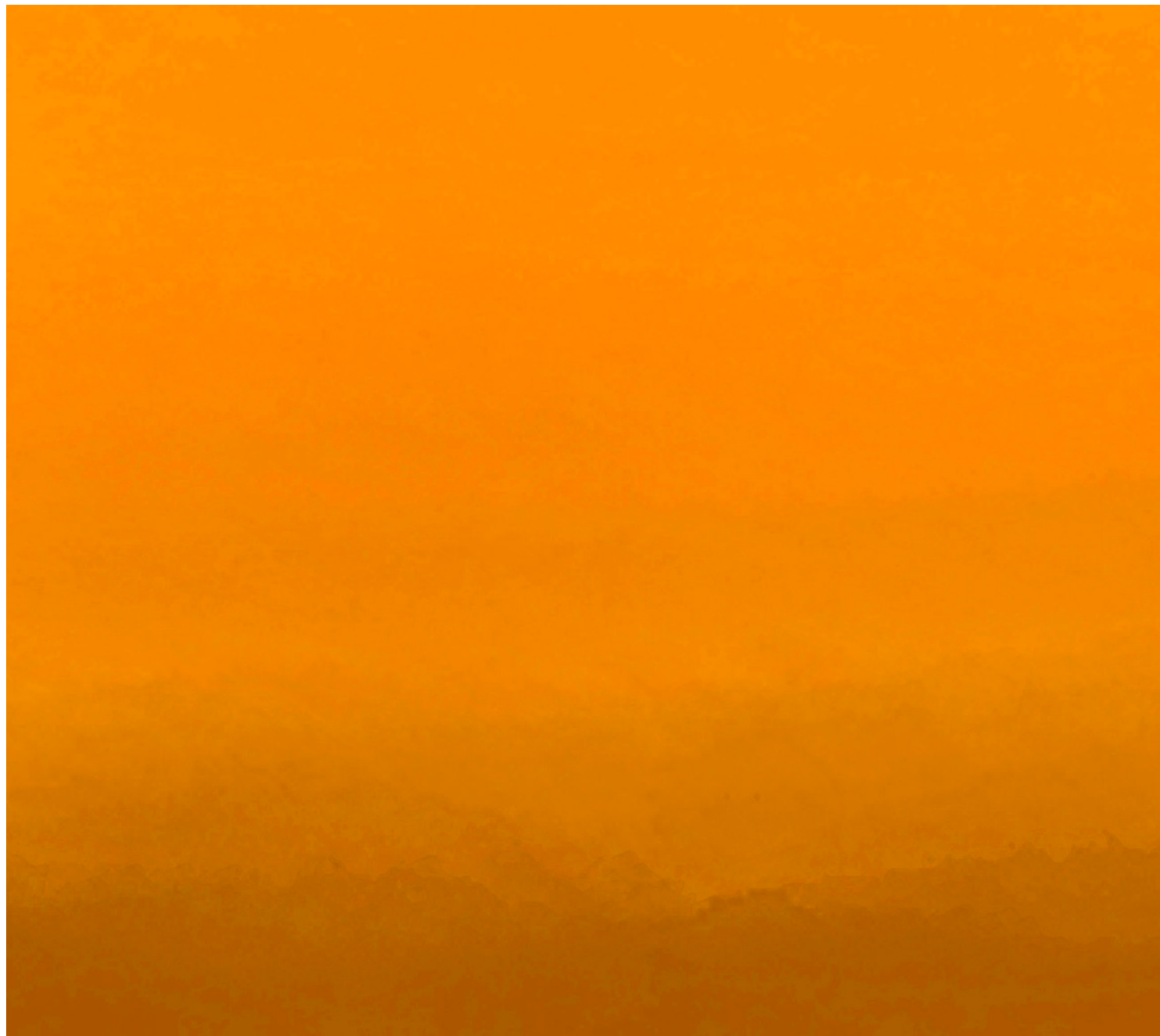


enerLAC

Revista de
Energía de
Latinoamérica
y el Caribe





Fotografía de la portada ©ICE, Dirección Comunicación
e Identidad Corporativa, Parque Eólico Tejona
Fotografías solicitadas por - OLADE.
Autor artístico, fotógrafo: Jimmy Arriola Barrantes.

