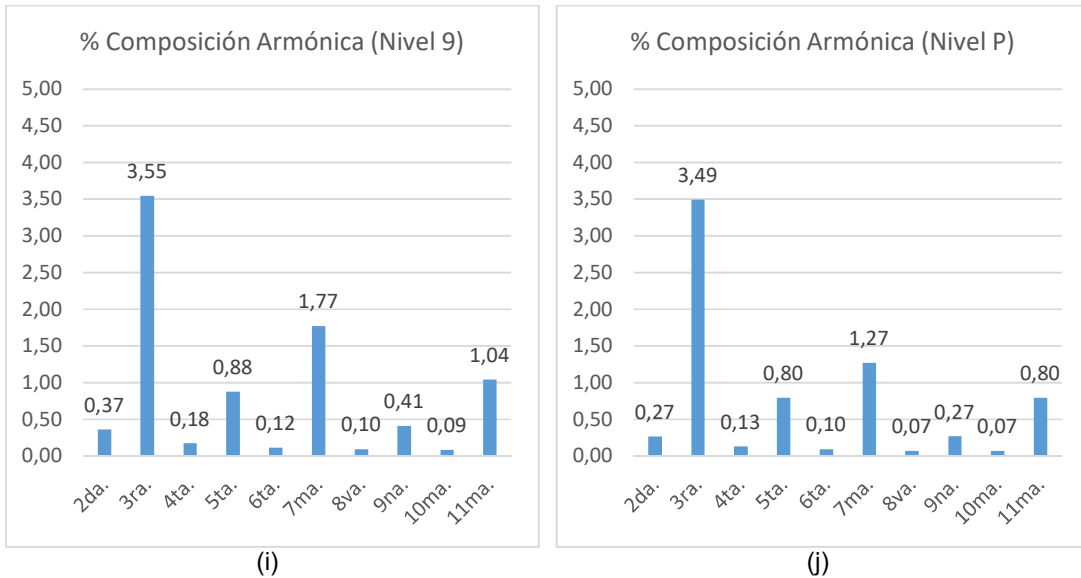
(f)



(g)



(h)



Figuras 3.7. Composición armónica en corriente a distintos niveles de potencia, Mabe 16 booster.
Fuente: (Propia)

3.2.1.6. Distorsión armónica total en corriente, THD

Los valores de THD se determinan a partir de la descomposición de la corriente en sus componentes, fundamental y armónicas, presentadas en los numerales anteriores. El resultado de las mediciones arroja valores más altos de lo esperado, debido a que influye el comportamiento transitorio propio del modo de operación S3.

Por esta razón a continuación, mediante las Figuras 3.8 y 3.9, se presentan los valores de THD, tanto medidos, como calculados.

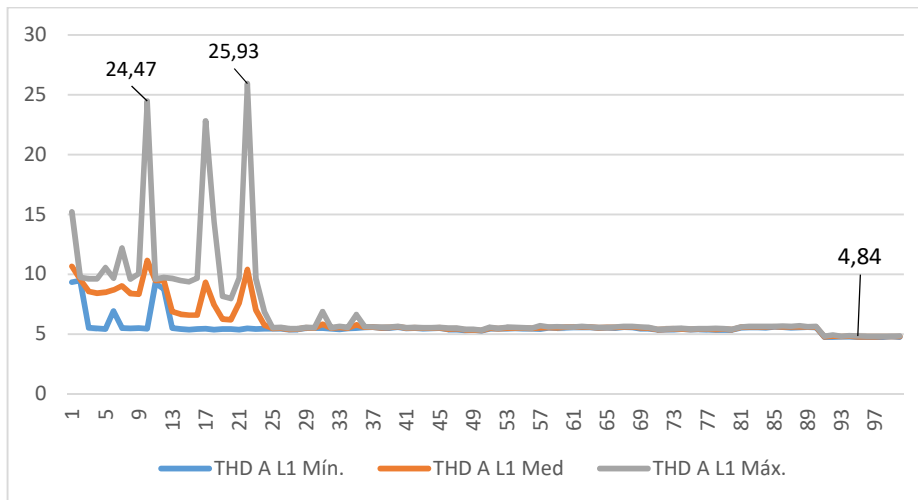


Figura 3.8. THD medido en corriente, Mabe 16 booster.
Fuente: (Propia)

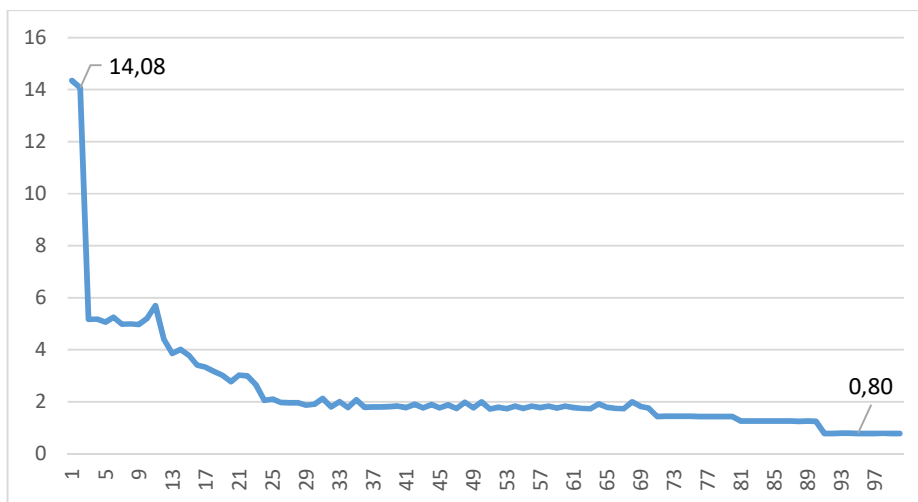


Figura 3.9. THD calculado en corriente, Mabe 16 booster.
Fuente: (Propia)

3.2.1.7. Distorsión de demanda total

Como se puede observar, el THD se evalúa en relación a la corriente RMS instantánea, pero un parámetro más representativo resulta, al comparar dicha distorsión con el valor de la corriente nominal, dentro del sistema que se analiza, a esto se lo conoce como *Distorsión de Demanda Total*, TDD por sus siglas en inglés, y su comportamiento se presenta en la siguiente figura, tomando en cuenta una potencia nominal de 6300 W de las cocinas de inducción.

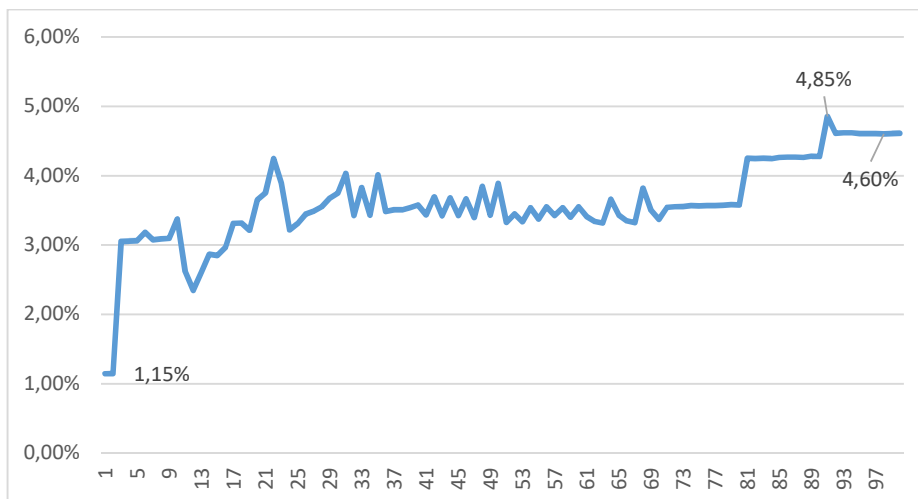


Figura 3.10. TDD en corriente en relación a corriente de potencia máxima de la cocina de inducción, Mabe 16 booster.
Fuente: (Propia)

3.2.1.8. Potencia activa, potencia aparente y factor de potencia

A continuación, se presenta la potencia aparente y la potencia activa de la zona de cocción, los valores registrados obedecen a un factor de potencia que oscila entre 0,95 en los niveles bajos de potencia, hasta un 0,99, en niveles altos.

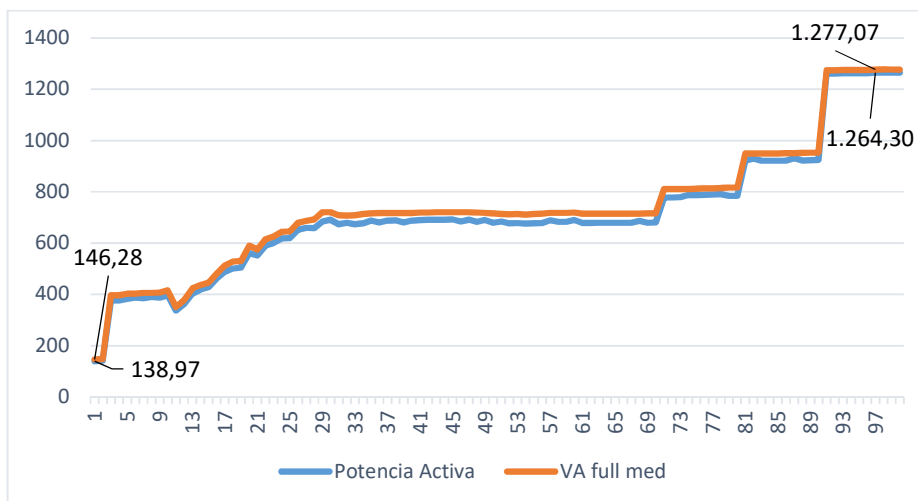


Figura 3.11. Potencia real y aparente de consumo, Mabe 16 booster.
Fuente: (Propia)

Finalmente se ha determinado la potencia real consumida por la zona de inducción Mabe 16 booster, misma que alcanzó los 1264 W.

3.2.2. Zonas de inducción Mabe 25 booster, Indurama 16, Indurama 16 boost e Indurama 25 boost

Dado que el análisis realizado para la zona de cocción Mabe 16 booster es replicado para los modelos: Mabe 25 booster, Indurama 16, Indurama 16 boost e Indurama 25 boost, a continuación se presenta de forma conjunta, el comportamiento registrado en la alimentación de energía de las cocinas al funcionar cada zona de cocción en condiciones estables.

3.2.2.1. Ciclo de operación

Mediante las figuras 3.12, 3.13, 3.14. y 3.15, se presentan los ciclos de operación de forma porcentual, para cada zona de cocción, cabe resaltar que en los niveles más altos, cuyo ciclo de operación llega a ser de 100%, la potencia se controla mediante la amplitud de la onda de corriente.

Una característica a mencionar es que la zona de cocción Indurama 1400 W es la única que no presenta el nivel P, puesto que no tiene el amplificador de potencia adicional, mencionado en el numeral 3.1.2.

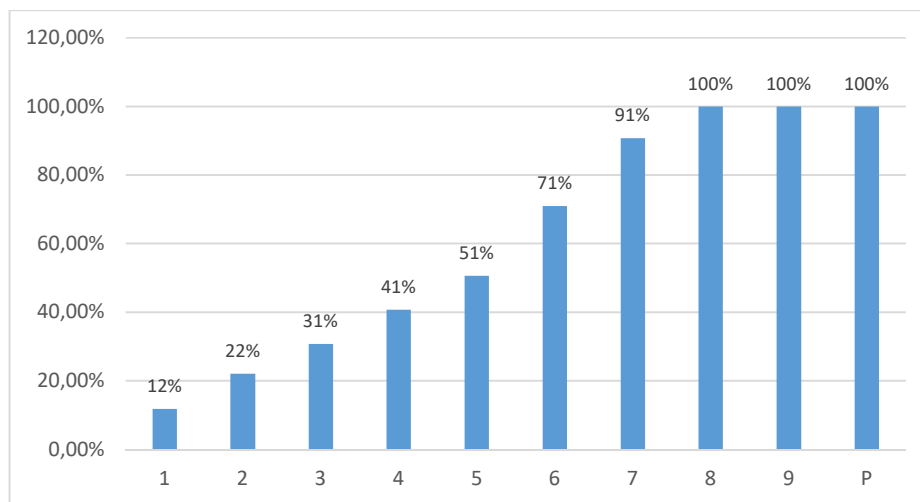


Figura 3.12. Ciclo de Operación, Mabe 25 booster.
Fuente: (Propia)

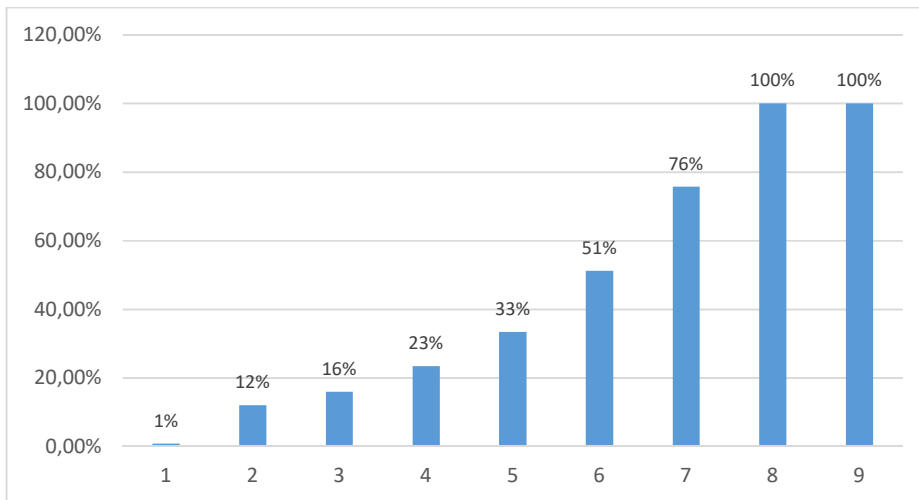


Figura 3.13. Ciclo de Operación, Indurama 1400 W.
Fuente: (Propia)

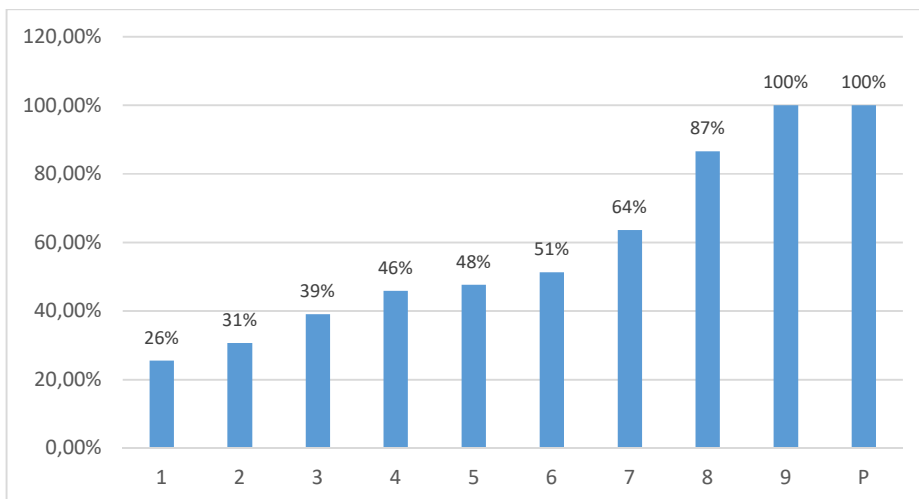


Figura 3.14. Ciclo de Operación, Indurama 1100 W (Boost).
Fuente: (Propia)

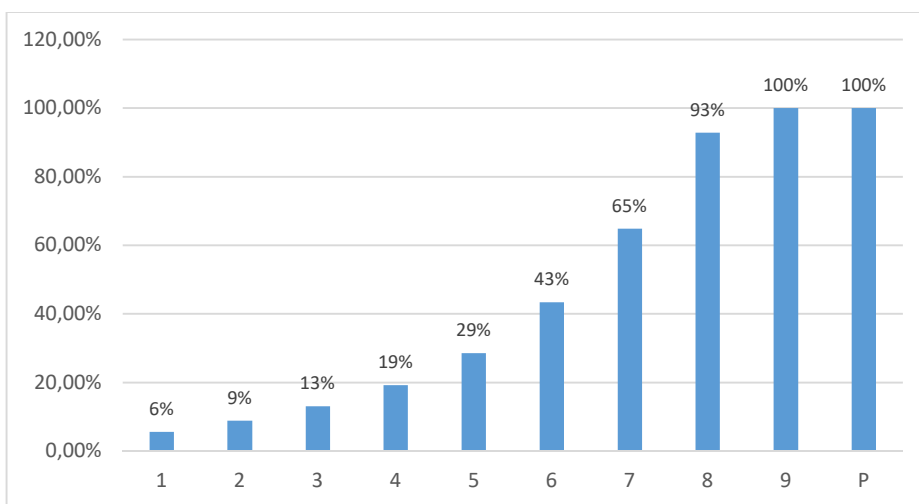


Figura 3.15. Ciclo de Operación, Indurama 1850 W (Boost).
Fuente: (Propia)

3.2.2.2. Valor eficaz de voltaje

A continuación, en las Figuras 3.16, 3.17, 3.18 y 3.19, se presentan las bandas de variación de voltaje que suministra energía a las cocinas de inducción en condiciones estables de funcionamiento.

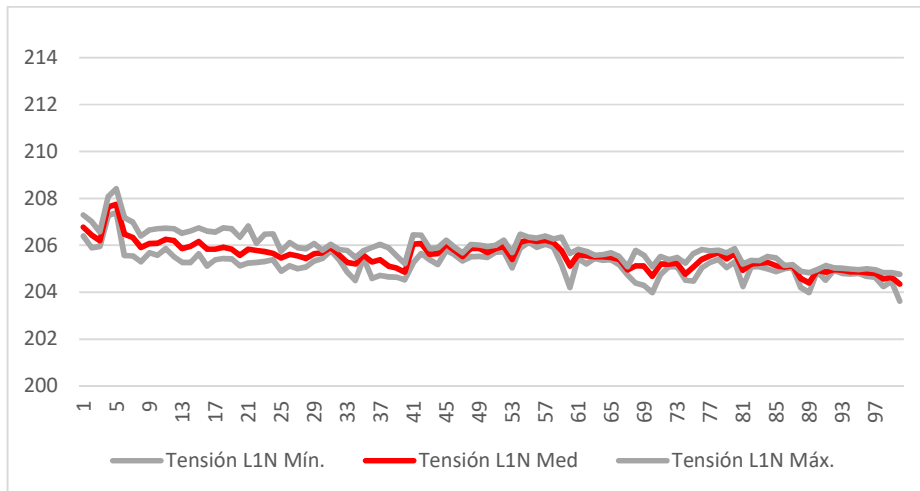


Figura 3.16. Voltaje de Alimentación, Mabe 25 booster.
Fuente: (Propia)

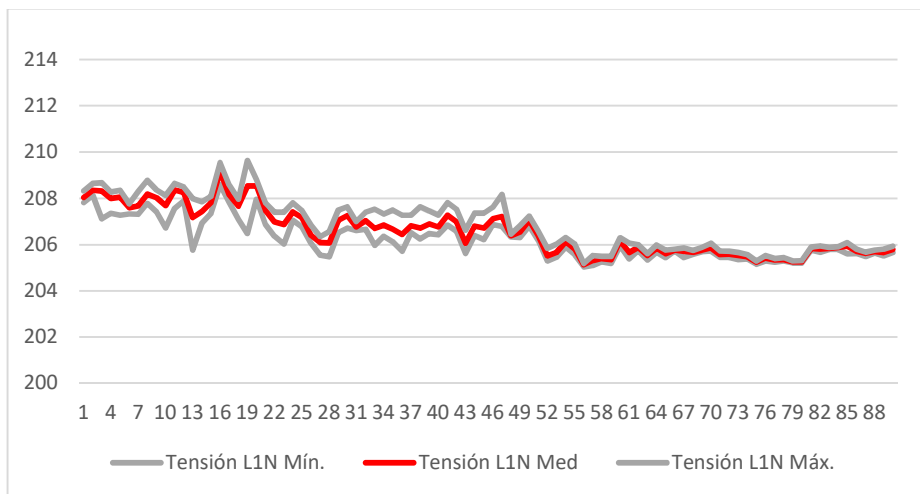


Figura 3.17. Voltaje de Alimentación, Indurama 1400 W.
Fuente: (Propia)

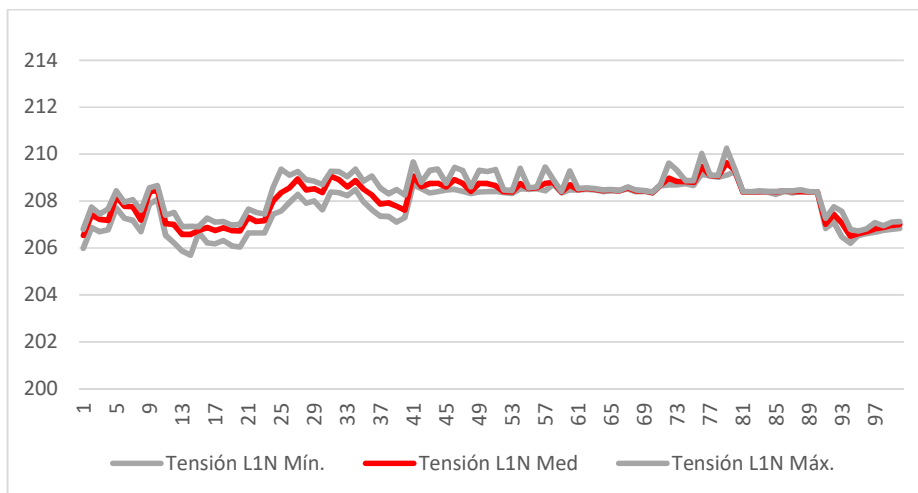


Figura 3.18. Voltaje de Alimentación, Indurama 1100 W (Boost).
Fuente: (Propia)

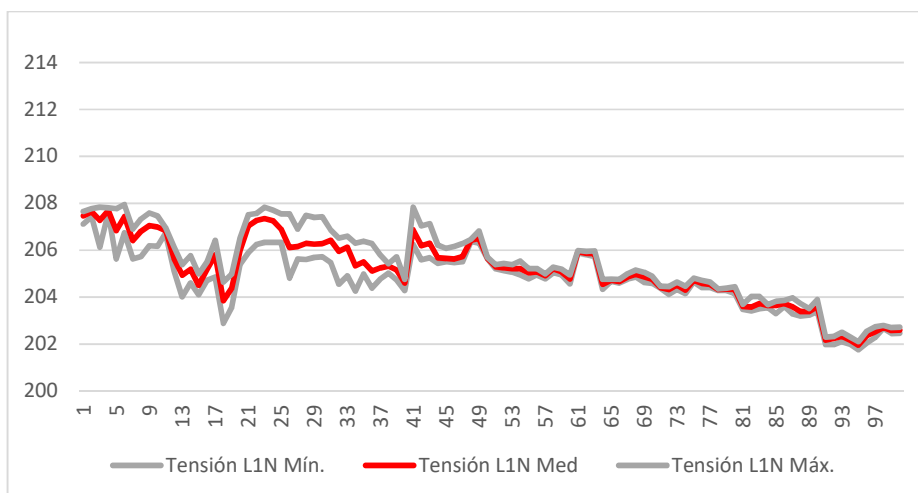


Figura 3.19. Voltaje de Alimentación, Indurama 1850 W (Boost).
Fuente: (Propia)

En la Tabla 3.2, se presenta los valores representativos de las bandas de variación de voltaje a la entrada de las cocinas de inducción. Cabe resaltar que los porcentajes presentan los valores de variación máxima registrada.