© Copyright Organización Latinoamericana de Energía
(OLADE) 2017. Todos los derechos reservados.

www.olade.org
enerlac@olade.org
(+593 2) 2598-122 / 2598-280 / 2597-995 / 2599-489
Quito, Ecuador

COMITÉ EDITORIAL

Alfonso Blanco

SECRETARIO EJECUTIVO

Andrés Schuschny

DIRECTOR DE ESTUDIOS, PROYECTOS E INFORMACIÓN

Pablo Garcés

ASESOR TÉCNICO

Martha Vides L.

ESPECIALISTA PRINCIPAL DE HIDROCARBUROS

Alexandra Arias

ESPECIALISTA PRINCIPAL DE ELECTRICIDAD

Blanca Guanocunga

BIBLIOTECARIA

COORDINADOR@S DE LA EDICIÓN

Alfonso Blanco

DIRECTOR

Pablo Garcés

EDITOR

Andrés Schuschny, Martha Vides L.

REVISORES

Las ideas expresadas en este documento son responsabilidad de los autores y no comprometen a las organizaciones mencionadas.

DISEÑO Y DIAGRAMACIÓN

Ana María Arroyo

CONSULTORA DE DISEÑO GRÁFICO

COLABORADORES:

Un agradecimiento al Instituto Nacional de Eficiencia Energética y Energías Renovables, Ecuador por el apoyo brindado en esta edición; y a *Jaime Martí*, Investigador CIMNE (*International Center for Numerical Methods in Engineering*); *Ricardo Narváez*, Subdirector Técnico del INER (Instituto Nacional de Eficiencia Energética y Energías Renovables, Ecuador); *Alberto Reyes*, Investigador INEEL (Instituto Nacional de Electricidad y Energías Limpias, México); *Javier Martínez*, Profesor en la UISEK (Universidad Internacional SEK, Ecuador).

Marysol Materán, Consultora de Investigación



IMPACTO DE LA INTRODUCCIÓN DE COCINAS DE INDUCCIÓN EN LA CALIDAD DE LA ELECTRICIDAD EN LOS HOGARES DE ECUADOR

Daniel Arroyo¹, Darío Rodríguez², Javier Martínez-Gómez³, Gonzalo Guerrón⁴

Recibido: 27/ sep /2017 y Aceptado: 26/ oct /2017
ENERLAC. Volumen I. Número 2. Diciembre, 2017 (80-95).



¹ Instituto Nacional de Eficiencia Energética y Energías Renovables – INER, Quito, Ecuador; Ingeniero en Mecatrónica; analista técnico de INER daniel.arroyo@iner.gob.ec

² Instituto Nacional de Eficiencia Energética y Energías Renovables – INER, Quito, Ecuador; Ingeniero en Mecatrónica, analista técnico de INER. dario.rodriguez@iner.gob.ec

Las fotografías utilizadas en este artículo pertenecen a La Agencia de Noticias ANDES.

³ Instituto Nacional de Eficiencia Energética y Energías Renovables – INER, Quito, Ecuador; Universidad Internacional SEK Ecuador; Quito EC170134, Quito, Ecuador; Ph. D en ciencia de materiales; Ph. D. investigador en INER y Profesor en la UISEK.

javier.martinez@iner.gob.ec

⁴ Instituto Nacional de Eficiencia Energética y Energías Renovables – INER, Quito, Ecuador, Universidad Tecnológica Equinoccial, Quito, Ecuador; MSc. en energías renovables; Director de servicios especializados y transferencia tecnológica en INER y Profesor en la UTE.

gonzalo.guerron@iner.gob.ec

RESUMEN

La irrupción de aparatos eléctricos del hogar ha impulsado la incorporación de cargas no lineales, fuentes de perturbación de los sistemas eléctricos, que inyectan armónicas de corriente, distorsionando su forma de onda. Al interactuar con la impedancia del sistema, estas cargas no lineales distorsionan la tensión y provocan diferentes problemas en los equipos asociados al sistema la red eléctrica. Estos problemas afectan al calentamiento excesivo de transformadores y cables conductores, mal funcionamiento de las plantas eléctricas, resonancias, interferencia electromagnética con equipos de comunicación, etc.

Este estudio resulta la importancia en Ecuador, donde se está desarrollando el “Programa de Eficiencia Energética para Cocción por Inducción- (PEC)”. En el PEC se contempla la introducción de dos a tres millones de cocinas de inducción, cuya fuente energética está basada en electricidad, que suplirán a las cocinas basadas en gas licuado del petróleo.

Se ha realizado un análisis de los armónicos de tensión y corriente en cuatro modelos de cocinas de inducción que actualmente ya se comercializan en Ecuador dentro del PEC. Con los resultados obtenidos se ha observado que las cocinas no producen un incremento considerable en los valores de distorsión armónica en el sector residencial. Adicionalmente, se estima que no habrá repercusión en el THD de las redes de distribución. Sin embargo, sí incrementará el THD de corriente cuando se preparen los alimentos para el desayuno, almuerzo y cena. Este crecimiento será del 170%, pero no sobrepasa los límites de las normativas.

Palabras Claves: Plan de Cocción Eficiente, Distorsión Armónica Total (THD), Armónicos, Cocinas de Inducción, Eficiencia Energética

ABSTRACT

The irruption of electrical appliances from the home has driven the incorporation of nonlinear loads, sources of disturbance of the electrical systems, which inject current harmonics, distorting its waveform. When interacting with the system impedance, these non-linear loads distort the voltage and cause different problems in the equipment associated with the grid system. These problems affect the excessive heating of transformers and conductive cables, malfunction of electrical plants, resonances, electromagnetic interference with communication equipment, etc.

This study is of vital importance in Ecuador, where the “Energy Efficiency Program for Induction Cooking and Heating of Water with Electricity in LPG Replacement in the Residential Sector - (PEC)” is being developed. The PEC contemplates the introduction of two to three million induction cookers, whose energy source is based on electricity, which will supply kitchens based on liquefied petroleum gas.

An analysis of voltage and current harmonics has been made in four models of induction cookers that are already commercialized in Ecuador within the PEC. With the results obtained it has been observed that the kitchens do not produce a considerable increase in the values of harmonic distortion in the residential sector. Additionally, it is estimated that there will be no repercussion in the THD of the distribution networks. However, it will increase the current THD when food is prepared in for breakfast, lunch and dinner. This growth will be 170%, but does not exceed the limits of the regulations .

Keywords: Efficient Cooking Plan, Total Harmonic Distortion (THD), Harmonics, Induction Cookers, Energy Efficiency

1. INTRODUCCIÓN

El aumento de uso de aparatos de cargas no lineales en usuarios residenciales, ha provocado un aumento de la regulación al problema de la distorsión de la onda de tensión y corriente en los sistemas de distribución (Suarez et al. 2005). La calidad de energía y servicio eléctrico, debe cumplir ciertos estándares que aseguren la conformidad del cliente. En este sentido, los aspectos más importantes que deben cumplir estos estándares tienen que ver con: i) frecuencia, ii) nivel de tensión, iii) fluctuaciones de tensión (flicker), iv) armónicos y componentes de frecuencia superior, v) desequilibrio de tensión y corriente, vi) factor de potencia, vii) huecos y sobretensiones, y viii) potencia activa y reactiva (Kit, Tse, & Lau, 2012).

Los niveles de calidad se encuentran normados por organizaciones internacionales los cuales son acogidas y reformuladas por cada país o región (Kit, Tse, & Lau, 2012). Existen dos organizaciones destacadas de estándares de calidad de energía que son: el Instituto de Ingenieros Eléctricos y Electrónicos, IEEE, y la Comisión Electrotécnica Internacional, IEC. En el Ecuador, la Agencia de Regulación y Control de Electricidad, ARCONEL, es la encargada, de emitir regulaciones de calidad de energía para el sector eléctrico (Plan Maestro de Electrificación, 2012).

Relacionado con la calidad de la energía, los equipos eléctricos residenciales generan cargas no lineales que originan corrientes armónicas que se propagan en las redes de transmisión y distribución eléctrica, afectando los índices de calidad del suministro. Esta distorsión puede causar efectos indeseables en otros equipos ubicados en la misma vivienda, como en los dispositivos de protección, bancos de condensadores, motores, computadoras, etc., además de los problemas de calentamiento que originan en las líneas y transformadores de distribución (IEEE Task Force, 2013).

En el caso de Ecuador, los estudios de la calidad de la energía tienen repercusión dentro del Programa de Eficiencia Energética para Cocción por Inducción y Calentamiento de Agua con Electricidad en Sustitución del GLP en el Sector Residencial” (PEC), que pretende el cambio de tres millones de cocinas basadas en gas licuado del petróleo (GLP) por cocinas de inducción, cuya fuente energética está basada en electricidad (Villacís, et al. 2015)