Tabla 3.2. Registro de Voltajes de alimentación.

ITEM	Marca	Modelo	Voltaje de alimentación a niveles bajos	Voltaje de alimentación a niveles bajos
1	Mabe	16 booster	207,1 V $\pm 0,53\%$	206,9 V $\pm 0,06\%$
2	Mabe	25 booster	206,1 V $\pm 0,78\%$	205,0 V $\pm 0,57\%$
3	Indurama	16	207,7 V $\pm 1,51\%$	205,6 V $\pm 0,24\%$
4	Indurama	16 boost	207,5 V $\pm 0,85\%$	208,12 V $\pm 0,54\%$
5	Indurama	25 boost	206,4 V $\pm 1,32\%$	203,5 V $\pm 0,34\%$

Fuente: (Indurama, 2018) y (Mabe, 2018)

Como se puede observar, a niveles de potencia más altos, la banda de variación es menor, esto se debe a que la carga impuesta por la cocina influye más sobre la red de distribución, haciendo que esta se vea menos alterada por condiciones externas.

Otra característica que se observa es que el aumento del nivel de potencia, disminuye el voltaje de alimentación, sin embargo dicha caída no afecta la calidad de energía, puesto que la máxima caída es de un 1,75%, respecto al voltaje nominal, que es un valor tolerable respecto al valor de la tensión y no promueve una perturbación visible como flickers PST.

3.2.2.3. Valor eficaz de corriente

En las Figuras 3.20, 3.21, 3.22 y 3.23, se muestran las corrientes máximas que alcanza el modo de operación S3, presentando corrientes de hasta 5,30 A entre los niveles 1 y 7. En las potencias superiores, los ciclos de operación alcanzan un 100% y la potencia se controla por la amplitud de onda.

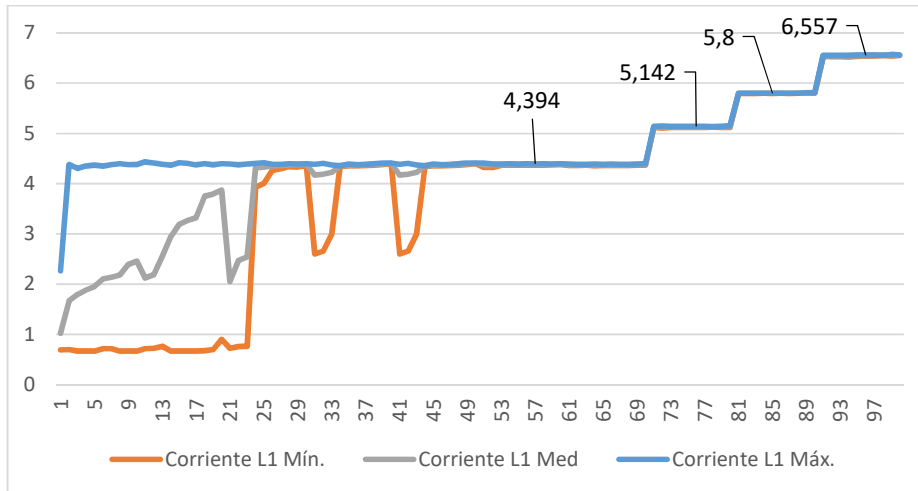


Figura 3.20. Corriente de alimentación [A], Mabe 25 booster.
Fuente: (Propia)

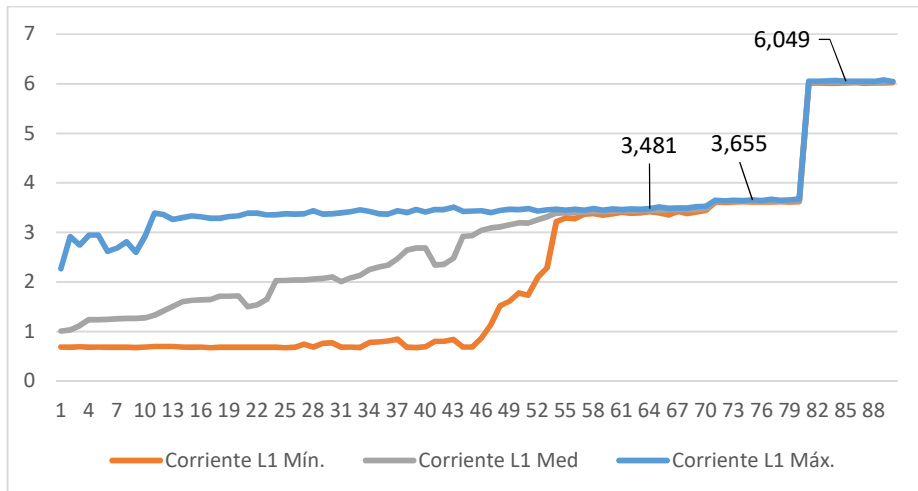


Figura 3.21. Corriente de alimentación [A], Indurama 1400 W.
Fuente: (Propia)

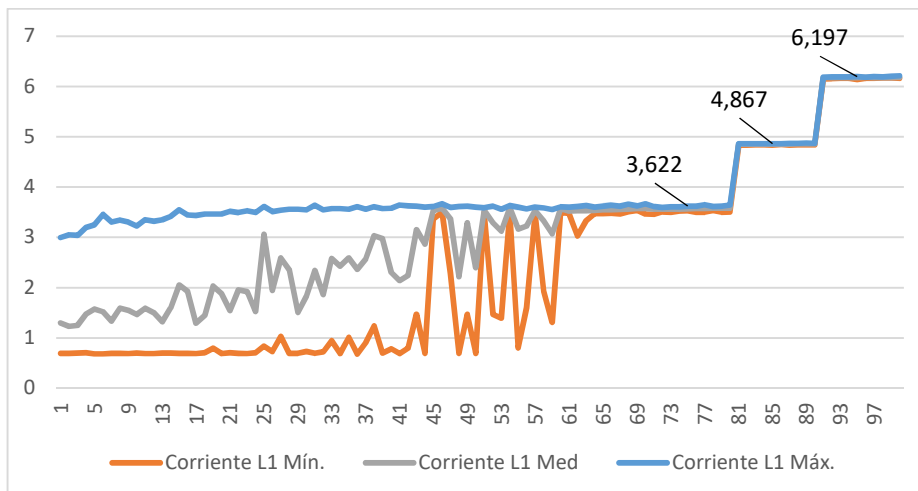


Figura 3.22. Corriente de alimentación [A], Indurama 1100 W (Boost).
Fuente: (Propia)

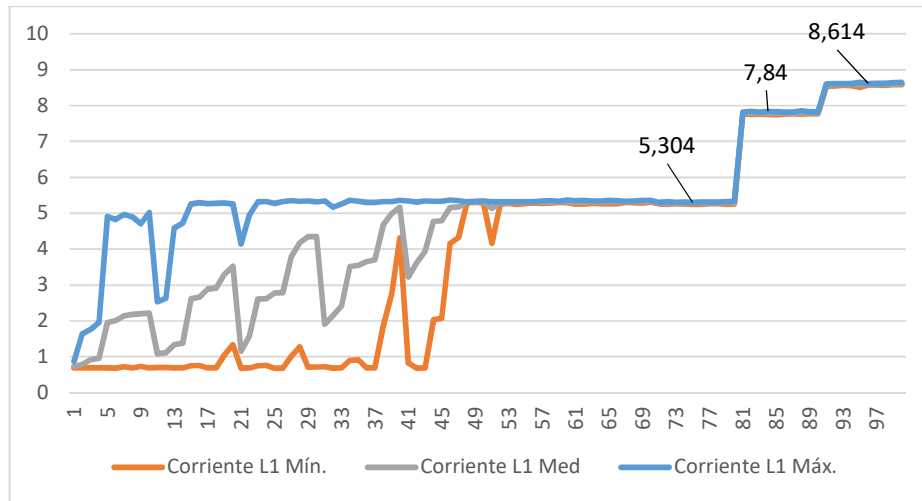


Figura 3.23. Corriente de alimentación [A], Indurama 1850 W (Boost).
Fuente: (Propia)

3.2.2.4. Valor eficaz de corriente fundamental

A continuación se presenta la participación de la corriente fundamental para cada nivel de potencia y para cada zona de cocción.

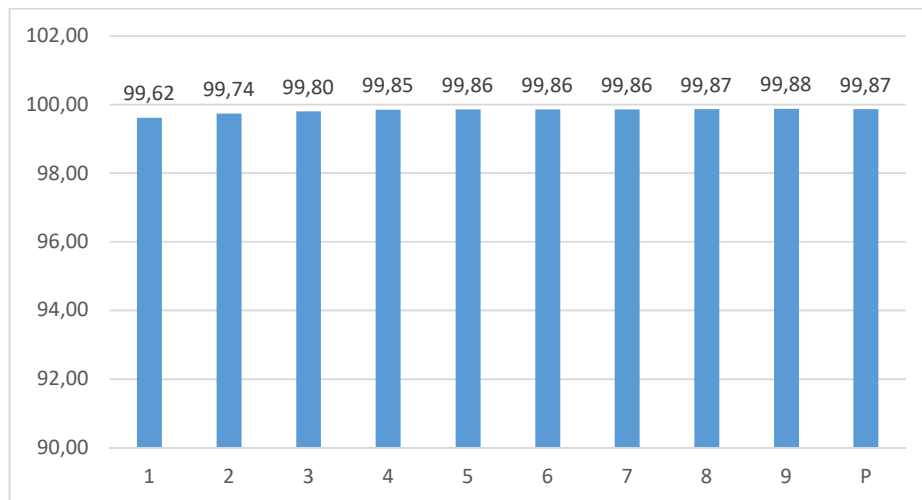


Figura 3.24. Componente fundamental a distintos niveles de potencia (%), Mabe 25 booster.
Fuente: (Propia)

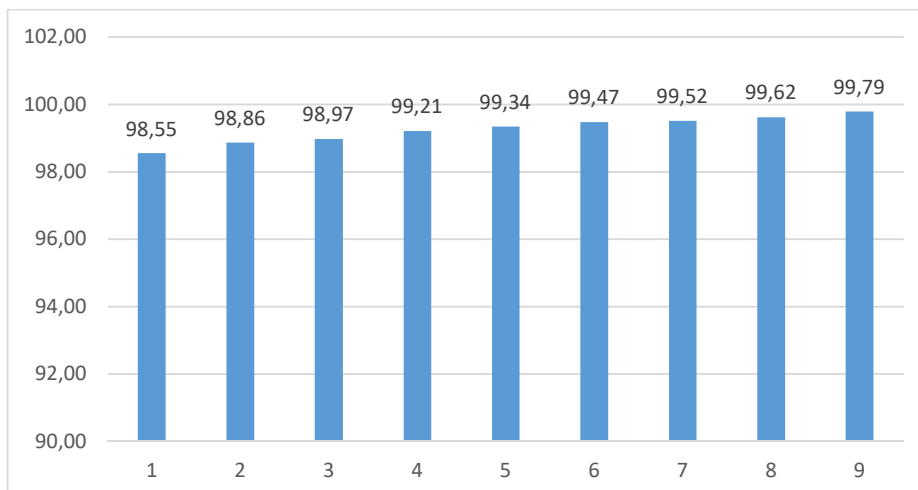


Figura 3.25. Componente fundamental a distintos niveles de potencia (%), Indurama 1400 W.
Fuente: (Propia)

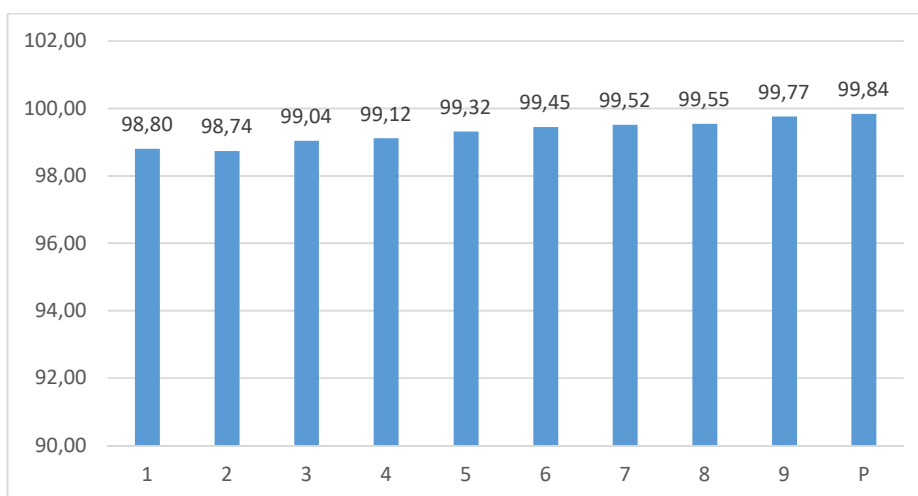


Figura 3.26. Componente fundamental a distintos niveles de potencia (%), Indurama 1100 W.
Fuente: (Propia)

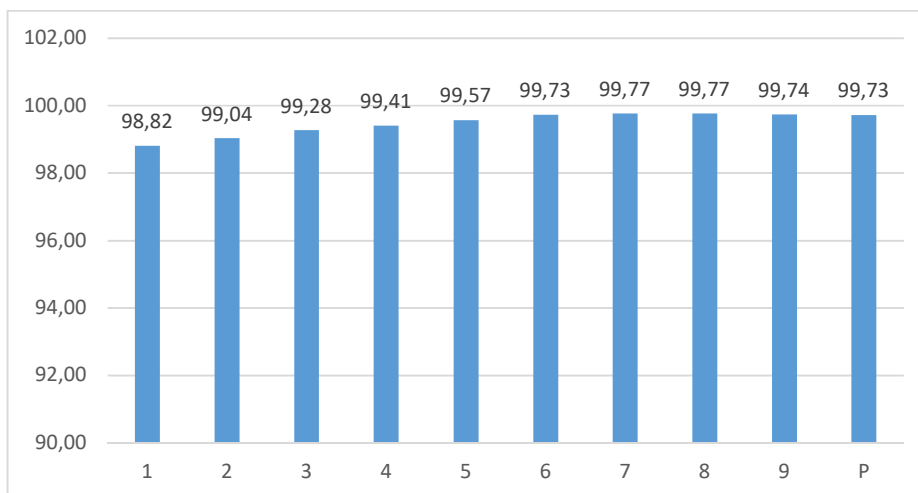


Figura 3.27. Componente fundamental a distintos niveles de potencia (%), Indurama 1850 W.
Fuente: (Propia)

A partir de estos datos, mediante la Tabla 3.3 se presenta los valores entre los que varía el porcentaje que la corriente fundamental, presente en la corriente de alimentación.

Tabla 3.3. Relaciones I_1 / I_{rms} [%] mínima y máxima en zonas de cocción.

ITEM	Marca	Modelo	Mínima relación	Máxima relación
			I_1 / I_{rms} [%]	I_1 / I_{rms} [%]
1	Mabe	16 booster	99,5	99,88
2	Mabe	25 booster	99,62	99,88
3	Indurama	16	98,55	99,79
4	Indurama	16 boost	98,74	99,84
5	Indurama	25 boost	98,82	99,73

Fuente: (Propia)

Como se puede observar, las relaciones I_1/I_{rms} siempre son altas e incluso siempre se incrementan conforme aumenta el nivel de potencia seleccionado.

3.2.2.5. Componentes armónicas de corriente

Las componentes armónicas de menor orden, son presentadas mediante las figuras siguientes. Cabe recordar se han escogido los niveles altos de potencia, debido a que en estos se presentan relaciones de operación de 100%. (El detalle de todos los niveles de potencia se los presenta en el Anexo 02. Componentes armónicas de corriente).

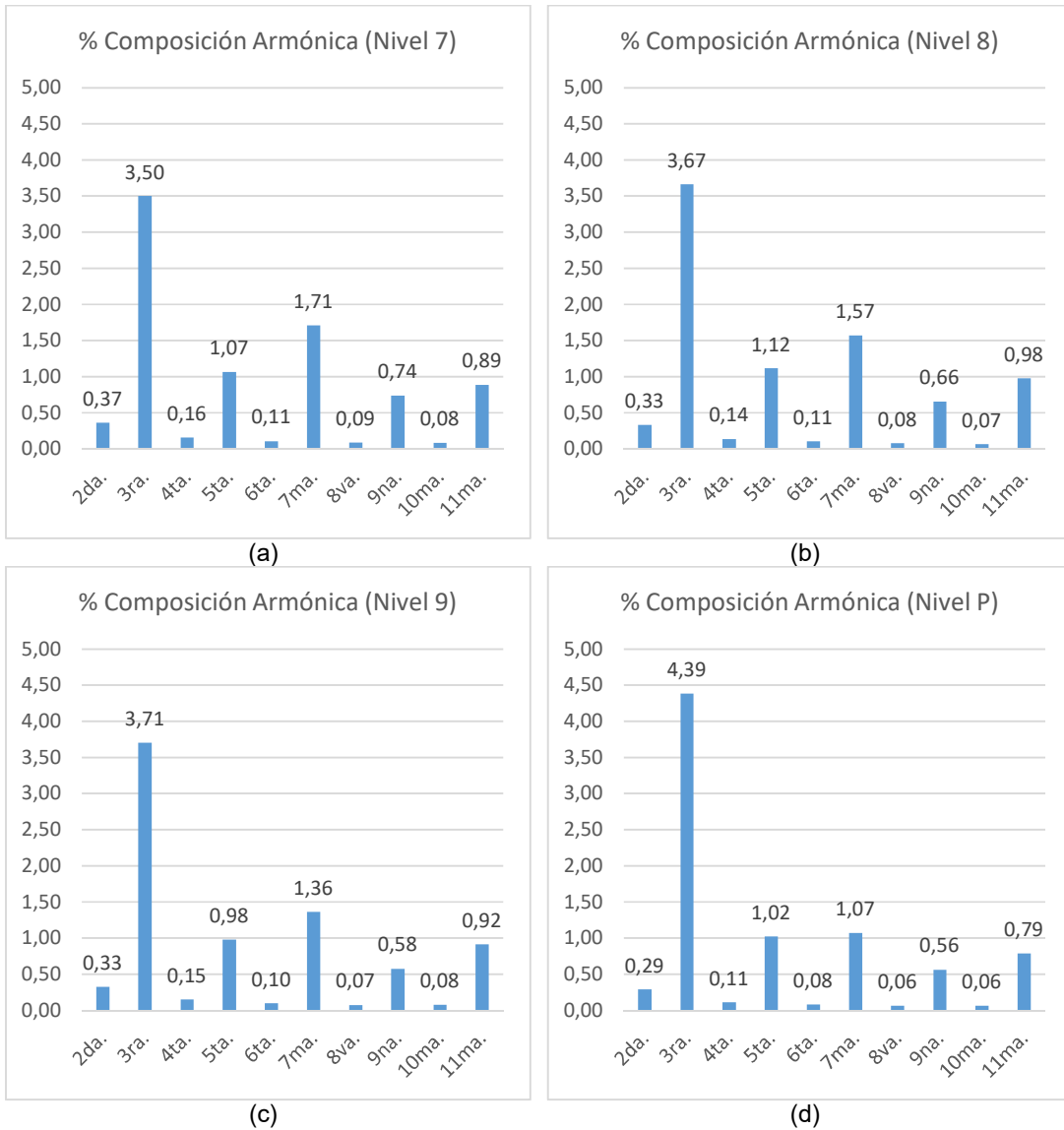


Figura 3.28. Composición armónica en corriente a distintos niveles de potencia, Mabe 25 booster.
Fuente: (Propia)