En el caso particular del sistema energético de Ecuador se han realizado estudios para cuantificar los beneficios de la implantación de las cocinas de inducción (Martínez-Gómez, 2016). Se ha observado el 92% del GLP se consume en el sector residencial y el 80% de este es importado, generando salida de divisas al exterior además del costo de subsidio que asume el gobierno (Martínez-Gómez, 2016). Esta situación genera dependencia de un energético fósil importado que afecta la balanza comercial del país e impide utilizar esos recursos para el desarrollo nacional. En este sentido, Ecuador es el país en América latina con el mayor nivel de subsidios a los combustibles. Según la proforma presupuestaria del 2014, se destinaron \$ 3931 millones para combustibles fósiles, de los cuales \$ 680 millones son destinados para el gas licuado de petróleo (GLP) (Villacís, et al. 2015). De hecho, un cilindro 15 kg de GLP cuesta USD \$ 1,60, mientras que países vecinos este precio se encuentra entre USD\$ 17 y 23 (Martínez-Gómez, 2016). Si se elimina el subsidio del estado al uso del gas licuado, si se adecua el déficit tarifario y se otorga el subsidio total a los primeros 100 kWh de los hogares insertos en el programa, para datos de consumo del año 2012, el estado ahorraría 260.7 millones de US\$ al año. Si además se incluye el cambio de la matriz eléctrica en donde el 93.53 % de la generación se prevé que sea realizado por hidroeléctricas, el Estado se podría ahorrar el valor de hasta US\$ 906.5 millones al año (Villacís, et al. 2015).

Para llevar a cabo esta política energética el gobierno de Ecuador va a invertir MUS\$ 11619 para cambiar la matriz energética, de los cuales unos MUS\$ 420 irán al programa de cocinas e inducción (Plan Maestro de Electrificación, 2012). Debido a la relativa alta demanda en potencia eléctrica de las cocinas, la tensión de operación de éstas es de 220V. Por tal motivo las empresas distribuidoras implementan el reforzamiento de las redes eléctricas de distribución y el servicio de 220V a los hogares. Estas adecuaciones son importantes ya que servirán posteriormente para otros equipos eléctricos. Además, hay que tener en cuenta que tras una evaluación previa se estimó que la potencia nominal tenía que ser de 4000 W (Riofrio et al. 2014).

La cocción de alimentos realizada por inducción presenta numerosas ventajas con respecto a los cocinados por GLP como una i) mayor eficiencia energética, el campo magnético inducido en el menaje y la ausencia de focos caloríficos de elevada temperatura reduce las pérdidas de calor con el ambiente; ii) La rapidez en el calentamiento, debido a que el material ferromagnético de la base del menaje tiene la capacidad de atraer y hacer pasar a través de ellos campos magnéticos, tan pronto como circula electricidad por la bobina, lo que produce que el menaje se caliente directamente y no la superficie; iii) mayor seguridad, no existe riesgo de sufrir quemaduras de la cocina, ni explosiones, debido a que no se produce llama; iv) mayor facilidad de limpieza, por poseer una superficie lisa elaborada en vitrocerámica; v) fáciles de operar con mandos digitales. Como principales desventajas presentan: i) tecnología más sofisticada que las cocinas de resistencia eléctrica y de gas; ii) cuidado al utilizarla, para no rayar la vitrocerámica; iii) precio, las cocinas de varias zonas de inducción presentan un precio elevado, no siendo así en las cocinas de un solo inductor (Villacis et al. 2015).

El objetivo de esta investigación es el análisis de la calidad de energía en una vivienda prototipo de la ciudad de Quito – Ecuador, para ello se ha querido cuantificar el impacto de las cocinas de inducción en el sector residencial. Se han realizado análisis

en concordancia a lo recomendado por la norma EN 50160 y teniendo en cuenta la norma IEC 61000 – 4 – 30. El estudio se basó en un análisis de los armónicos de tensión y corriente en cuatro modelos de cocinas de inducción que actualmente ya se comercializan en Ecuador dentro del PNCE.

El resto del artículo se organiza de la manera siguiente: La sección 2 donde se explica la metodología seguida para realizar las medidas. En la sección 3 se exponen los resultados obtenidos en la investigación. La discusión de los resultados obtenidos se realiza en la sección 4. Por último, las conclusiones más importantes detalladas se presentan en la sección 5.

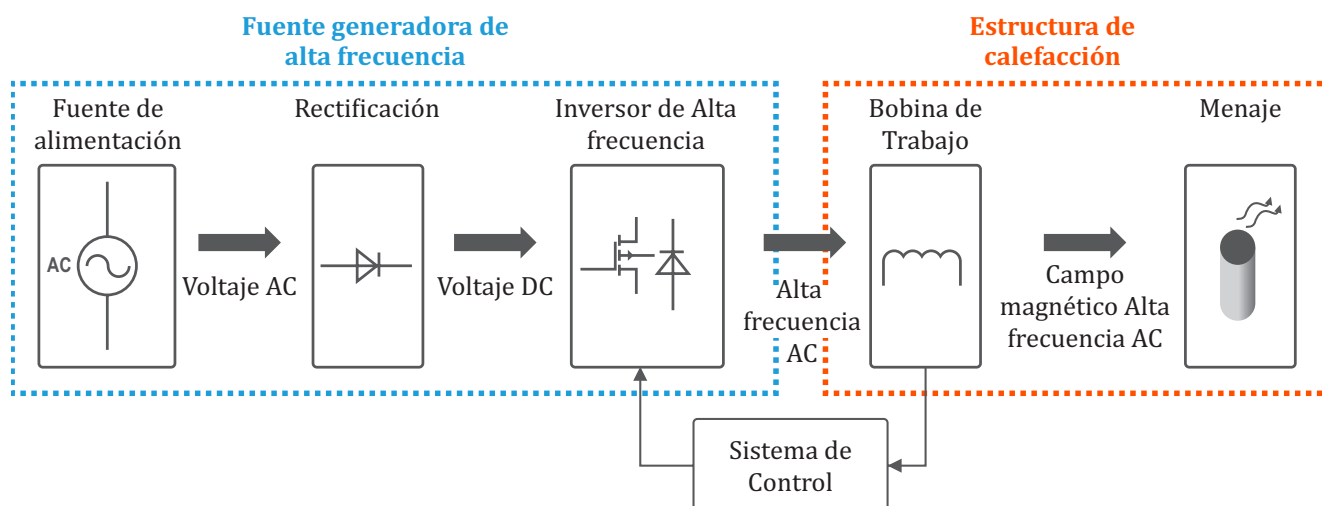
2. METODOLOGÍA

En esta sección se va a explicar un esquema de las cocinas de inducción del ensayo, la metodología seguida para la elección de la vivienda de estudio, las características de las cocinas de inducción dentro del PNCE que se han elegido para el estudio, la metodología seguida para realizar las medidas, una descripción de los equipos de medida que se han utilizado y una breve descripción de las normas que se han utilizado en el estudio.

2.1 Esquema de una cocina de inducción

Una cocina de inducción eléctrica está compuesta de 3 subsistemas: fuente generadora de alta frecuencia, sistema de cocción y sistema de control, como se observa en la figura 1. El funcionamiento del electrodoméstico inicia con la fuente que alimenta toda la electrónica de potencia, incluidos circuitos de rectificación e inversión, esto para generar tensión y corrientes de alta frecuencia que circulan por una bobina de trabajo. La corriente eléctrica que circula por esta bobina genera un campo electromagnético de tal intensidad que, al atravesar el material ferromagnético de la base del menaje, genera en él un exceso de energía tal que se transforma en calor (Riofrio, 2015) El sistema de control es el encargado de tomar las acciones de control respectivas al estado de los sensores y la interfaz con el usuario.

Figura 1. Esquema de la cocina eléctrica de inducción compuesta por una etapa generadora de alta frecuencia, estructura de calentamiento y sistema de control



Fuente: Jonathan Riofrio (2015)

2.2 Vivienda de estudio

Para evaluar el impacto de las cocinas de inducción, en la red eléctrica de Ecuador se ha escogido una vivienda prototipo en la ciudad de Quito. Ésta debe acoger a una familia media de 4 personas y se ha escogido teniendo en cuenta los equipos eléctricos que tiene un hogar medio. La residencia cuenta con las cargas eléctricas que se

muestran en la Tabla 1, especificando su cantidad, potencia nominal y consumo estimado al mes. Además, en Ecuador se utilizan en su mayoría luminarias fluorescentes compactas debido a que el gobierno impulsa el consumo de estos focos (Villacis et al. 2015).

Tabla 1. Cargas eléctricas de la vivienda prototipo, según su cantidad, potencia nominal y consumo estimado al mes.