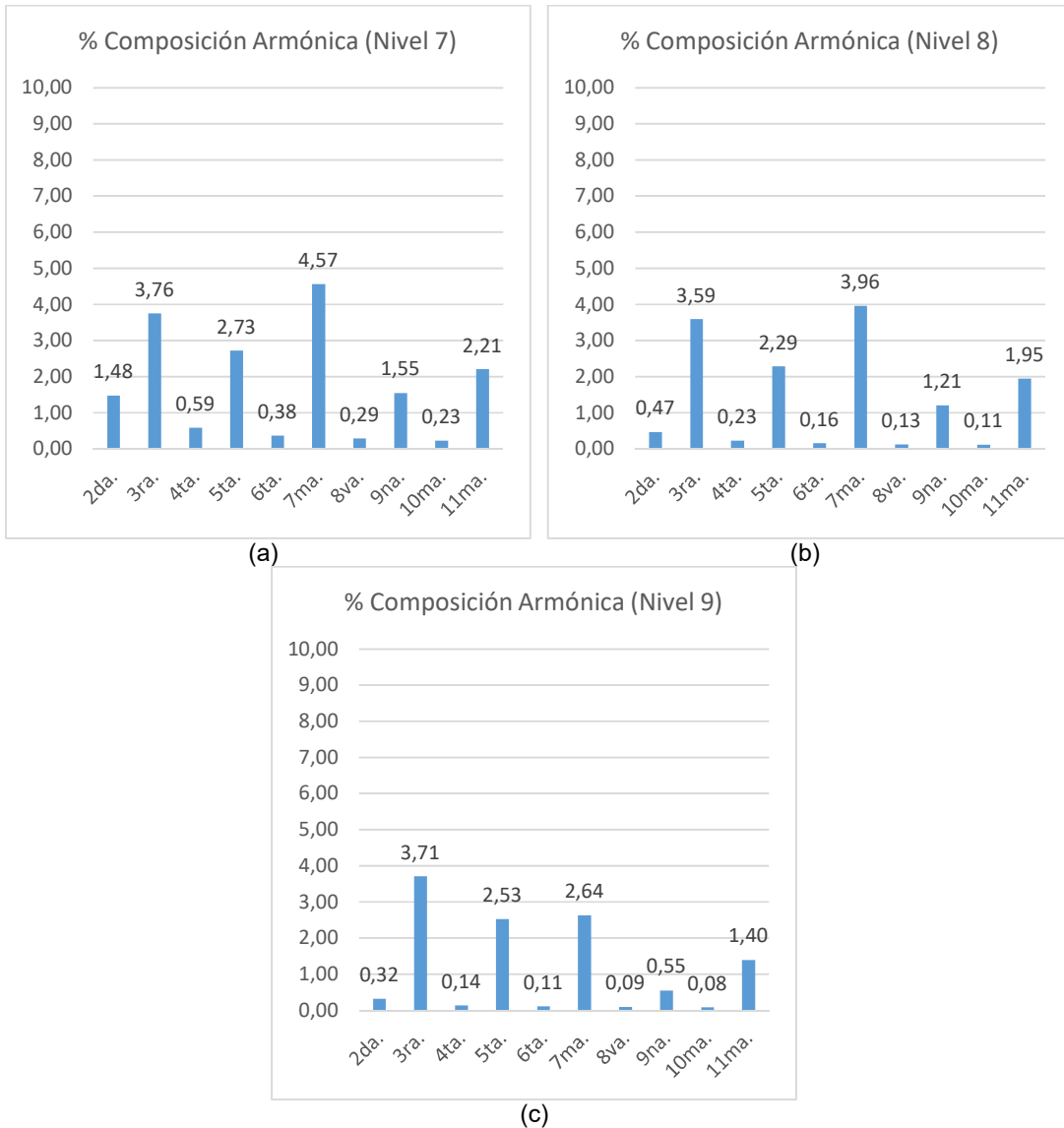


Figura 3.29. Composición armónica en corriente a distintos niveles de potencia, Indurama 1400 W.
Fuente: (Propia)

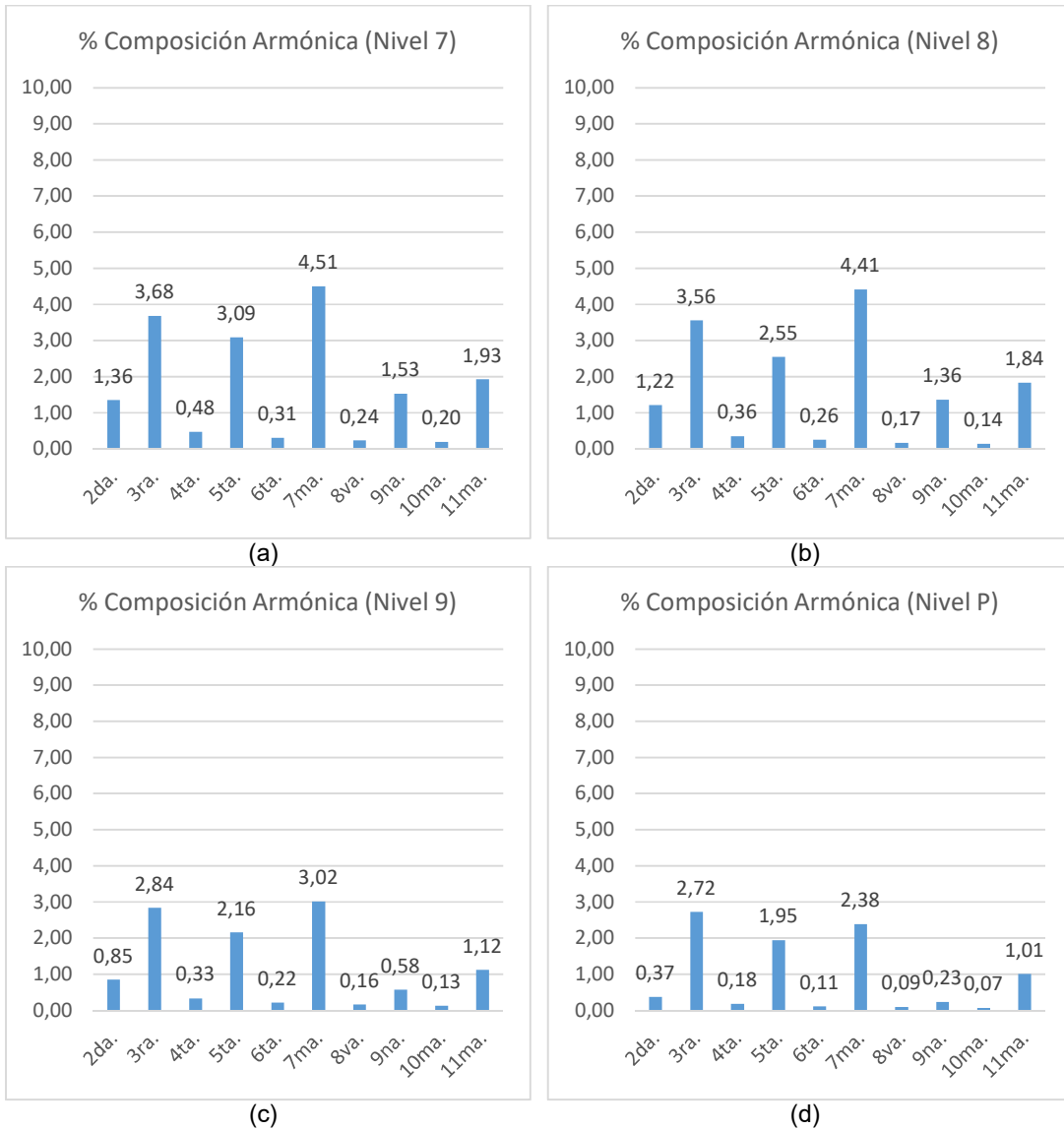


Figura 3.30. Composición armónica en corriente a distintos niveles de potencia, Indurama 1100 W (Boost).
Fuente: (Propia)

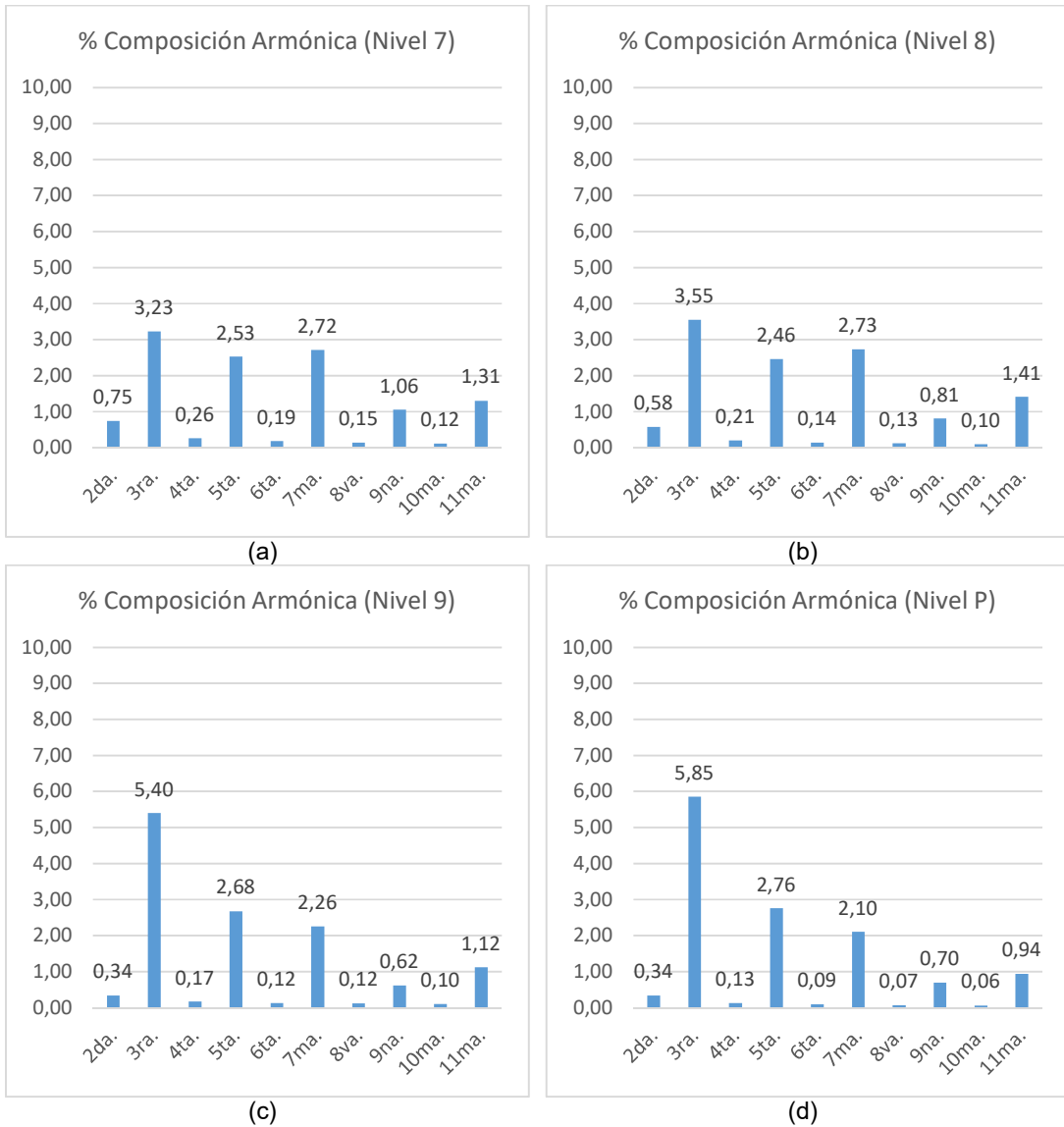


Figura 3.31. Composición armónica en corriente a distintos niveles de potencia, Indurama 1850 W (Boost).
Fuente: (Propia)

3.2.2.6. Distorsión armónica total en corriente, THD

A continuación, de la Figura 3.32 a la Figura 3.39, se presentan los valores de THD en corriente, tanto medidos como calculados, para cada zona de cocción.

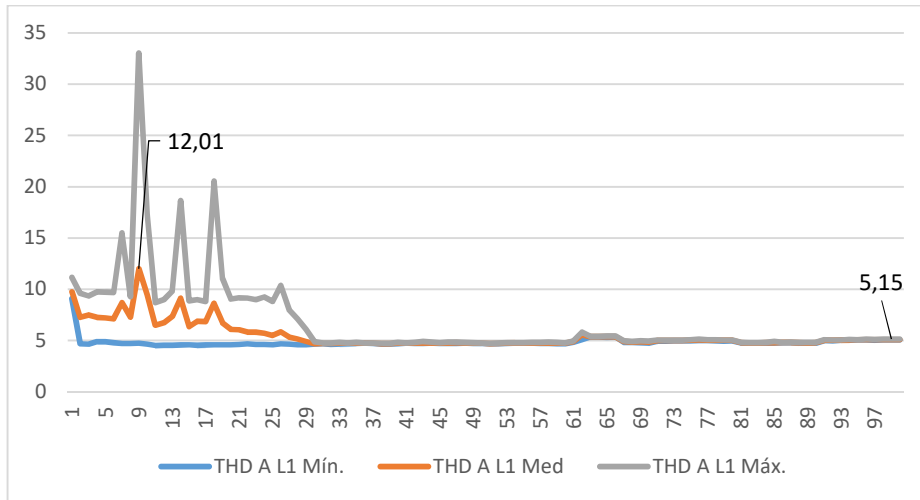


Figura 3.32. THD medido en corriente, Mabe 25 booster.
Fuente: (Propia)

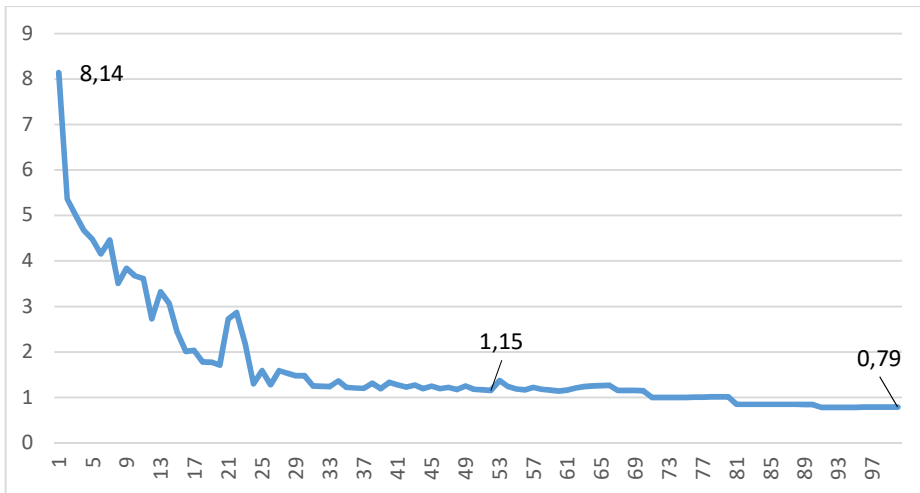


Figura 3.33. THD calculado en corriente, Mabe 25 booster.
Fuente: (Propia)

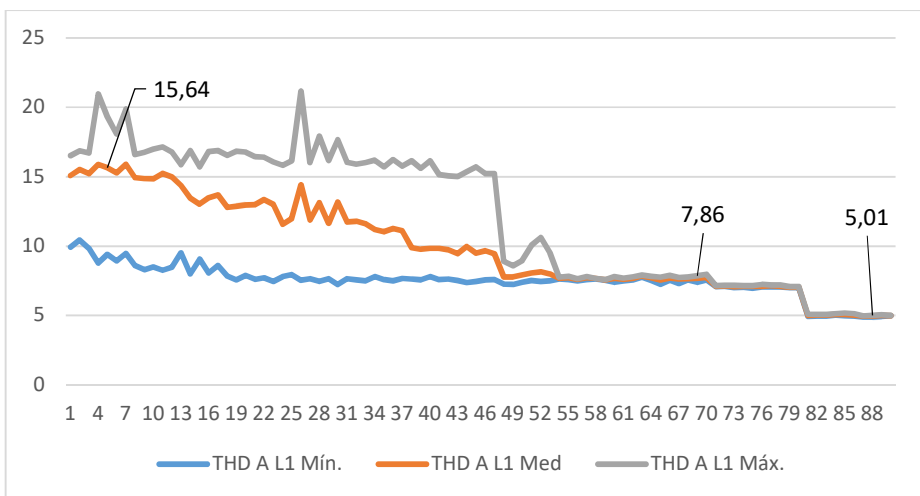


Figura 3.34. THD medido en corriente, Indurama 1400 W.
Fuente: (Propia)

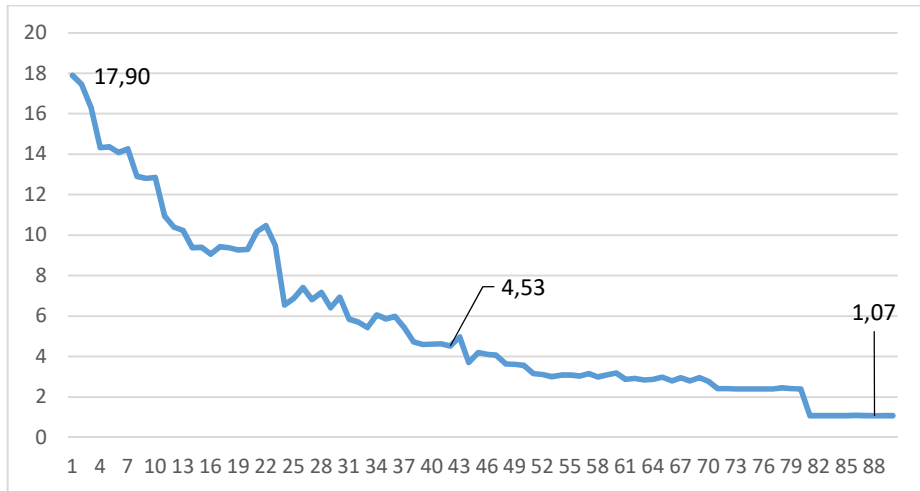


Figura 3.35. THD calculado en corriente, Indurama 1400 W.
Fuente: (Propia)

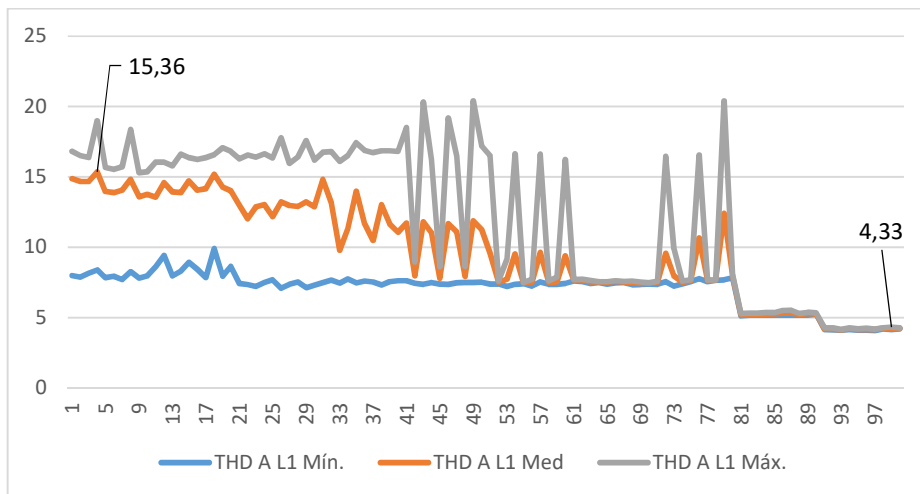


Figura 3.36. THD medido en corriente, Indurama 1100 W (Boost).
Fuente: (Propia)

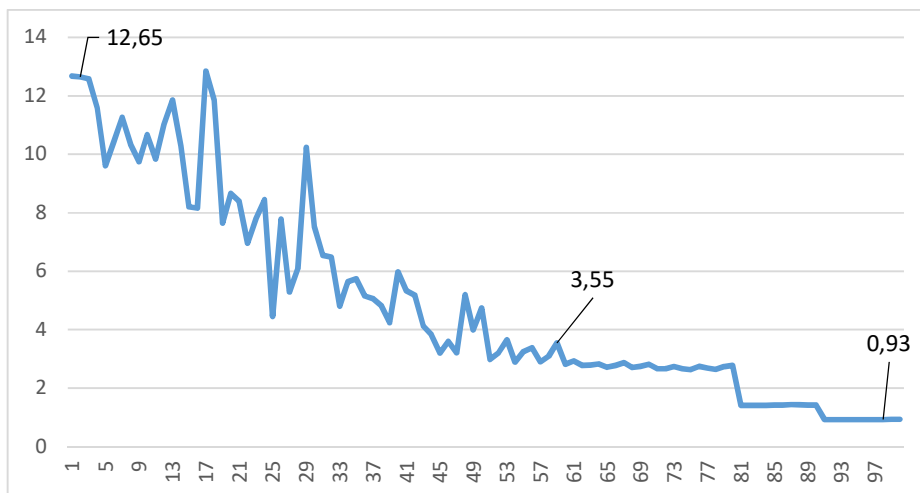


Figura 3.37. THD calculado en corriente, Indurama 1100 W (Boost).
Fuente: (Propia)

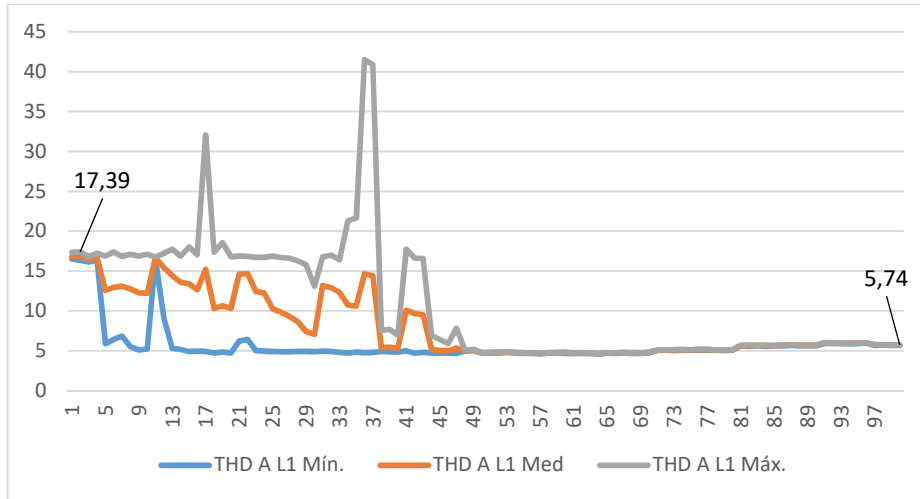


Figura 3.38. THD medido en corriente, Indurama 1850 W (Boost).
Fuente: (Propia)

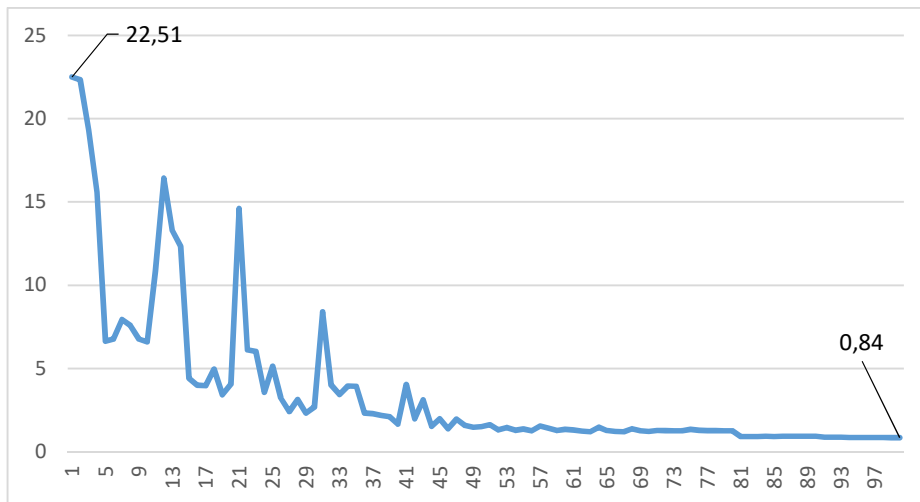


Figura 3.39. THD calculado en corriente, Indurama 1850 W (Boost).
Fuente: (Propia)

3.2.2.7. Distorsión de demanda total

En las Figuras 3.40, 3.41, 3.42 y 3.43, se presenta el comportamiento de la Distorsión de Demanda Total, TDD, en cada zona de cocción, tomando en cuenta una potencia nominal de 6300 W de las cocinas de inducción, es necesario definir una única potencia para la comparación de todas las zonas, para poder realizar comparaciones.