Nº	EQUIPO	CANTIDAD	POTENCIA NOMINAL (W)	CONSUMO ESTIMADO (kWh/mes)
1	Televisión plana	3	86	7
2	Equipo de sonido	1	150	5
3	Computadoras	3	65	9
4	Focos fluorescentes compactos	10	26	27
5	Focos incandescentes	1	100	8
6	Lavadora de ropa	1	400	4
7	Ducha eléctrica	1	3300	47
8	Micro ondas	1	1200	6
9	Refrigeradora	1	575	75
10	Otros	5	1500	10
			TOTAL	198

Fuente: Elaboración de autores

2.3 Cocinas de estudio

Para realizar esta investigación se han escogido cuatro modelos de cocinas, que se encuentran dentro del PEC. Las características de las cocinas de inducción evaluadas, según el número de hornillas, horno eléctrico, tensión nominal y potencia nominal máxima aparecen en la Tabla 2. La cocina con horno incluye en su potencia nominal la potencia de un horno eléctrico de resistencia. Estas cocinas se comercializan actualmente en el

Ecuador en los distintos canales de distribución. Todas estas cocinas cumplen las normativas NTE-INEN-2567 Eficiencia energética de cocinas de inducción de uso doméstico, NTE-INEN-2555 seguridad en cocinas de inducción, impuestas por el Ecuador para el PNCE. La cuales especifican una eficiencia mínima de las cocinas del 82 % y la limitación de potencia a 4000W cuando el tiempo de operación sobrepasa los 15 segundos.

Tabla 2: Características de las cocinas de inducción evaluadas, según el número de hornillas, horno eléctrico, tensión nominal y potencia nominal máxima

Nº	NÚMERO DE HORNILLAS	HORNO ELÉCTRICO	TENSIÓN NOMINAL (V)	POTENCIA NOMINAL MÁXIMA (W)
1	4	Si	220	7200
2	4	No	220	3500
3	4	No	220	4000
4	4	No	220	4000

Fuente: Elaboración de autores

2.4 Mediciones

Las mediciones de calidad de energía eléctrica en la vivienda se realizan en la caja de interruptores magneto-térmicos. Específicamente, no existe una normativa local que regule la calidad de energía y los armónicos dentro de cada vivienda. Sin embargo, hay normas que regulan la calidad de energía que la empresa distribuidora debe ofrecer a sus clientes.

Para realizar las medidas se realizó la conexión en este punto para cuantificar el impacto de la cocina de inducción en la calidad de energía del hogar. Los procesos para las mediciones se detallan a continuación:

1. Se mide la calidad de energía eléctrica de la vivienda en el punto de conexión sin incorporar ninguna cocina de inducción. El periodo de

análisis es de 7 días, con mediciones cada 10 minutos, en concordancia a lo recomendado por la norma EN 50160.

2. Se mide la calidad de energía eléctrica de la vivienda incorporando una cocina de inducción a la vez. En cada cocina se realizan dos evaluaciones, una con la cocina en funcionamiento, es decir en el proceso de cocción, y la segunda en el modo "stand by", es decir que la cocina se encuentra conectada en el tomacorriente pero no operando. En el primer ensayo se cuantifica la calidad de energía por 90 minutos, 10 minutos en cada uno de los 9 niveles de potencia que tiene cada cocina. La frecuencia de muestreo es de 1 segundo. En el segundo ensayo se mide la calidad de energía por un periodo de 22 horas, con una resolución de 1 segundo.

En las mediciones se incluye parámetros de: i) tensión y corriente eficaz, ii) amplitud y ángulo de fase de los 50 armónicos de tensión y corriente, iii) distorsión armónica total de tensión y corriente. Estos índices de evaluación son ampliamente conocidos y su definición puede encontrarse en (Suarez et al. 2005)

2.5 Equipo de medición

Las medidas de calidad de la energía se realizaron mediante un analizador de red de la marca Fluke, modelo 435 serie II. Las sondas amperimétricas utilizadas son Fluke i200 AC, con rango de corriente seleccionable 0-20A o 0-200^a para tener una mayor precisión en la medida. El procedimiento de medición del equipo se realizó teniendo en cuenta la norma IEC 61000 – 4 – 30, dicha norma se explicará en el siguiente punto.

2.6 Norma de calidad de energía

Para el desarrollo de esta investigación se han considerado dos normativas internacionales (IEC 61000 y EN 50160) y una nacional (CONELEC 004/01) de calidad de energía, las mismas que imponen límites de distorsión armónica tanto de tensión como de corriente para sistemas eléctricos de baja tensión.

La norma IEC 61000 – 4 – 30 define los procedimientos de medida de cada uno de los parámetros eléctricos en base a los cuales se determina la calidad del suministro eléctrico para así obtener resultados fiables, repetibles y comparables. Establece valores límites para la emisión de corrientes armónicas de equipos eléctricos que son alimentados por sistemas de alta tensión (AT), media tensión (MT) y baja tensión (BT). Los sistemas de bajo tensión son los menores a 1 kV y sus límites son los considerados en esta investigación. Más información sobre dicha norma puede encontrarse en (Norma, U. N. E. E. N., 1996)

Además, para el análisis de calidad de la energía durante el periodo de análisis de siete días, se

utilizó la norma. La norma europea EN 50160 se especializa en requerimientos de calidad para el suministro de energía eléctrica (CONELEC, 2001) En ella es posible encontrar los niveles de tensión y corrientes a los que deben regirse las empresas europeas de distribución. Esta norma específica los límites de tensión armónicos para sistemas de MT y BT. Para esta normativa se consideran sistemas con tensión de hasta 35 kV. Los límites de distorsión armónica de tensión se expresan en porcentaje de la tensión fundamental de alimentación. Más información sobre dicha norma puede encontrarse en (CONELEC, 2001).

La regulación emitida por el ARCONEL estipula los niveles de calidad de suministro de energía eléctrica en la etapa de distribución y los métodos a ser aplicados para su evaluación. En cuanto a los límites de distorsión armónica, la regulación manifiesta que los mismos serán expresados en porcentaje según la relación existente entre la tensión del punto de medición y la tensión nominal del sistema. Más información sobre dicha regulación puede encontrarse en (Martínez-Gómez, Guerrón, & Riofrio, 2017).

3. RESULTADOS

En este apartado se presenta los resultados de las medidas de 50 armónicos de tensión y corriente, en porcentaje de tensión y corriente nominal, respectivamente.

En relación a los valores de tensión y valor eficaz de corriente (RMS) que se han obtenido en la acometida de electricidad en la vivienda es bifásica con tensión línea-neutro de 127 V y tensión línea-línea de 220 V.

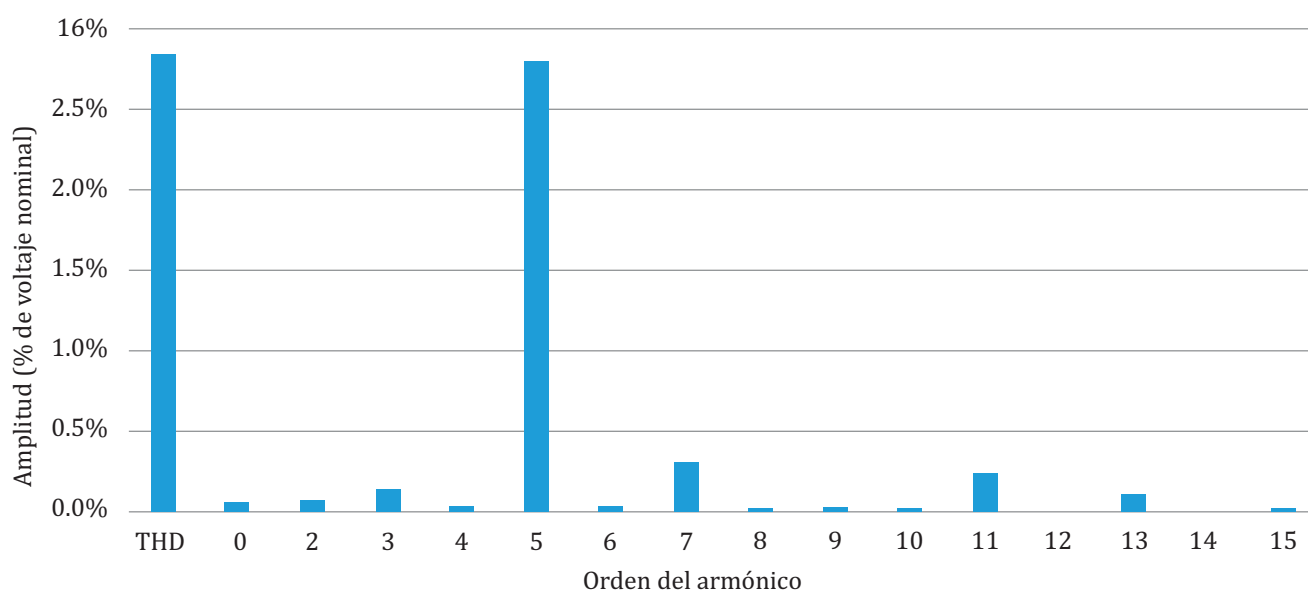
3.1 Armónicos de la residencia sin cocina de inducción

Los valores obtenidos para armónicos de tensión y la distorsión armónica total (THD del inglés *Total Harmonic Distortion*) en la residencia prototipo, para el caso de no tener en cuenta ninguna cocina de inducción (solamente las

cargas especificadas en la Tabla 1), se detallan en el espectrograma de la Figura 2. Se muestra la amplitud del armónico hasta el armónico de orden 15, puesto que los restantes presentan un valor cercano a cero. Se puede observar que el THD tiene un valor de 2.83 % para el quinto armónico. Se destaca además que los armónicos

restantes presentan amplitudes inferiores al 0.35 %, incluido el tercer armónico. Relacionado con el PEC, los armónicos de tensión de las los hogares, sin cocinas de inducción, cumplen con los límites establecidos en los estándares IEC 61000-3-6, EN 50160 y la regulación CONELEC 004/01 de calidad de energía.