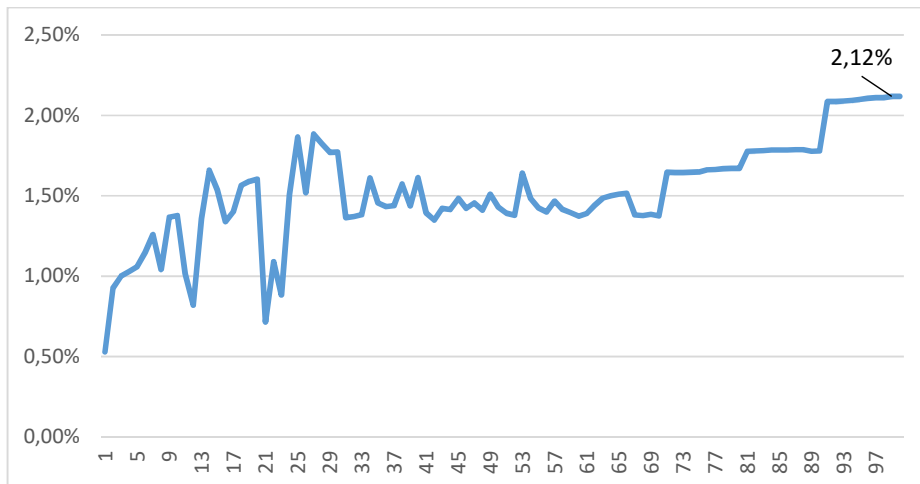


Figura 3.40. TDD en corriente en relación a corriente de potencia máxima, Mabe 25 booster.
Fuente: (Propia)

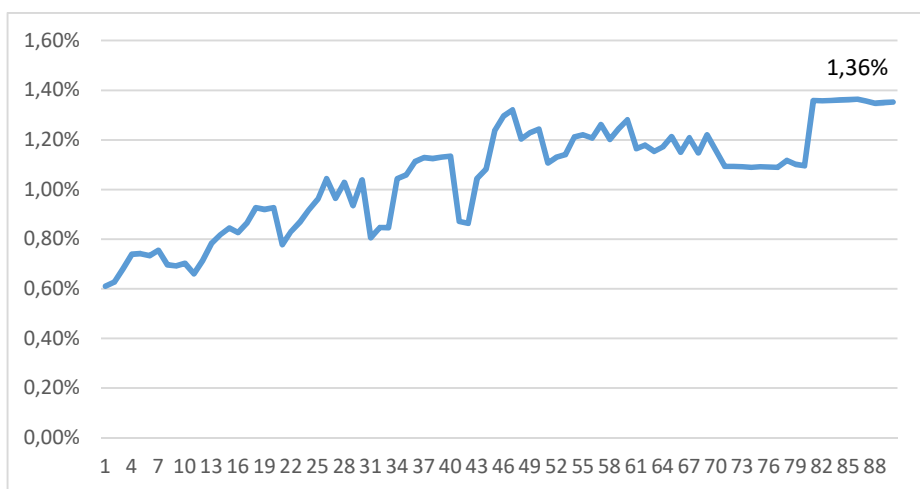


Figura 3.41. TDD en corriente en relación a corriente de potencia máxima, Indurama 1400 W.
Fuente: (Propia)

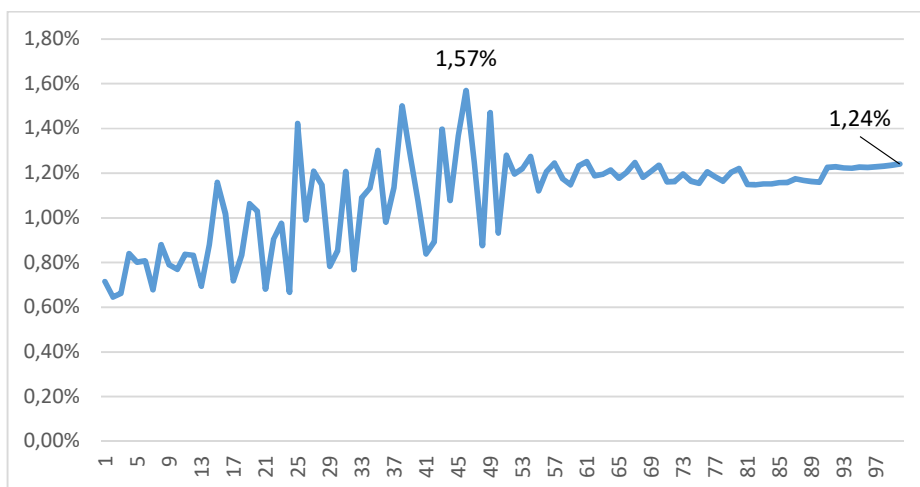


Figura 3.42. TDD en corriente en relación a corriente de potencia máxima, Indurama 1100 W.
(Boost)
Fuente: (Propia)

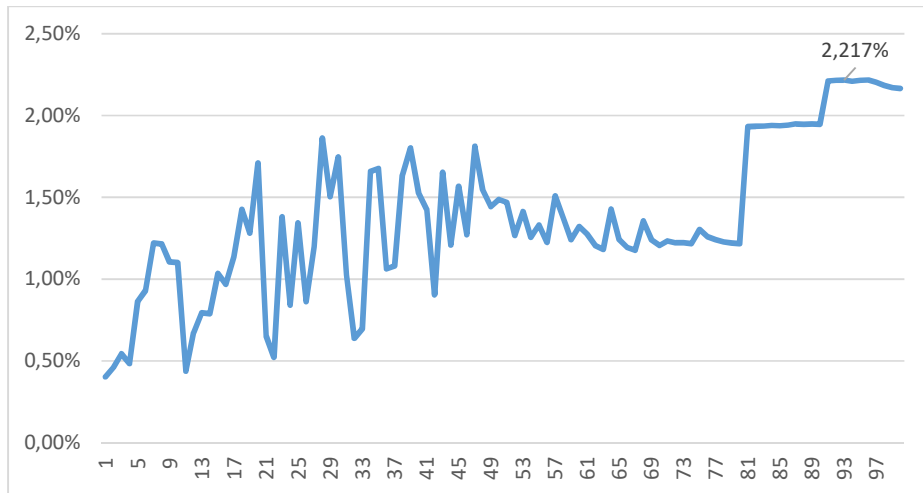


Figura 3.43. TDD en corriente en relación a corriente de potencia máxima, Indurama 1850 W (Boost).
Fuente: (Propia)

3.2.2.8. Potencia activa, potencia aparente y factor de potencia

En las figuras a continuación, se presentan las potencias aparentes y potencias activas de las zonas de cocción, los valores registrados obedecen a mediciones realizadas, por lo que el modo de operación puede reflejar valores erráticos en los niveles de potencia bajos, por esta razón el cálculo de factor de potencia se lo realiza de forma analítica y los vlore encontrados se presentan mediante la Tabla 3.4.

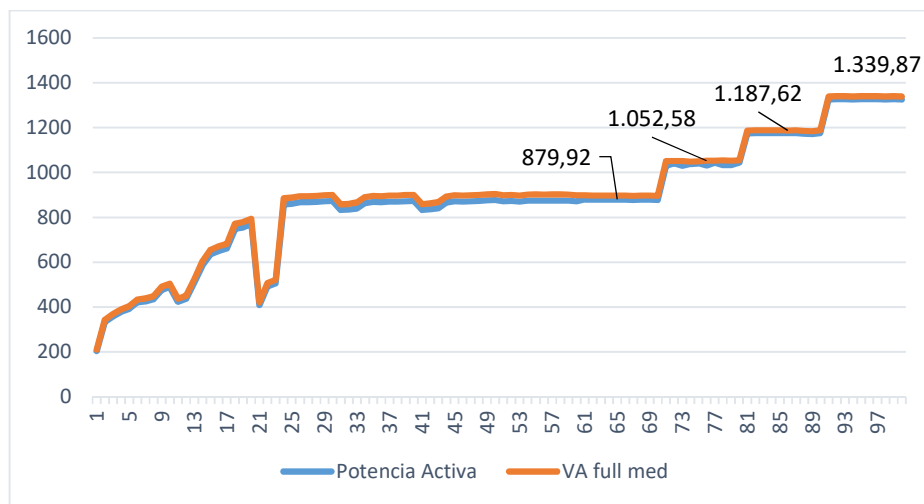


Figura 3.44. Potencia real y aparente de consumo, Mabe 25 booster.
Fuente: (Propia)

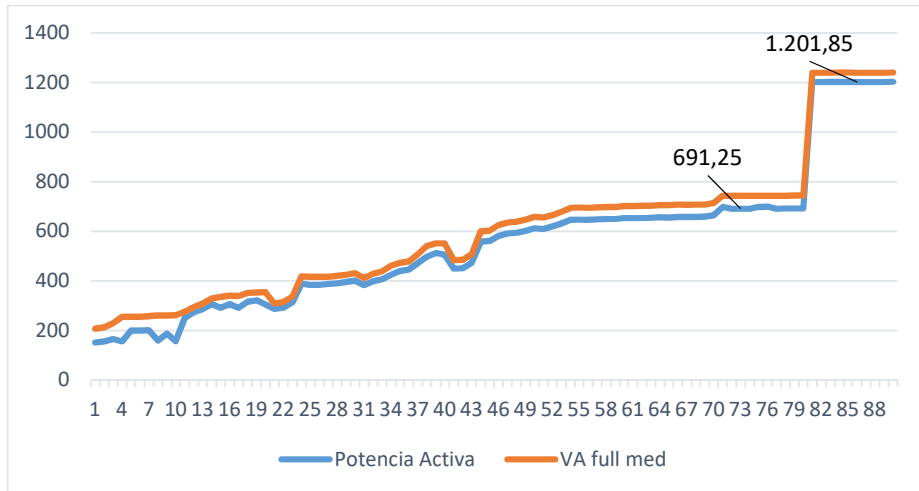


Figura 3.45. Potencia real y aparente de consumo, Indurama 1400 W.
Fuente: (Propia)

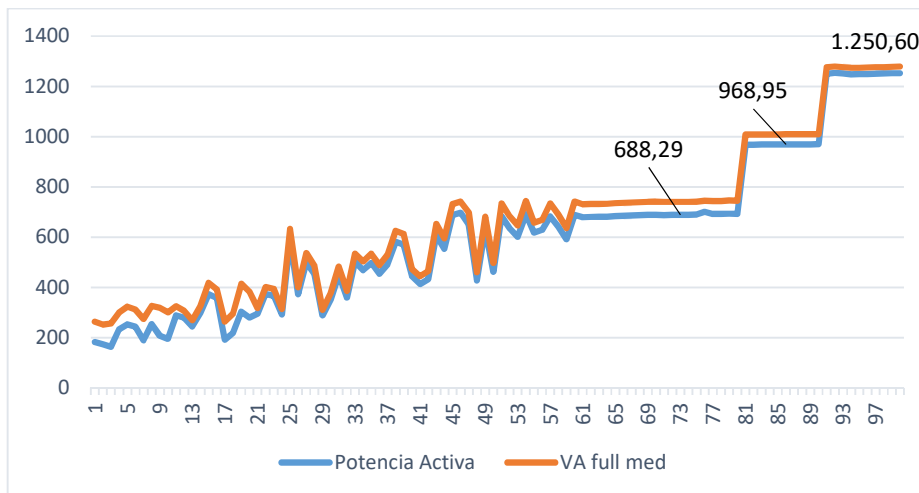


Figura 3.46. Potencia real y aparente de consumo, Indurama 1100 W (Boost).
Fuente: (Propia)

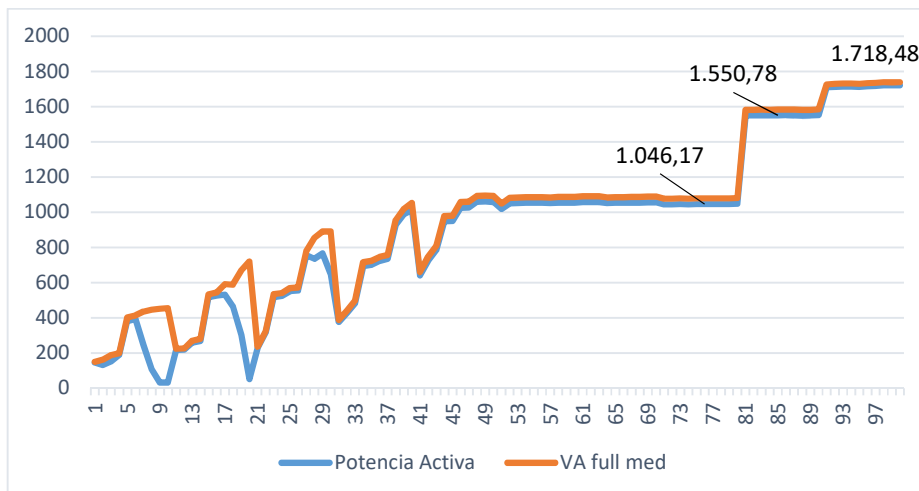


Figura 3.47. Potencia real y aparente de consumo, Indurama 1850 W (Boost).
Fuente: (Propia)

Tabla 3.4. Niveles de factor de potencia y potencia máxima registrada.

ITEM	Marca	Modelo	Factor de Potencia mínimo	Factor de Potencia máximo	Potencia máxima registrada (W)
1	Mabe	16 booster	0,95	0,99	1277
2	Mabe	25 booster	0,97	0,99	1340
3	Indurama	16	0,97	0,99	1202
4	Indurama	16 boost	0,95	0,99	1248
5	Indurama	25 boost	0,95	0,99	1739

Fuente: (Propia)

3.3. Información de la CNEL EP Unidad de Negocio Guayaquil

La CNEL EP Unidad de Negocio Guayaquil lidera la inserción de cocinas de inducción a nivel nacional, (EL TELEGRAFO, 2018), con base en la información catastral de dicha distribuidora y la información que reporta a la ARCONEL a través de los formularios de Calidad, Infraestructura y Transacciones del SISDAT, se ha tomado la información involucrada o influenciada por la incorporación de cocinas de inducción y se resume a continuación:

Tabla 3.5. Transformadores de distribución, monofásicos y trifásicos.

Transformadores de Distribución	Unidades	Potencia instalada	Potencia promedio
Monofásicos	33800	1774,27 MVA	52.49 kVA ²
Trifásicos	2001	615,78 MVA	307,72 kVA

Fuente: (Agencia de Regulación de Electricidad, ARCONEL, 2018)

Tabla 3.6. Usuarios de baja tensión, residenciales y beneficiarios de la tarifa preferencial por uso de cocinas de inducción.

Usuarios	Cantidad
Baja tensión	689.960
Residenciales	608.484
Residenciales PEC	106.984

Fuente: (Agencia de Regulación de Electricidad, ARCONEL, 2018)

² Información coincidente con datos de la CNEL EP Unidad de Negocio Guayaquil, donde los transformadores más utilizados son de 50 kVA. Fuente: CNEL EP Unidad de Negocio Guayaquil

Tabla 3.7. Distancia de redes de distribución secundaria y distancias consolidada de acometidas de los usuarios.

Infraestructura	Monofásicas	Bifásicas	Trifásicas
Redes Secundarias	4217,88 km	168,66 km	19,11 km
Acometidas	5481,11 km	123.79 km	18.6 km

Fuente: (Agencia de Regulación de Electricidad, ARCONEL, 2018)

Tabla 3.8. Resumen de balance energético de la CNEL EP UN Guayaquil.

Balance de energía	Energía	Potencia
Recibida de sistema de transmisión	473040,2691 MWh	
Recibida de Terceros	20294,75511 MWh	
Disponibile en el sistema	493335,0242 MWh	
Facturada a clientes no regulados	20294,75511 MWh	
Facturada a clientes regulados	403801,9641 MWh	
Perdidas del Sistema	69238,305 MWh	
Potencia de la distribuidora		880,89 MW
Potencia del sistema		914,26 MW

Fuente: (Agencia de Regulación de Electricidad, ARCONEL, 2018)

Tabla 3.9. Balance de pérdidas reportadas por la Unidad de Negocio Guayaquil.

Pérdidas del Sistema	Energía
Líneas ST	3124.53 MWh
Subestaciones	1.006,81 MWh
Redes de Media	9.508,11 MWh
No Técnicas	7.095,60 MWh
Transformadores	13.008,61 MWh
Secundarios	16.698,32 MWh
A. Público	1.655,64 MWh
Acometidas	1.182,60 MWh
Medidores	1.419,12 MWh
No Técnicas	14.538,96 MWh

Fuente: (Agencia de Regulación de Electricidad, ARCONEL, 2018)

Tabla 3.10. Resumen de consumos de usuarios beneficiarios de tarifa PEC.

Programa PEC	Datos
Clientes	106.984
Energía Facturada	25.910,67 MWh
Energía subsidiada	4.112,94 MWh
Subsidio tarifa PEC	370.167 USD

Fuente: (Agencia de Regulación de Electricidad, ARCONEL, 2018)

3.3.1. Indicadores de eficiencia e intensidad energética en la CNEL EP UN Guayaquil, por influencia de la incorporación de cocinas de inducción

Con base en los indicadores recopilados a partir la información reportada por la CNEL EP Unidad de Negocio Guayaquil, se puede hallar indicadores de intensidad de consumo y eficiencia energética que se presentan a continuación:

Tabla 3.11. Indicadores de eficiencia e intensidad energética.

Consumo medio subsidiado por usuario	45.12 kWh
Consumo incremental por usuario	109,26 kWh
Energía consumida por cocinas de inducción	11.689,72 MWh
Usuarios promedio por transformador monofásico	15,15
Usuarios PEC medio por transformador monofásico	3
Potencia PEC Instalada por transformador	18.900kW
Potencia de transformador residencial más común	50 kVA
Corriente de carga del transformador 50kVA	208 A

Fuente: (Agencia de Regulación de Electricidad, ARCONEL, 2018)

3.3.2. Determinación de pérdidas en transformadores

La CNEL EP Unidad de Negocio Guayaquil, presenta pérdidas a nivel de transformadores de 13.008,61 MWh, lo cual corresponde a las pérdidas técnicas que se aúnan de sus 35.801 transformadores de distribución, por lo que en promedio muestra un nivel de pérdidas técnicas de 272 kWh/mes, en cada transformador de 50 kVA.

A continuación, se presenta el cálculo del factor K para cada zona de inducción analizada, con lo que se establecería el incremento de las pérdidas en el transformador, a causa de la distorsión armónica que las cocinas de inducción introducen al sistema.

3.3.3. Determinación de carga de cocinas de inducción

Como se ha determinado anteriormente, en promedio, existen 3 usuarios de cocinas de inducción por cada transformador de 50 kVA. La probabilidad es alta de que los tres usuarios enciendan simultáneamente sus cocinas, puesto que los patrones de comportamiento urbano son similares y que los transformadores de esa capacidad son los más utilizados en la Unidad de Negocio.

Por lo tanto, se compara el uso de cargas de cocinas de inducción equivalentes a tres cocinas alimentadas por un transformador de 50 kVA, con una corriente nominal de 208 A. de esta manera se encuentra:

Tabla 3.12. Distorsión armónica total, Distorsión total de demanda y cálculo de factor K en transformadores de 50kVA monofásicos.

Marca	Modelo	Potencia (equivalente a 3 cocinas)	THD	TDD @ 208A	Factor K
Mabe	16 Booster	18.945 W	4,793%	1.05%	1,148
Mabe	25 Booster	18.561 W	5,075%	1.08%	1,056
Indurama	1400 W	19.235 W	5,016%	1.43%	1,168
Indurama	1100 W (Boost)	18.762 W	4,192%	1.22%	1,1879
Indurama	1850 W (Boost)	18.878 W	5,862%	1.603%	1,097

Fuente: (Propia)

Como podemos observar, el factor K más alto se encuentra con la zona de inducción Indurama 1100W (Boost), con un factor de multiplicación de pérdidas K, de 1,188.

Esto indica que en las condiciones actuales de utilización de cocinas de inducción, un transformador de 50 kVA debería presentar una cargabilidad máxima de 90.08% para restringir el apareamiento de pérdidas adicionales.

Cabe resaltar que esta relación de carga de las cocinas de inducción versus la potencia aparente de los transformadores se mantendría, por lo que el factor K y la cargabilidad de los transformadores serían iguales en otros de distintas potencias.

El caso extremo teórico se presenta al considerar un transformador exclusivo para una cocina de inducción, pues dicho transformador presentaría un factor k de 1,946 o una cargabilidad límite de 71,54%

3.3.4. Determinación de pérdidas en redes secundarias

En el análisis de pérdidas en transformadores, se ha encontrado que la zona de inducción Indurama 1100 W (Boost), es la que mayor contaminación presenta, por esta razón en el cálculo de pérdidas en conductores de red secundaria se ha tomado las características técnicas de esta zona, con el afán de calcular comportamientos críticos.

También se ha tomado características técnicas de conductores disponibles en el mercado nacional, mismos que cumplen las normativas INEN vigentes.

Siendo así, en lo que respecta a redes secundarias, hay que considerar la impedancia de conductores de aluminio con cable concéntrico y núcleo de acero, en este segmento existen variaciones entre tipos de cable, sin embargo, las impedancias típicas son muy similares y se presentan a continuación.

Tabla 3.13. Impedancias típicas de conductores de aluminio con cable concéntrico y núcleo de acero.

Tamaño o designación AWG / kcmil	Resistencia R (Omh/m)	Impedancia Inductiva X _L @ 60Hz (Omh/m)
1/0	0,000538	0,000144
2/0	0,000427	0,000141
3/0	0,000338	0,000138

Fuente: (General Cable, 2015)

Cabe resaltar que es común el uso de redes preensambladas o soterradas, pero estas condiciones incluso mejorarían las condiciones técnicas que los conductores considerados presentan.

Por otro lado, con base en la información catastral de la CNEL EP Unidad de Negocio Guayaquil se determina un promedio de 6,40 metros de red secundaria por usuario, sin embargo esta condición no se cumple de manera general, estando estas distancias presentes, solamente en redes aéreas preensambladas.

De manera general, es común que las acometidas se tomen a 10, 20, 40 o incluso hasta 200 metros del transformador más cercano, aunque esta condición no sea recomendable. Mediante la

Tabla 3.14 se presenta la afectación a la calidad e incidencia en las pérdidas técnicas por el funcionamiento de una cocina de inducción a plena carga.

Tabla 3.14. Afectación a la calidad e incidencia en las pérdidas técnicas por el funcionamiento de una cocina de inducción a plena carga (6254 W).

Tamaño o designación AWG / kcmil	Distancia al transformador (m)	Pérdidas en red secundaria (W)	Caída de Voltaje (V)	Afectación a la forma de Voltaje THD
1/0	1	1,027 W	0,034 V	0,004%
2/0	1	0,815 W	0,026 V	0,001%
3/0	1	0,645 W	0,021 V	0,001%
1/0	6,40	6,567 W	0,219 V	0,027%
2/0	6,40	5,212 W	0,168 V	0,005%
3/0	6,40	4,126 W	0,133 V	0,004%
1/0	10	10,27 W	0,344 V	0,043%
2/0	10	8,15 W	0,263 V	0,007%
3/0	10	6,45 W	0,208 V	0,006%
1/0	20	20,54 W	0,687 V	0,043%
2/0	20	16,30 W	0,527 V	0,007%
3/0	20	12,90 W	0,417 V	0,006%
1/0	40	41,08 W	1,37 V	0,172%
2/0	40	32,60 W	1,05 V	0,029%
3/0	40	25,81 W	0,83 V	0,023%

1/0	200	205,4 W	6,87 V	0,883%
2/0	200	163,0 W	5,26 V	0,148%
3/0	200	129,0 W	4,17 V	0,117%

Fuente: (Propia)

3.3.5. Determinación de pérdidas en acometidas principales

Para determinar las pérdidas en acometidas principales, se toma la misma consideración con la zona de inducción Indurama 1100W (Boost), por ser la que presenta condiciones más críticas, por esta razón en el cálculo de pérdidas en conductores de acometidas principales se ha tomado las características técnicas de los conductores típicos de acometidas principales, las cuales se presentan a continuación.

Tabla 3.15. Impedancias típicas de conductores <600 Vac.

Tamaño o designación AWG / kcmil	Resistencia R (Omh/m)	Impedancia Inductiva XL @ 60Hz (Omh/m)
2	0,0005335	0,000148
4	0,0008481	0,000157
6	0,001348	0,000167
8	0,002144	0,000171
10	0,00349	0,000164

Fuente: (General Cable, 2015)

Las características técnicas de conductores se han tomado según lo disponible en el mercado nacional, dichos conductores cumplen las normativas INEN vigentes.

Siendo así, en lo que respecta a acometidas principales, hay que considerar la impedancia de conductores de cobre con aislamiento de PVC, en este segmento existen variaciones entre tipos de cable, sin embargo, las características técnicas son muy similares entre sí. Mediante la tabla a continuación, se presenta el cálculo de pérdidas a distintas medidas de acometidas, así como también, la incidencia que las cocinas de inducción representan a la calidad de la energía.

Tabla 3.16. Afectación a la calidad e incidencia en las pérdidas técnicas en la acometida principal por la acometida principal funcionamiento de una cocina de inducción a plena carga (6254 W).

Tamaño o designación AWG / kcmil	Distancia al transformador (m)	Pérdidas en red secundaria (W)	Caída de Voltaje (V)	Afectación a la forma de Voltaje THD
2	1	1,018	0,034	0,0044%
4	1	1,618	0,053	0,0048%
6	1	2,573	0,083	0,0053%
8	1	4,092	0,132	0,0061%
10	1	6,662	0,215	0,0076%
2	8,16	8.314	0.278	0,036%
4	8,16	13.217	0.434	0,039%
6	8,16	21.008	0.684	0,044%
8	8,16	33.413	1.083	0,050%
10	8,16	54.390	1.760	0,062%
2	10	10,184	0,342	0,044%
4	10	16,190	0,532	0,048%
6	10	25,733	0,838	0,054%
8	10	40,928	1,327	0,062%
10	10	66,622	2,155	0,077%
2	20	20,37	0,683	0,088%
4	20	32,38	1,064	0,096%
6	20	51,46	1,676	0,108%
8	20	81,86	2,654	0,124%
10	20	133,24	4,311	0,155%

Fuente: (Propia)

3.3.6. Determinación de pérdidas en acometidas dedicadas de cocinas de inducción

Para determinar las pérdidas en la acometida dedicada a la cocina de inducción, se toma la misma consideración con la zona de inducción Indurama 1100W (Boost), por las razones antes descritas.

Respecto a las características de los conductores, para facilitar el acceso a la energía, el Estado financia la instalación de “circuitos exprés” los cuales son cobrados a los usuarios por medio de la planilla de consumo de energía mensual, dicha instalación provee de conductores de calibre 10 AWG y la protección adecuada para la carga de la cocina.

Siendo así, en lo que respecta a acometidas dedicadas, se planteó una instalación promedio de una acometida de 15 metros como “circuito exprés”, por lo que se ha

considerado a esta medida como un estándar para este tipo de instalaciones. A continuación, en la Tabla 3.17, se presenta el cálculo de pérdidas en las acometidas dedicadas, así como también, la incidencia que las cocinas de inducción representan a la calidad de la energía.

Tabla 3.17. Afectación a la calidad e incidencia en las pérdidas técnicas en “circuito exprés” por el funcionamiento de una cocina de inducción a plena carga (6254 W).

Tamaño o designación AWG / kcmil	Distancia al transformador (m)	Pérdidas en red secundaria (W)	Caída de Voltaje (V)	Afectación a la forma de Voltaje THD
10	1	3,331	0,108	0,004%
10	10	49,967	1,616	0,057%
10	15	66,622	2,155	0,077%
10	20	83,278	2,694	0,096%

Fuente: (Propia)

4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

4.1. Conclusiones

- El nivel de potencia de salida de cada zona de inducción no es fijo en sus niveles intermedios, es decir que el ciclo de operación no presentan un valor fijo para cada nivel de potencia, de hecho esta relación de operación lo administra el control de la cocina, limitando la potencia en función de lo que permite la fuente de alimentación.
- La entrada en funcionamiento de una zona de cocción no representaría una notable caída de tensión. Los porcentajes experimentados nunca superaron el 2% respecto al voltaje nominal.
- Los valores de corriente recopilados por medio de los equipos de medición en niveles intermedios de funcionamiento, presentan problemas debido al tiempo de reposo del modo de operación S3, por lo que el análisis debe realizarse depurando estos datos.
- En todas las zonas de inducción analizadas, la relación mínima registrada, entre la corriente fundamental y la RMS, fue de 98,50% y se da en el nivel 1 de potencia, que a su vez es el de menor consumo.
- Las corrientes armónicas pares de alimentación en las zonas de inducción son, en promedio, menores al 50% de las corrientes armónicas impares consecutivas.
- La composición armónica de la corriente de alimentación, de las zonas de inducción, se reduce pero no de manera significativa en función del aumento de nivel de potencia, esto se evidencia también en el análisis de THD.
- En la corriente de alimentación de las zonas de cocción, la Distorsión de Demanda Total, TDD, se incrementa en función del aumento de nivel de potencia, gracias a esto se determinó que las características más agresivas de consumo se experimentan en los niveles máximos de potencia.
- El factor de potencia registrado en las zonas de inducción, registra un valor mínimo de 0,95 en potencias bajas, por lo que se concluye que su consumo es poco agresivo a la red, esto es concordante con las exigencias planteadas por las normativas del Servicio Ecuatoriano de Normalización, INEN.
- Las cocinas de inducción de maquila nacional analizadas, presentan similares características técnicas y cumplen con las condiciones que exige el INEN,

aunque cabe resaltar que dichas normativas no contemplan algunos aspectos técnicos y energéticos, ni contemplan condiciones mínimas de exhibición en etiquetado de los equipos.

- En las condiciones actuales de presencia de cocinas de inducción en la CNEL EP UN Guayaquil, los transformadores deberían presentar una cargabilidad máxima de 90,08%, como precaución ante el incremento de pérdidas técnicas, cabe señalar que esta alternativa es más económica respecto a la utilización de transformadores con un factor K determinado.
- En el caso extremo de que un transformador alimentara una carga correspondiente solo a cocinas de inducción, la cargabilidad máxima debería ser 71,54% o considerar transformadores con factor k igual a 2³.
- Las pérdidas en transformadores no se relacionan directamente con el incremento de TDD, debido a que las corrientes armónicas incrementan las pérdidas en proporción al cuadrado del orden de armónica al que pertenecen.
- Con base en las mediciones, análisis realizados e información de la CNEL EP UN Guayaquil, la incorporación de las cocinas de inducción ha representado un incremento en el consumo de 11.689,72 kWh mensuales, lo que representa un 2,89% de la energía distribuida a clientes regulados de la Unidad de Negocio,
- La afectación a la calidad de producto alcanzaría, en casos extremos, un aumento de THD de 2,12% en voltaje, por transformador.

³ Situación poco probable, debido a que el 22 de septiembre de 2018 el Gobierno anunció que ya no impulsará plan de cocinas de inducción (ECUAVISA, 2018).

4.2. Recomendaciones

- Debido a la naturaleza del modo de operación utilizado en el control de la potencia, se recomienda que en futuros análisis y estudios, se realice una depuración de los datos recopilados obviando los valores del tiempo en reposo dentro del ciclo de operación.
- Los resultados se han adquirido en condiciones de una población 100% urbana y cocinas de maquila nacional, si se desea replicar esta investigación, se recomienda variar estas condiciones, así como también verificar los comportamientos transitorios de las cocinas.
- En el mercado existe un sin número de cargas no lineales sobre las cuales se podría realizar análisis similares. De hecho la incorporación de cargas electrónicas como televisores y fuentes conmutadas representan un conjunto cuyo consumo es bajo, pero que son altamente demandados.
- Se recomienda el uso de estas cocinas no solo por su mayor eficiencia, cabe señalar que contribuye notablemente al menor consumo pues representan una menor carga térmica en ambientes climatizados, creando ahorros indirectos. Esto se verifica especialmente en la región costa.
- Es necesaria una planificación energética, con políticas y programas a nivel nacional que contemple de forma integral tanto la generación de energía, su consumo y su gestión.
- Se recomienda establecer programas de verificación de parámetros técnicos de equipos comercializados en el Ecuador, esto implica el establecimiento de laboratorios especializados o convenios con laboratorios internacionales para corroborar la calidad necesaria. Al igual que en el punto anterior, de forma integral debe llevarse campañas de etiquetado de equipos eléctricos y electrónicos.

5. BIBLIOGRAFÍA

- [1]. Agencia de Regulación de Electricidad, ARCONEL. (15 de julio de 2018). Sistematización de Datos del Sector Eléctrico. Ecuador.
- [2]. Balcells, J. (2001). *Calidad de la red eléctrica: ¿cómo medirla?* Barcelona: Universitat Politècnica de Catalunya.
- [3]. Consejo Nacional de Electricidad, CONELEC. (2001). *Regulación Nro. CONELEC 004/01, Calidad de Servicio Eléctrico de Distribución*. Quito: CONELEC.
- [4]. E. Cushicondor, D. (2009). *Diseño y construcción de un prototipo de una cocina de inducción electromagnética*. Quito: Escuela Politécnica Nacional.
- [5]. ECUAVISIA. (22 de septiembre de 2018). www.ecuavisa.com. Obtenido de <https://www.ecuavisa.com/articulo/noticias/nacional/418196-gobierno-ya-no-impulsara-plan-cocinas-induccion>
- [6]. EL TELEGRAFO. (17 de noviembre de 2018). www.eltelegrafo.com.ec. Obtenido de <https://www.eltelegrafo.com.ec/noticias/sociedad/6/guayaquil-uso-cocinas-induccion>
- [7]. Enríquez, G. (1999). *El ABC de la Calidad de Energía Eléctrica*. Noriega, Limusa.
- [8]. General Cable. (2015). *Cables para Transmisión y Distribución de Energía*. México: General Cable de México.
- [9]. González, J. M. (2012). *Contribución a técnicas de modelado y reducción de EMI en sistemas multiconvertidor*. Barcelona: Universitat Politècnica de Catalunya.

- [10]. Guevara Hernandez, M. d. (2011). *Calidad de Energía Eléctrica*. México: Universidad Nacional Autónoma de México.
- [11]. Hernández, M. G. (2011). *Calidad de Energía Eléctrica*. México: Universidad Nacional Autónoma de México.
- [12]. Indurama. (16 de junio de 2018). Obtenido de <https://www.indurama.com/categorias-productos/encimeras-inducci%C3%B3n>
- [13]. Instituto Ecuatoriano de Normalización. (2012). *Procedimiento de muestreo para inspección por atributos. Parte 1. Programas de Muestreo clasificados por el nivel aceptable de calidad (AQL) para inspección de lote a lote*. Quito, Ecuador: INEN.
- [14]. Instituto Ecuatoriano de Normalización, I. (2010). *Norma Técnica Ecuatoriana NTE INEN 2 567:2010. Eficiencia energética en cocinas de inducción de uso doméstico*. Quito, Ecuador.
- [15]. Instituto Ecuatoriano de Normalización, INEN. (2010). *Norma Técnica Ecuatoriana, NTE INEN 2555:2010 Seguridad en Cocinas de Inducción. Requisitos*. Quito, Ecuador.
- [16]. International Electrotechnical Commission, IEC. (2002). *IEC-61000-4-7, Electromagnetic compatibility (EMC) – Part 4-7: Testing and measurement techniques*. IEC.
- [17]. Laborelec, J. C. (2014). *APPLICATION NOTE INDUCTION HEATING*. European Copper Institute.
- [18]. Mabe. (18 de junio de 2018). *Mabe*. Obtenido de <http://www.mabe.com.ec/cubiertas/detail/cubierta-inducci%C3%B3n-60cm-negra-mabe-3>

[19]. Puche, R. (2012). *Aplicación industrial de motores de inducción. Clases de servicio*. Valencia, España: Universidad Politécnica de Valencia.

6. ANEXOS

Anexo 01. Datos de placa de cocinas de inducción utilizadas

Anexo 02. Componentes armónicas de corriente

Anexo 03. Análisis de normativa vigente

Anexo 01. Datos de placa de cocinas de inducción utilizadas

Cocina de Inducción Mabe CMI6054SD

Mediante la Figura 6.1. se muestra a la Cocina de Inducción Mabe CMI6054SD la cual tiene una potencia nominal de 3500 W y una máxima de 4000 W al activar el amplificador de potencia “Booster”, el cual puede ser activado por un máximo de 10 minutos. Tiene cuatro zonas inductivas, tres de 16 centímetros de diámetro y una potencia de 1200 W (1500 W booster) y una de 25 centímetros de diámetro y una potencia de 1600 W (2200 W booster).

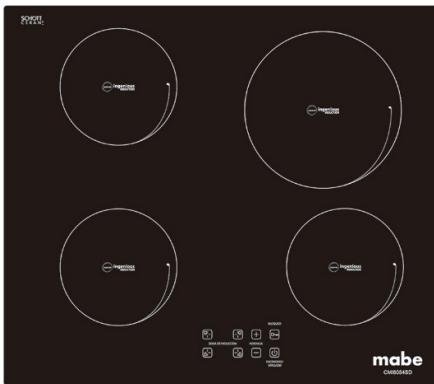


Figura 6.1. Cocina de Inducción Mabe CMI6054SD.
Fuente: (Mabe, 2018)

Otros modelos de cocinas de la misma marca se presentan zonas de igual potencia, variando solamente el número de zonas de inducción y la potencia total de la cocina, llegando a ser hasta de 7200 W, como se muestra en la Figura 6.2.



Figura 6.2. Datos de placa de cocina MABE.
Fuente: Cocina MABE)

Cocina de inducción Indurama EI – 4PVI60

La cocina de inducción Indurama EI – 4PVI60, Figura 6.3, tiene una potencia nominal de 6300 W al activar el amplificador de potencia “Booster”, el cual puede ser actuar por un máximo de 10 minutos. Tiene cuatro zonas de cocción: una de 16 centímetros de diámetro y una potencia de 1100 W (1400 W booster), dos de 16 centímetros de diámetro y 1400 W de potencia y una de 25 centímetros de diámetro y una potencia de 1850 W (2100 W booster), (Indurama, 2018).



Figura 6.3. Cocina de inducción Indurama EI – 4PVI60.
Fuente: (Indurama, 2018)

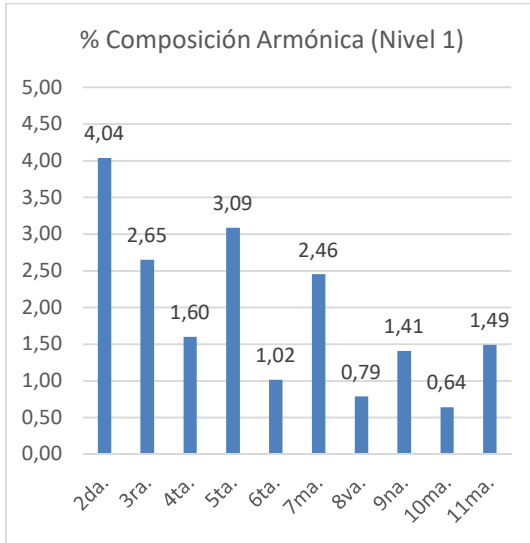
Al igual que Mabe, Indurama presenta zonas de cocción de igual potencia en otros modelos de sus cocinas, variando solamente el número de zonas de cocción y la potencia total, A continuación se presenta, en la Figura 6.4. los datos de placa de las cocinas de inducción Indurama.

Voltaje: 220 V _{ca}	Frecuencia: 50/60 Hz	CÓDIGO DE TRAZABILIDAD
Potencia Instalada Inductores: I1 = 1100/1400 W I2 = 1400 W I3 = 1850/2100 W I4 = 1400 W Para cada inductor: Primer valor potencia nominal. Valor siguiente potencia con booster.		 702401221124
Potencia Máxima Tableta Inducción (Considerado potencia con booster) 6300 W		NÚMERO DE SERIE  E00025651701221124
Tipo de equipo: Encimera de inducción para empotrar.		EI4021 
Aparato Clase I	Fijación tipo Y	7 861041 135570 Cualquier alteración de este sello ANULA LA GARANTIA
Corriente máxima Encimera Inducción 28,6 A		
FABRICADO POR INDUCLOR S.A. HECHO EN ECUADOR RUC : 0190061264001 Dirección : Av. Don Bosco y Av. Américas esquina. Cuenca - Ecuador Este aparato no está destinado para ser usado por personas (incluidos niños) cuyas capacidades físicas, sensoriales o mentales estén reducidas, o carezcan de experiencia o conocimiento, salvo si han tenido supervisión o instrucciones relativas al uso del aparato por una persona responsable de su seguridad. Los niños deberían ser supervisados para asegurar que no juegan con el aparato.		
INDURAMA (ECU) MODELO EI - 4PVI60		

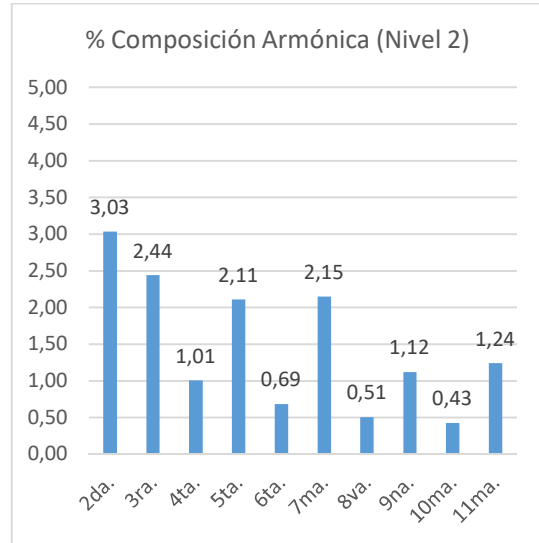
Figura 6.4. Datos de placa de cocina Indurama.
Fuente: (Cocina Indurama)

Anexo 02. Componentes armónicas de corriente

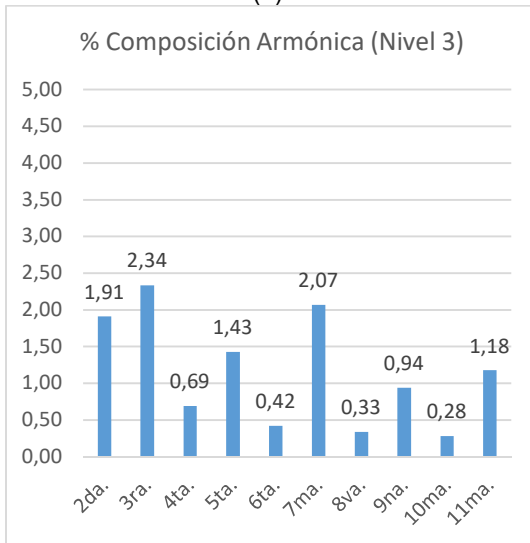
Composición armónica en corriente a distintos niveles de potencia, Mabe 16 booster



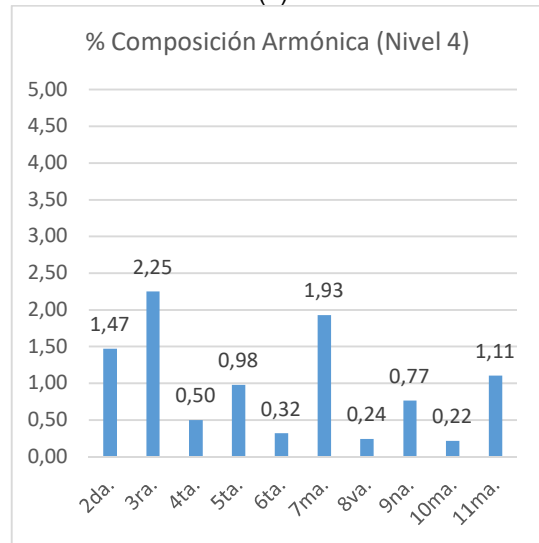
(a)



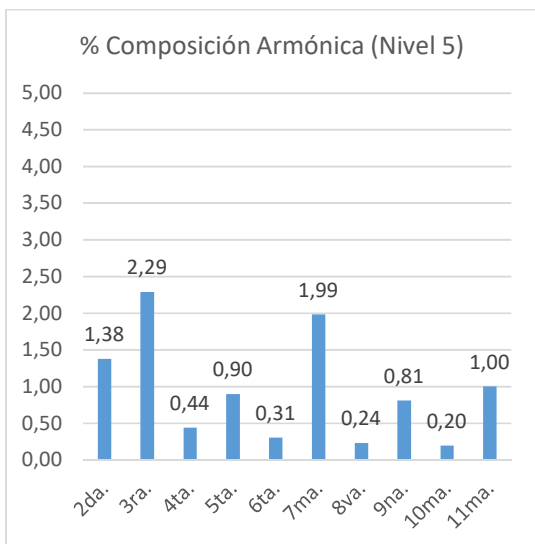
(b)



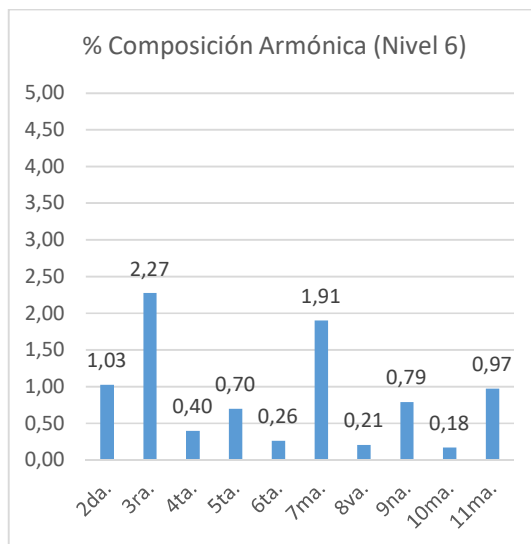
(c)



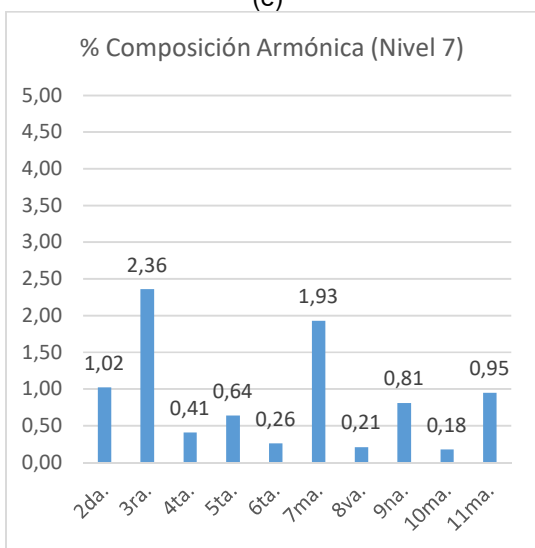
(d)



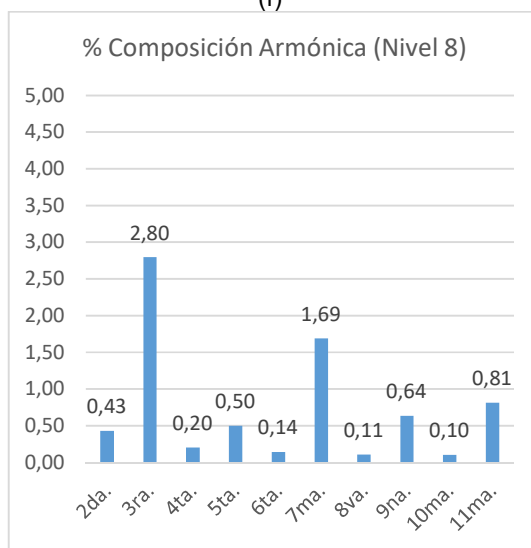
(e)



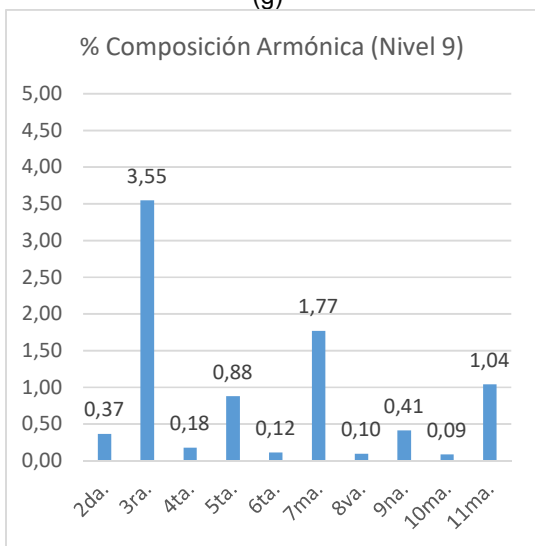
(f)



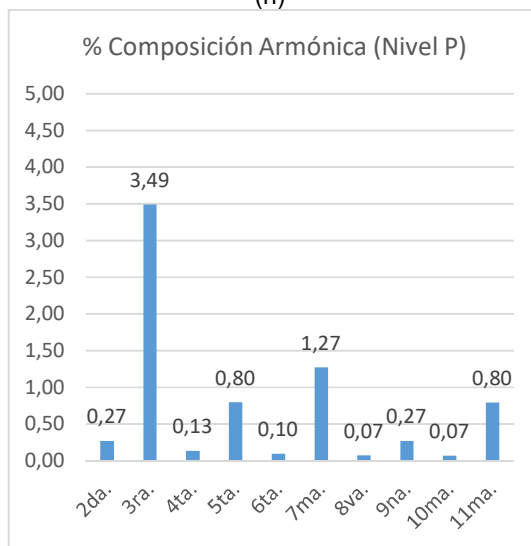
(g)



(h)

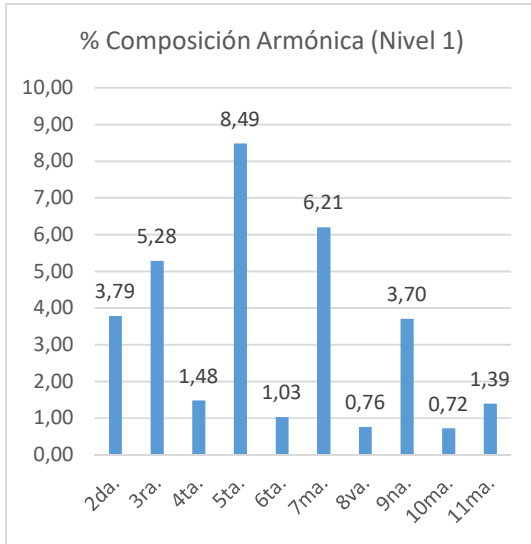


(i)

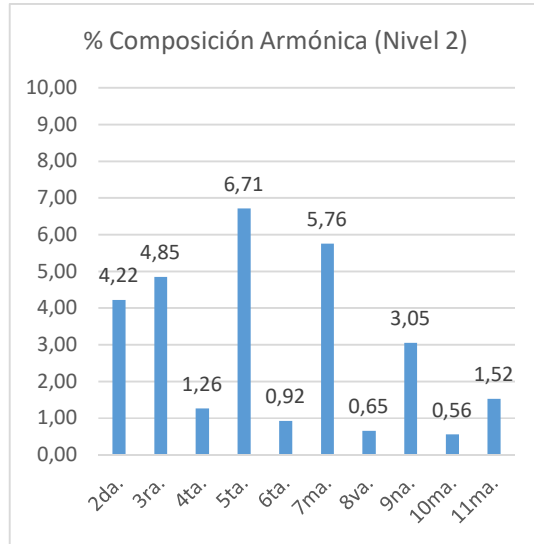


(j)

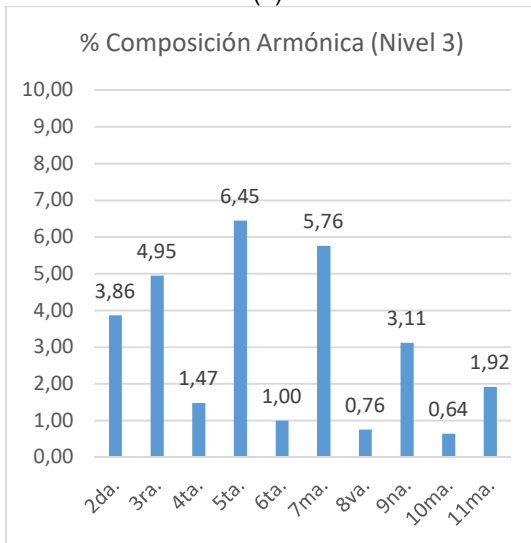
Composición armónica en corriente a distintos niveles de potencia, Mabe 25 booster



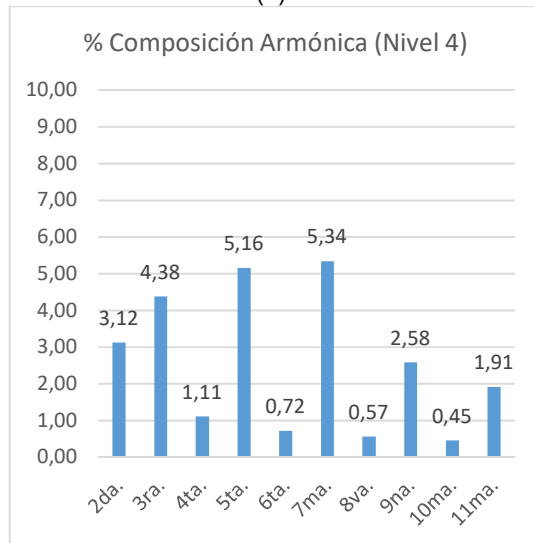
(a)



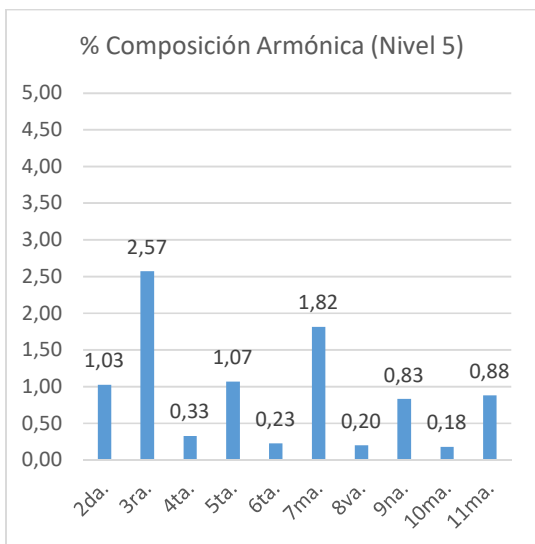
(b)



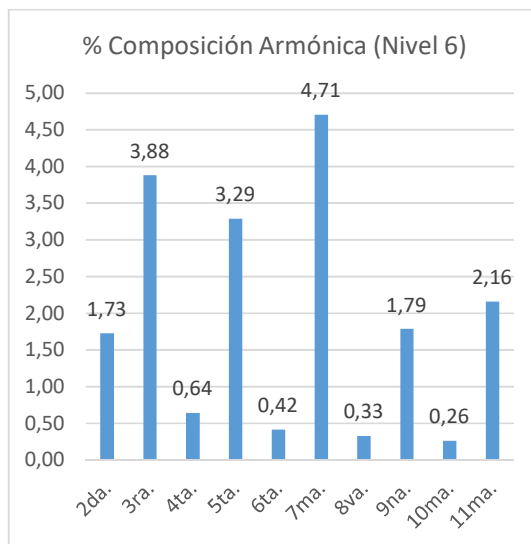
(c)



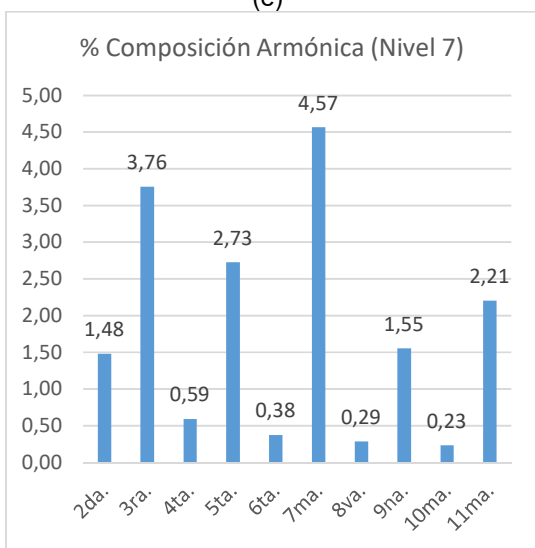
(d)



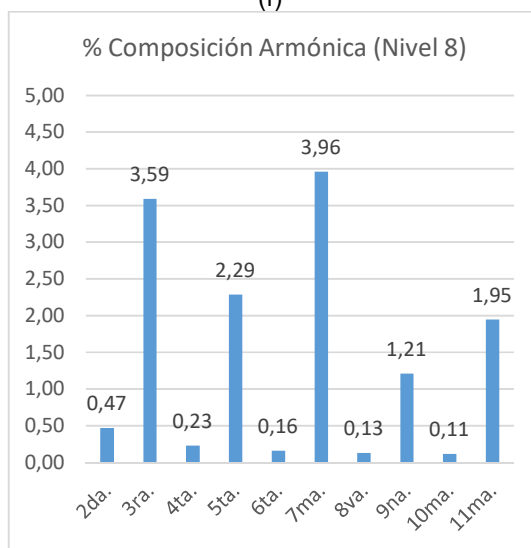
(e)



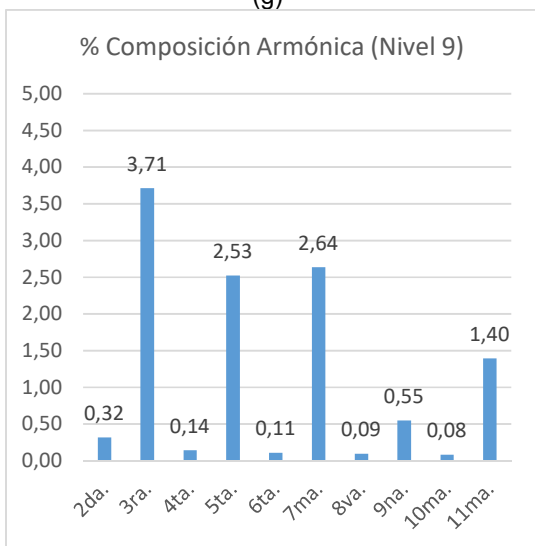
(f)



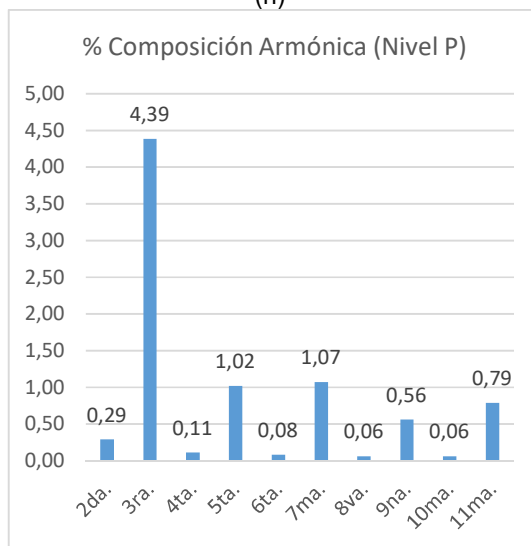
(g)



(h)

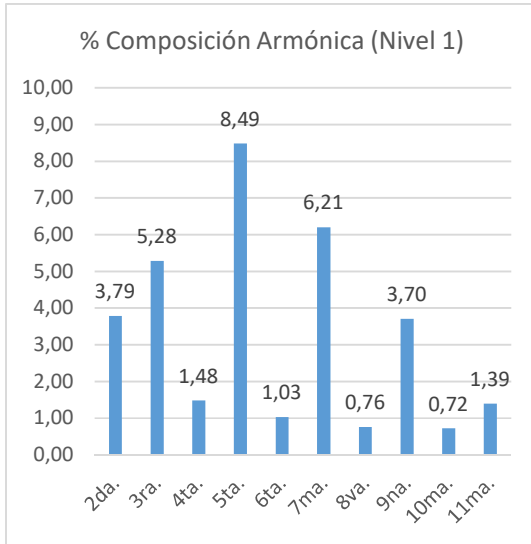


(i)

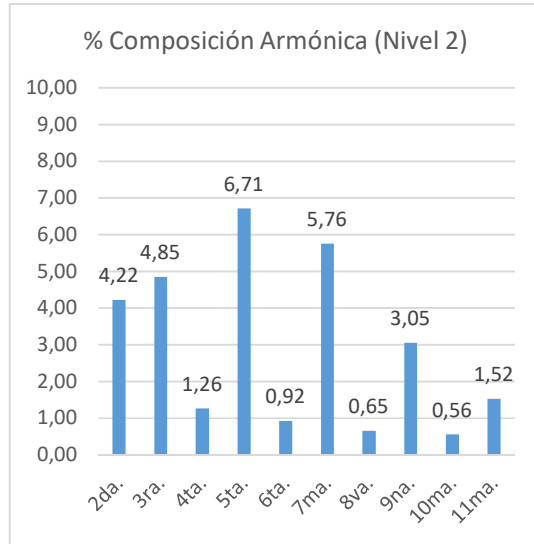


(j)

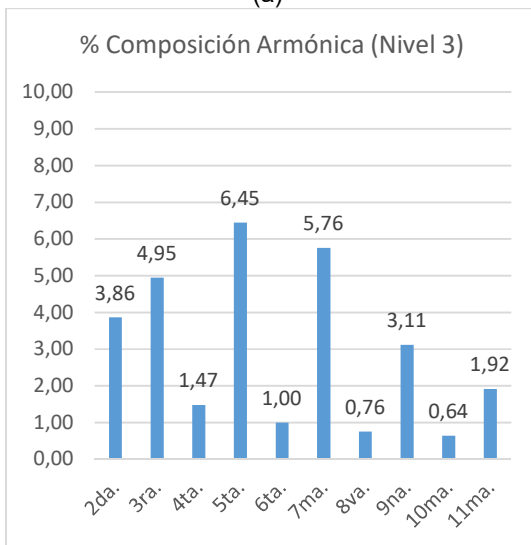
Composición armónica en corriente a distintos niveles de potencia, Indurama 1400 W



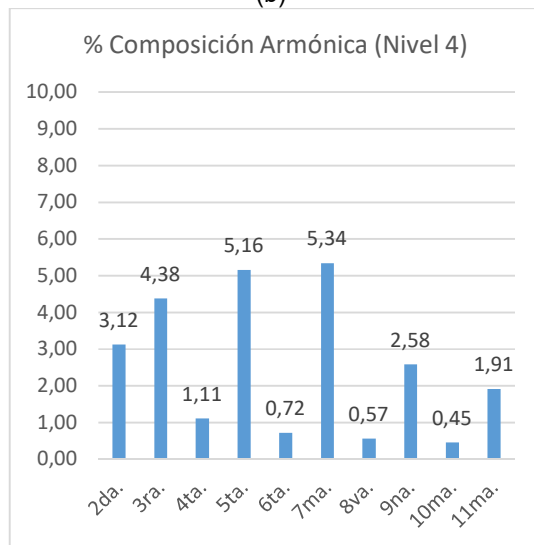
(a)



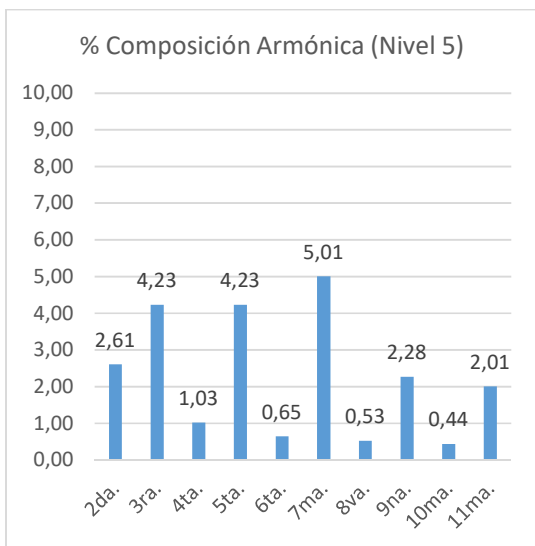
(b)



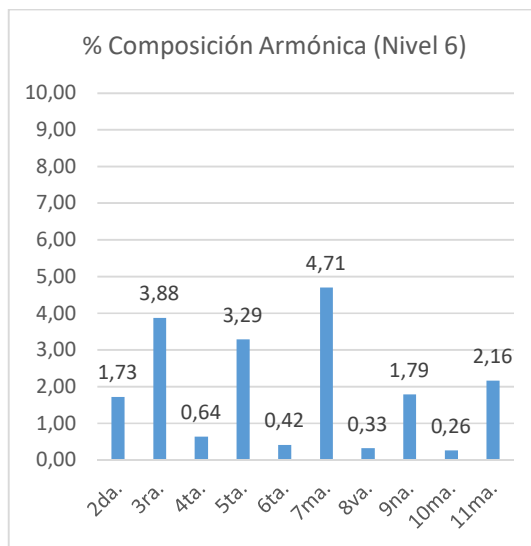
(c)



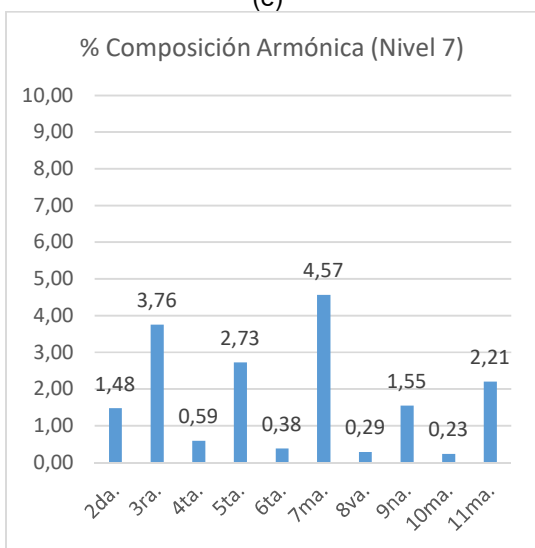
(d)



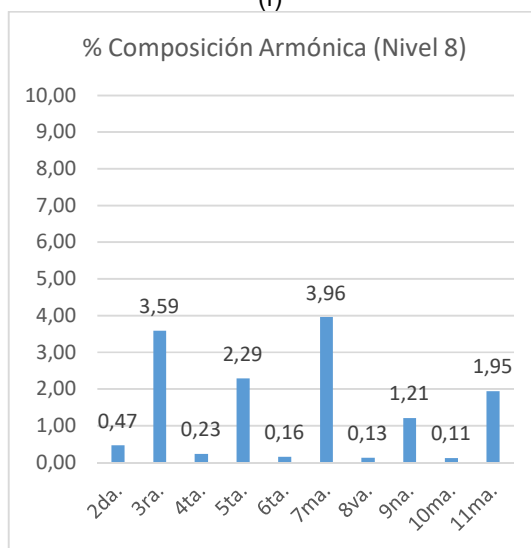
(e)



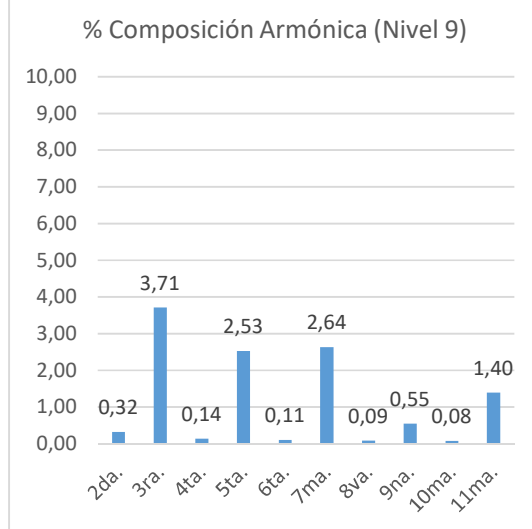
(f)



(g)

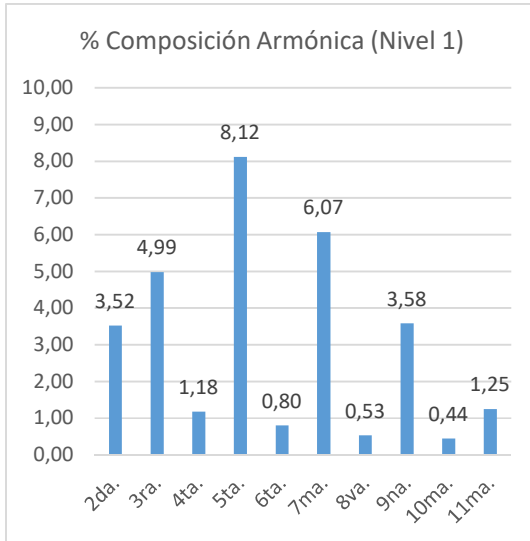


(h)

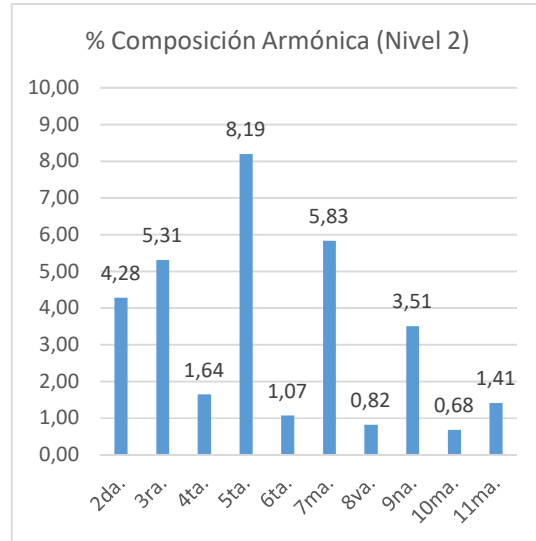


(i)

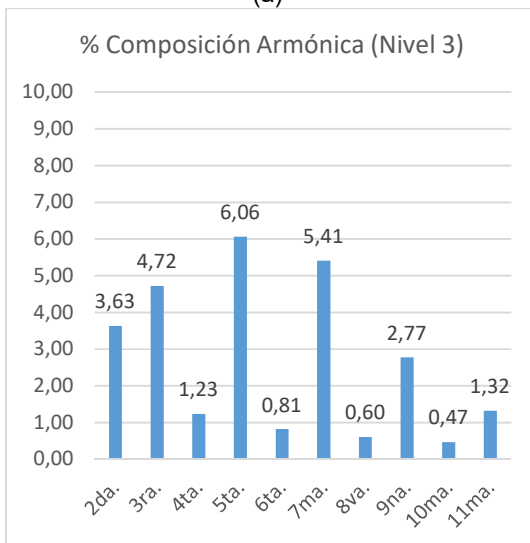
Composición armónica en corriente a distintos niveles de potencia, Indurama 1100 W (Boost)



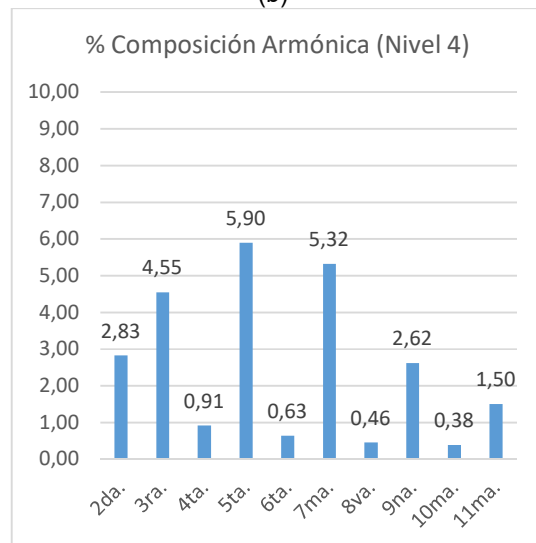
(a)



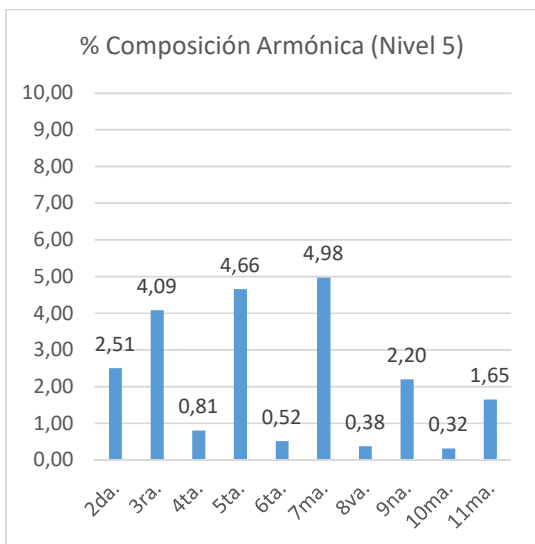
(b)



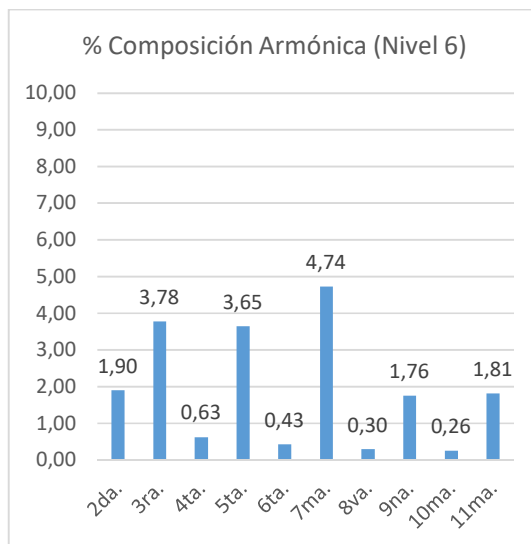
(c)



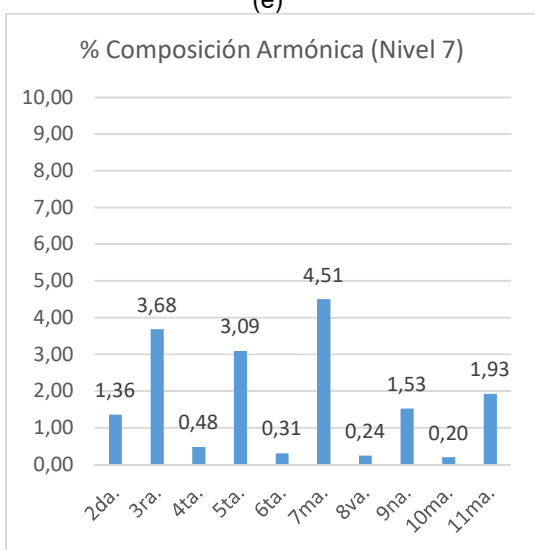
(d)



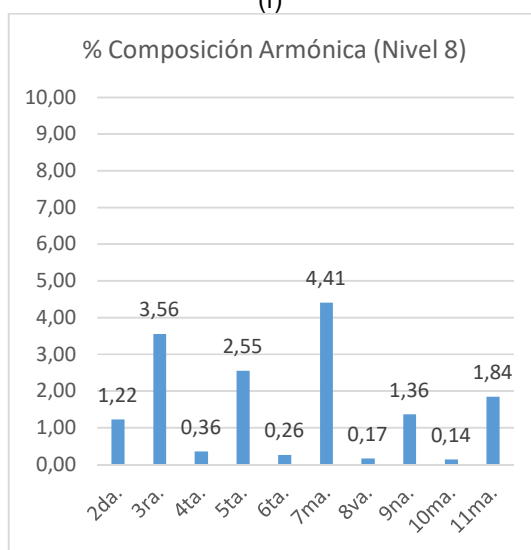
(e)



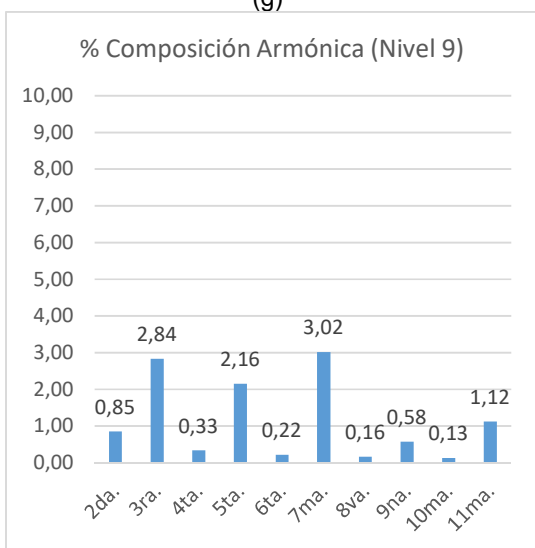
(f)



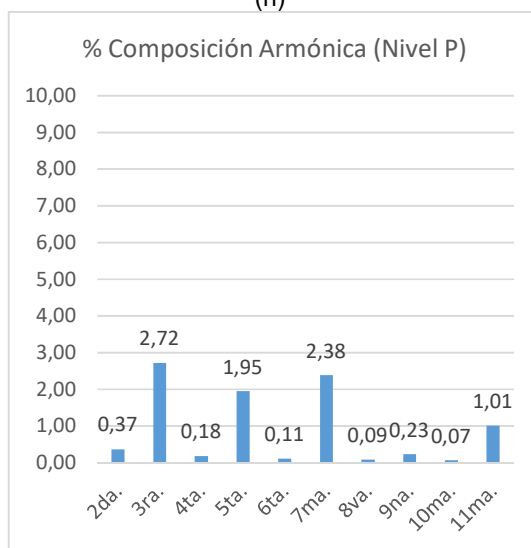
(g)



(h)

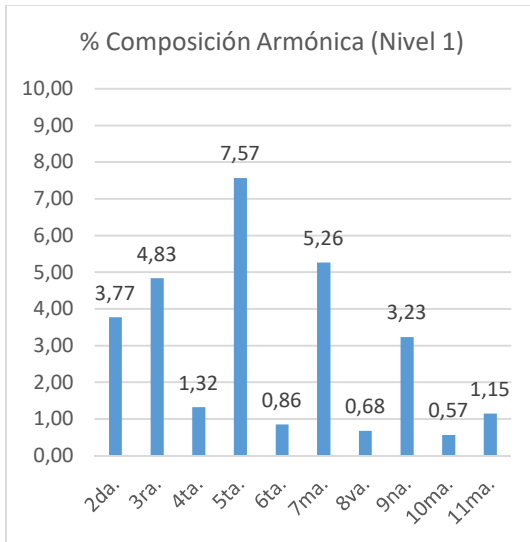


(i)

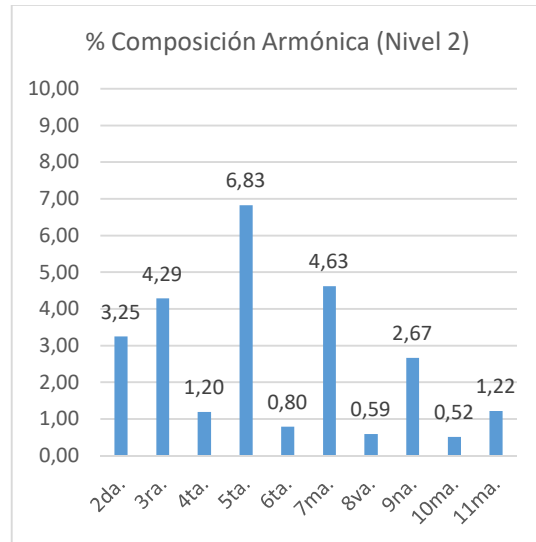


(j)

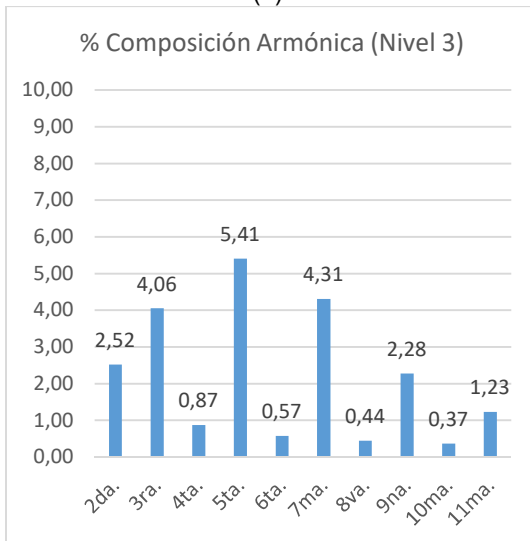
Composición armónica en corriente a distintos niveles de potencia, Indurama 1850 W (Boost)



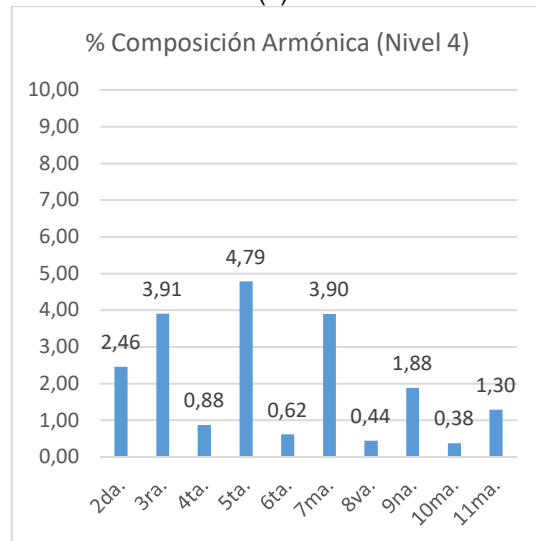
(a)



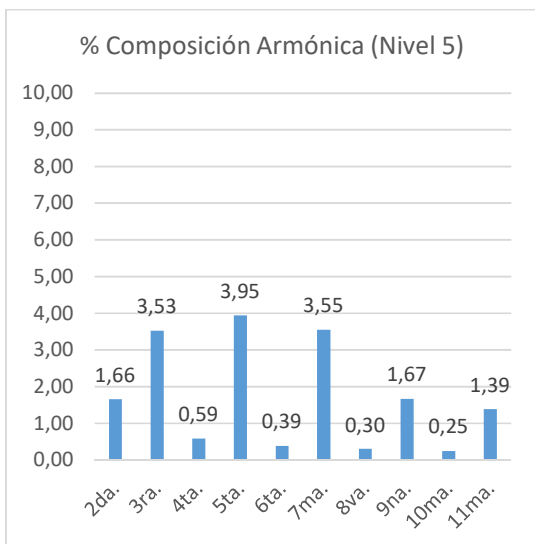
(b)



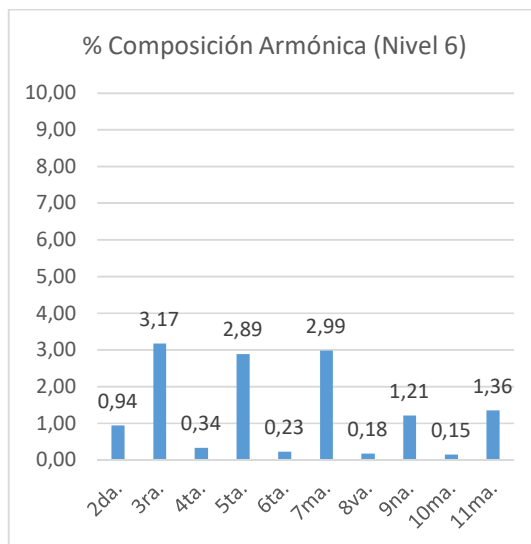
(c)



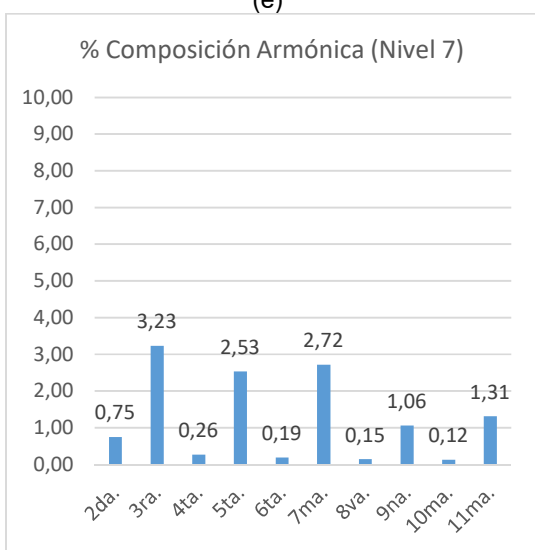
(d)



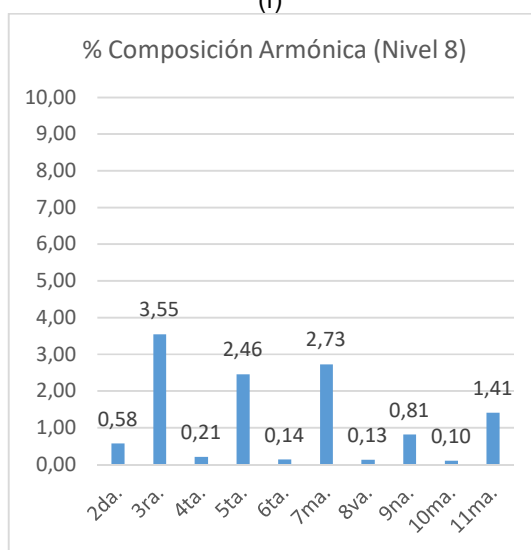
(e)



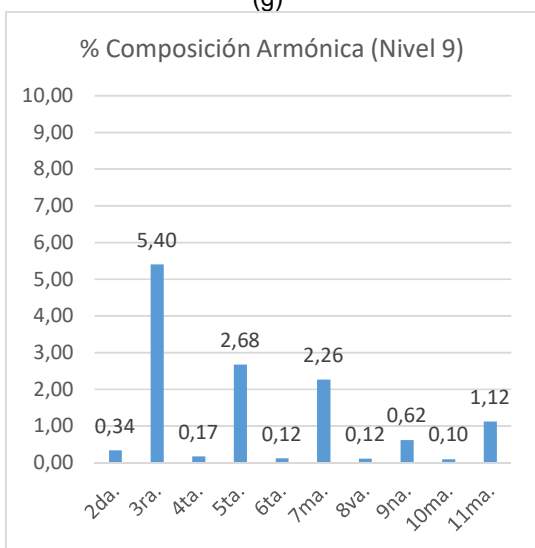
(f)



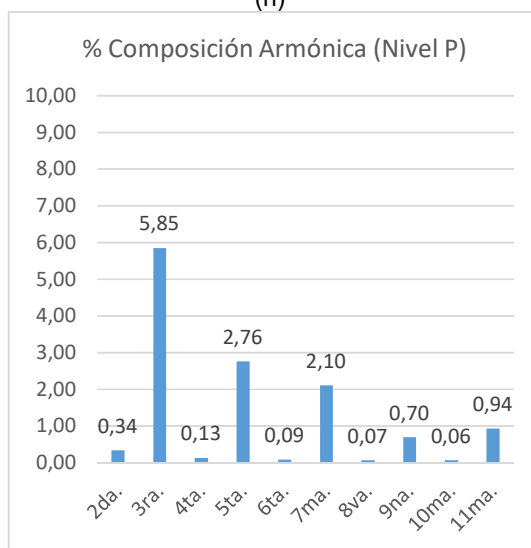
(g)



(h)



(i)



(j)

Anexo 03. Análisis de normativa vigente

1. Análisis de la Regulación Nro. CONELEC 004/01, Calidad de servicio eléctrico

La Regulación CONELEC 004/01, aprobada el 23 de mayo de 2001, forma parte de las regulaciones de la Agencia de Regulación y Control de Electricidad, ARCONEL, organismo encargado de controlar y regularizar a los actores de sector eléctrico nacional⁴.

El objetivo de esta regulación es establecer los niveles de calidad de la prestación del servicio eléctrico de distribución y los procedimientos de evaluación a ser observados por parte de las empresas distribuidoras.

Si bien, la Regulación Nro. CONELEC 004/01 contempla aspectos de calidad del producto, calidad de servicio técnico y calidad de servicio comercial, a continuación se presenta el análisis de la regulación enfocado a aspectos generales y a la calidad de producto.

1.1. Aspectos Generales

Es importante señalar que la normativa establece que el Distribuidor debe implementar y mantener una base de datos con la información sobre los componentes de la red asociados a la alimentación eléctrica de cada consumidor, esto es:

- Red de alto voltaje (subtransmisión)
- Subestación de distribución AV/MV
- Circuito de medio voltaje (alimentadores)
- Transformadores MV/BV
- Red de distribución en bajo voltaje
- Acometidas (identificación del usuario, número de suministro)

⁴ Actualmente, la ARCONEL está trabajando en la actualización de esta normativa, misma que se espera que se emita en diciembre de 2018 e inicios de 2019. Debido dicha regulación aún está sometida a cambios, no es posible hacer el análisis respecto a ella.

Adicionalmente, la ARCONEL mantiene el Sistema de Datos del Sector Eléctrico, SISDAT, donde las empresas del sector eléctrico cargan reportes de sus índices técnicos y comerciales.

1.1.1. Calidad de producto

El numeral 2. Calidad de producto, de la regulación CONELEC 004/01, señala lo siguiente:

...Los aspectos de calidad del producto técnico que se controlarán son el nivel de voltaje, las perturbaciones y el factor de potencia, siendo el Distribuidor responsable de efectuar las mediciones correspondientes, el procesamiento de los datos levantados, la determinación de las compensaciones que pudieran corresponder a los consumidores afectados y su pago a los mismos. Toda la información deberá estar a disposición del CONELEC al momento que se le requiera...

Cabe resaltar que la regulación actualmente se enfoca a solo tres aspectos de la calidad del producto como son: nivel de voltaje, las perturbaciones y el factor de potencia, pero el producto que la distribuidora ofrece no se limita a voltaje, sino que es en sí energía eléctrica, por lo cual debería enfocarse de forma integral a la corriente y el voltaje, y supervisar demás aspectos que definen la calidad de energía como son: fenómenos transitorios, desbalances, variación de la frecuencia, cargabilidad de transformadores, entre otros.

En este sentido, para garantizar la calidad de energía, la responsabilidad de la empresa distribuidora es entregar una onda sinusoidal simétrica a valor nominal y a 60 Hz, mientras que es responsabilidad del usuario las características de la forma de onda de corriente.

Sin embargo, tanto en voltaje como en corriente, la responsabilidad recae en la empresa de distribución al considerar la calidad de energía a la salida de transformadores de distribución y barras de salida de subestaciones.

Nivel de Voltaje

El numeral 2.1.1. Índice de calidad, de la regulación CONELEC 004/01, señala lo siguiente:

...

Índice de Calidad

$$\Delta V_k(\%) = \frac{V_k - V_n}{V_n} * 100 \quad \text{Ecuación 6.1}$$

Donde:

ΔV_k : variación de voltaje, en el punto de medición, en el intervalo k de 10 minutos.

V_k : voltaje eficaz (rms) medido en cada intervalo de medición k de 10 minutos.

V_n : voltaje nominal en el punto de medición...

El nivel de voltaje solo es evaluado en su valor RMS dentro de la regulación, cabe señalar que otras variables que definen al voltaje y que no están siendo evaluados, como son: simetría de la onda, valor pico, factor de forma, frecuencia, entre otras

El numeral 2.1.2. Mediciones, de la regulación CONELEC 004/01 (replicado en los numerales 2.2.1.2. y 2.2.2.2.) señala lo siguiente:

...

2. Para la selección de los puntos se considerarán los niveles de voltaje, el tipo de zona (urbana, rural), y la topología de la red, a fin de que las mediciones sean representativas de todo el sistema. Una vez realizada la selección de los puntos, la Empresa Distribuidora debe notificar al CONELEC, por lo menos 2 meses antes de efectuar las mediciones...

Un aspecto a observar es que no se especifica la relación mínima entre el número de mediciones a realizar en sectores rurales y urbanos, debido a ello se encuentra que predominan los de zonas urbanas, en los reportes cargados por las empresas distribuidoras en el sistema repositorio de datos de la ARCONEL, SISDAT.

El numeral 2.1.3. Límites, de la regulación CONELEC 004/01, señala lo siguiente:

...

El Distribuidor no cumple con el nivel de voltaje en el punto de medición respectivo, cuando durante un 5% o más del período de medición de 7 días continuos, en cada mes, el servicio lo suministra incumpliendo los límites de voltaje.

Las variaciones de voltaje admitidas con respecto al valor del voltaje nominal se señalan a continuación:

	Subetapa 1	Subetapa 2
Alto Voltaje	± 7,0 %	± 5,0 %
Medio Voltaje	± 10,0 %	± 8,0 %
Bajo Voltaje. Urbanas	± 10,0 %	± 8,0 %
Bajo Voltaje. Rurales	± 13,0 %	± 10,0 %

...

Actualmente, para cumplir con la normativa, es necesario y suficiente cumplir con que dentro de un 95% del tiempo, el voltaje presente variaciones por debajo de los niveles admitidos, sin embargo, es necesario establecer incumplimientos debido a la severidad de la variación, por ejemplo:

Actualmente, un transformador que presente un voltaje 50% por debajo de su valor nominal por un lapso de 4 horas cumpliría con la normativa, mientras que un transformador con un voltaje 11% por debajo de su valor nominal durante un día no la cumpliría, cabe señalar que, el primero de los casos presenta condiciones más dañinas para el sistema.

Perturbaciones

El numeral **2.2.2.1. Índices de calidad de armónicos**, de la regulación CONELEC 004/01, señala lo siguiente:

...

$$V'_i = \left(\frac{V_i}{V_n} \right) * 100 \quad \text{Ecuación 6.2}$$

$$THD = \left(\frac{\sqrt{\sum_{i=2}^{40} (V_i)^2}}{V_n} \right) * 100 \quad \text{Ecuación 6.3}$$

Donde:

V'_i: factor de distorsión armónica individual de voltaje.

THD: factor de distorsión total por armónicos, expresado en porcentaje

V_i: valor eficaz (rms) del voltaje armónico "i" (para i = 2... 40) expresado en voltios.

V_n: voltaje nominal del punto de medición expresado en voltios...

Para garantizar la calidad de energía, la responsabilidad de la empresa distribuidora es entregar una onda sinusoidal simétrica a valor nominal y a 60 Hz, mientras que es responsabilidad del usuario las características de la forma de onda de corriente, por lo cual hay un cierto grado de resistencia a la evaluación de variables correspondientes a la corriente.

Sin embargo, tanto en voltaje como en corriente, la responsabilidad recae en la empresa de distribución, al considerar la calidad de energía a la salida de transformadores de distribución y barras de salida de subestaciones, por lo cual es necesario plantear niveles de calidad en lo correspondiente a las perturbaciones en la corriente.

Si bien la corriente no puede ser controlada por la empresa distribuidora, pues es la carga la que la define, sus perturbaciones pueden reflejarse en niveles superiores de voltaje, en donde las perturbaciones pueden ser más nocivas y su tratamiento más costoso.

Una característica de las perturbaciones en armónicos es que naturalmente, se transmiten por el camino de menor resistencia y este puede encontrarse en las instalaciones de un usuario no contaminante, en consecuencia, puede darse daños en equipos cuya responsabilidad recaería en la empresa de distribución.

El numeral **2.2.2.3. Límites en Armónicos**, de la regulación CONELEC 004/01, señala lo siguiente:

...

Los valores eficaces (rms) de los voltajes armónicos individuales (V_i') y los THD, expresados como porcentaje del voltaje nominal del punto de medición respectivo, no deben superar los valores límite (V_i' y THD') señalados a continuación. Para efectos de esta regulación se consideran los armónicos comprendidos entre la segunda y la cuadragésima, ambas inclusive.

ORDEN (n) DE LA ARMONICA Y THD	TOLERANCIA $ V_i' $ o $ THD' $ (% respecto al voltaje nominal del punto de medición)	
	V > 40 kV (otros puntos)	V ≤ 40 kV (trafos de distribución)
Impares no múltiplos de 3		
5	2.0	6.0
7	2.0	5.0
11	1.5	3.5
13	1.5	3.0
17	1.0	2.0
19	1.0	1.5
23	0.7	1.5
25	0.7	1.5
> 25	$0.1 + 0.6*25/n$	$0.2 + 1.3*25/n$
Impares múltiplos de tres		
3	1.5	5.0
9	1.0	1.5
15	0.3	0.3
21	0.2	0.2
Mayores de 21	0.2	0.2
Pares		
2	1.5	2.0
4	1.0	1.0
6	0.5	0.5
8	0.2	0.5
10	0.2	0.5
12	0.2	0.2
Mayores a 12	0.2	0.5
THD	3	8

...

Se reitera lo observado respecto a la relación mínima entre el número de mediciones a realizar en sectores rurales y urbanos, y los distintos niveles de voltaje, puesto que, debido a ello se encuentra que en los reportes cargados por las distribuidoras en el SISDAT predominan los de zonas urbanas y, el índice THD, solo se evalúa en transformadores de distribución.

Factor de potencia

El numeral **2.3.2. Medición**, de la regulación CONELEC 004/01, señala lo siguiente:

...

Adicionalmente a las disposiciones que constan en el artículo 12 del Reglamento de Suministro del Servicio de Electricidad⁵, el Distribuidor efectuará registros del factor de potencia en cada mes, en el 2% del número de Consumidores servidos en AV y MV. Las mediciones se harán mediante registros en períodos de 10 minutos, con régimen de funcionamiento y cargas normales, por un tiempo no menor a siete (7) días continuos.

...

El factor de potencia es uno de los índices que no solo depende del voltaje de la red de distribución, sino también, de la corriente demandada por el consumidor. En este sentido, es responsabilidad de la empresa de distribución, hacer que los consumidores especiales mantengan un nivel adecuado de factor de potencia, penalizarlos si estos no cumplieren y realizar trabajos correctivos, con cargo al consumidor, para lograr los parámetros establecidos.

Sin embargo, es importante que la empresa distribuidora, dé cumplimiento a los niveles de factor de potencia aceptables a la salida de transformadores de distribución y barras de salida de subestaciones, puesto que en dichos puntos no se puede generar una responsabilidad al usuario.

Adicionalmente, un bajo factor de potencia puede generar problemas más graves y costosos al incidir en las redes de subtransmisión, transmisión y sistemas de generación. Por lo cual, en regulaciones vigentes de otros países como Brasil, Chile y Australia los factores de potencia exigidos en los puntos de conexión dependen del nivel de tensión en donde se realice la conexión, es decir, estas regulaciones establecen rangos de factores de potencia dependientes del nivel de tensión. Aquí

⁵ El artículo 12 del Reglamento de Suministro del Servicio de Electricidad emitido el 11 de febrero de 1999, fue sustituido por el artículo 11 del Reglamento Sustitutivo del Reglamento de Suministro del Servicio De Electricidad, del 10 de noviembre de 2005

existe una gran diferencia frente al caso de Ecuador en donde el factor de potencia no está asociado al voltaje del punto de conexión.

Por ejemplo, para el caso Chileno, la normativa establece los siguientes rangos permisibles en donde V_n indica voltaje nominal en el punto de conexión y fp factor de potencia:

- Para conexiones a $V_n \geq 200$ kV, el requerimiento de fp está entre 0.98 inductivo $\leq fp \leq 1.0$
- Para conexiones entre 100 kV $\leq V_n < 200$ kV, el requerimiento de fp está entre 0.98 inductivo $\leq fp \leq 0.995$ capacitivo
- Para conexiones entre 30 kV $\leq V_n < 100$ kV, el requerimiento de fp está entre 0.96 inductivo $\leq fp \leq 0.98$ capacitivo
- Para conexiones a $V_n < 30$ kV, el requerimiento de fp está entre 0.93 inductivo $\leq fp \leq 0.96$ capacitivo.

También, en regulaciones como la argentina y la española, las condiciones del factor de potencia cambian con la cargabilidad del sistema. Por ejemplo, en el caso de España, se definen tres franjas horarias (punta, valle y llano) con diferentes requerimientos de factor de potencia.

1.2. Análisis de la Norma técnica Ecuatoriana NTE INEN 2 555:2010 Seguridad en cocinas de inducción

Alcance. *Esta norma se aplica a todas las cocinas de inducción de uso doméstico, de tensión nominal no superior a 250 V, que se comercialicen en el Ecuador, (Instituto Ecuatoriano de Normalización, INEN., 2010).*

Esta norma no aplica a cocinas mixtas, a gas, eléctricas y de inducción de frecuencia de línea de uso doméstico.

Definición, Cocina de inducción. *Es un tipo de cocina vitrocerámica que tiene una o más zonas de cocción que calienta directamente el recipiente en vez de calentar la vitrocerámica y transfiere el calor al recipiente.*

Estas cocinas utilizan un campo magnético alternante que magnetiza el material ferromagnético del recipiente en un sentido y en otro. Este proceso transfiere energía que, en forma de calor, calientan el recipiente.

La normativa NTE INEN 2 555:2010, prioriza las seguridades hacia el usuario, por lo que desde el punto de vista eléctrico – electrónico plantea requisitos y limitantes alineadas hacia este objetivo, destacándose los numerales que se describen a continuación:

Disposición General 4.2. (...) *Se deberá tomar en consideración los requerimientos establecidos en el Capítulo 665 del CPE-19 Código Eléctrico Nacional.*

Requisito específico 5.1.1. *La cocina de inducción debe incluir un cable de alimentación. Si la conexión va a funcionar en el rango de operación de 120 V se debe incluir un enchufe Tipo A o Tipo B. Si la carcasa es de material metálico el enchufe necesariamente debe ser de tipo B.*

Requisito específico 5.1.3.3 (...) *No debe ser posible tocar partes activas. Una parte accesible no es considerada como activa si la parte está alimentada a una muy baja tensión de seguridad, con tal que el valor de cresta de la tensión no supere 42,4 V para corriente alterna y la tensión no supere 42,4 V, para corriente continua. También si la parte está separada de las partes activas por una impedancia de protección. En el caso de una impedancia de protección, la corriente entre la parte y la fuente de alimentación no debe superar 2 mA para corriente continua y su valor de cresta no debe superar 0,7 mA para corriente alterna, y además, para las tensiones que tengan un valor de cresta superior a 42,4 V e inferior o igual a 450 V, la capacidad no debe superar 0,1 μ F y para las tensiones que tengan un valor de cresta superior a 450 V e inferior o igual a 15 kV, la descarga no debe superar 45 μ C. La conformidad se debe verificar por medición, estando la cocina alimentada a la tensión asignada. Las tensiones y corrientes son medidas entre las partes correspondientes y cada polo de la fuente de alimentación. Las descargas son medidas inmediatamente después de la interrupción de la alimentación.*

Requisito específico 5.1.4.1. *La potencia absorbida a la temperatura de funcionamiento normal no debe diferir de la potencia nominal más del 15% o 60 W,*

según el valor más elevado. La potencia de las zonas de cocción de inducción se mide de forma separada. Se debe considerar que la capacidad de la toma de corriente debe ser de por lo menos 1 kW y no debe estar otro dispositivo conectado a la misma. La conformidad se debe verificar por medición cuando la potencia absorbida está estabilizada, estando la cocina alimentada bajo su tensión asignada y funcionando la cocina en las condiciones de funcionamiento normal (...).

Requisito específico 5.1.4.2. *La corriente a la temperatura normal de funcionamiento no debe diferir de la corriente asignada más 15% o 0,30 A, según el valor más elevado (...) Si la corriente varía durante el ciclo de funcionamiento, la corriente se determina como el valor medio de la corriente que tiene lugar durante un período representativo.*

Requisito específico 5.1.7.1 *Deben soportar las sobretensiones transitorias a las cuales puedan estar sometidos. La conformidad se debe verificar sometiendo cada distancia en el aire con un valor inferior a los especificados en un ensayo de tensión de impulso. La tensión del ensayo de impulso tiene una forma de onda a circuito abierto correspondiente al impulso normalizado 1,2/50 μ s especificado en la Norma IEC 61180-1. Se suministra desde un generador, especificado en la norma IEC 61180-2, que disponga de una impedancia virtual de 12 Ω . La tensión de ensayo de impulso se aplica tres veces para cada polaridad con intervalos de al menos 1s.*

Requisito específico 5.1.10.2. *Los circuitos electrónicos deben diseñarse y situarse de forma que ninguna condición de defecto haga a la cocina insegura en lo que concierne a los choques eléctricos, riesgos de incendio, peligro mecánicos o un funcionamiento peligroso.*

Rotulado 6.1. Placa de identificación. *Las cocinas de inducción deben llevar adherida una placa de identificación que reúna las siguientes condiciones mínimas:*

6.1.1. Nombre del fabricante

6.1.2. Una leyenda que indique su país de origen.

6.1.3. Modelo

6.1.4. El número de serie y/o fecha de fabricación, el cual puede ser codificado.

6.1.5. Tensión, expresado en voltios,

6.1.6. Frecuencia, expresada en hertz

6.1.7. Amperaje nominal, expresado en amperios.

6.1.8. Potencia nominal, expresada en vatios

1.3. Análisis de la Norma Técnica Ecuatoriana NTE INEN 2 567:2010.

Eficiencia energética en cocinas de inducción de uso doméstico

Objetivo. Esta norma establece los requisitos de eficiencia energética y las características de la etiqueta informativa que deben cumplir las cocinas de inducción de uso doméstico.

Alcance. *Esta norma aplica a todas las cocinas de inducción de uso doméstico, de tensión nominal no superior a 250 V, que se comercialicen en el Ecuador.*

Esta norma no aplica a cocinas mixtas, a gas, eléctricas y de inducción de frecuencia de línea de uso doméstico.

Definición. Eficiencia térmica. *Valor indicativo de la conversión de electricidad a calor de la cocina de inducción, bajo las condiciones y la metodología de prueba, establecidas en la presente norma, (Instituto Ecuatoriano de Normalización, 2010).*

Esta norma establece rangos de clasificación de cocinas de inducción en función de su eficiencia energética, destacándose los siguientes numerales contenidos en la norma:

Requisito específico 4.1.1. Eficiencia energética. *Los niveles de eficiencia energética, deben ser los establecidos en la Tabla 6.1. Niveles de eficiencia energética para cocinas de inducción de uso doméstico, siendo el nivel A el correspondiente a la mayor eficiencia energética. La eficiencia térmica que corresponde a cada nivel no debe ser inferior y la potencia en estado de suspensión (estado apagado) no debe ser superior a los valores especificados en esta tabla.*

Tabla 6.1. Niveles de eficiencia energética para cocinas de inducción de uso doméstico.

Nivel eficiencia energética	Eficiencia térmica (%)	Potencia en espacio suspendido (W)
A	90	2
B	88	2
C	86	5
D (>1200W)	84	5

E ($\leq 1200W$)	82	5
------------------------------------	-----------	----------

Fuente: (Consejo Nacional de Electricidad, CONELEC, 2001)

Como se puede observar en la Tabla 6.1. Niveles de eficiencia energética para cocinas de inducción de uso doméstico, la potencia en estado de suspensión no debe superar los 5 W, esto se refiere al consumo de la cocina que, a pesar de estar alimentada desde la fuente, no emite ningún campo magnético de calentamiento. Así mismo, limita a una eficiencia mínima de 82% en unidades de calentamiento menores a 1200 W y hasta el 84% en unidades de calentamiento que superen los 1200 W, sin embargo, en cocinas de inducción se considera al nivel **B** como el mínimo óptimo, es decir, una eficiencia térmica mayor al 88% y una potencia en estado suspendido que no supere los 2 W.

Se acepta el lote de cocinas de un determinado modelo y fabricante, en el mercado nacional, si el número de aceptación cumple lo especificado en la Norma NTE INEN-ISO 2859-1⁶, que fija un nivel aceptable de calidad (AQL) para inspección lote a lote.

Tabla 6.2. Plan de muestreo aplicando norma NTE INEN-ISO 2859-1.

Letra clave	Tamaño del lote	Tamaño de la muestra	Plan de muestreo para inspección simplificada (AQL = 4%)	
			Aceptable	Rechazado
A	2 - 50	2	0	1
B	51 – 500	3	0	1
C	501 en adelante	5	0	1

Fuente: (Instituto Ecuatoriano de Normalización, 2012)

Cabe resaltar que las pruebas de eficiencia térmica se realizan bajo condiciones que se especifican en el numeral 6.1.1. y 6.1.2. en donde se detallan, entre otras, las limitantes de carácter eléctrico como:

⁶ Procedimientos de muestreo para inspección por atributos. Parte 1. Programas de muestreo clasificados por el nivel aceptable de calidad (AQL) para inspección lote a lote

- Voltaje: 115 V ($\pm 1\%$) o 220 V ($\pm 1\%$)
- Frecuencia: 60 Hz (± 1)
- Fuente de voltaje con distorsión armónica total: $\leq 3\%$
- Contador de energía para medir el consumo de energía con potencia mínima de 20 mWh.