Figura 2. Armónicos de tensión de la residencia prototipo sin cocina de inducción, hasta el armónico 15

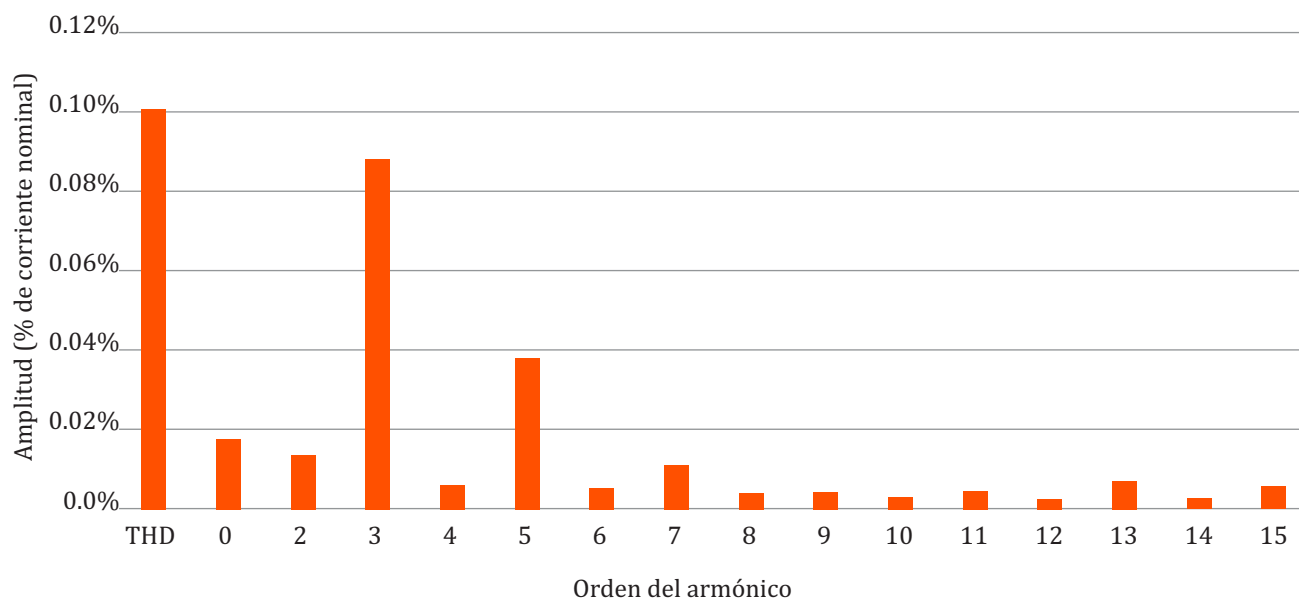


Fuente: Elaboración de autores

Los armónicos de corriente y el THD de corriente en la residencia prototipo, con las cargas especificadas en la Tabla 1 y sin incluir ninguna cocina de inducción, se detallan en el espectrograma de la Figura 3. En la figura 3 se observa el THD de corriente es de 0.1 %, siendo el tercer y quinto armónico los más considerables con un valor de 0.09 % y 0.04 %, respectivamente. Se puede concluir que los armónicos de corriente de los hogares que se adscribirán al PEC, sin cocinas de inducción, cumplen con los límites establecidos en los estándares IEC 61000-3-6, EN 50160 y la regulación CONELEC 004/01 de calidad de energía.

El crecimiento medio del THD de tensión en valor absoluto por la inclusión de cocinas de inducción es de 2.83 % a 2.91%, es decir tan solo 0.08 %.

Figura 3. Armónicos de corriente de la residencia prototipo sin cocina de inducción, hasta el armónico 15



Fuente: Elaboración de autores

3.2 Armónicos en la residencia con cocina de inducción en modo de espera

En esta subsección se presentan los resultados de armónicos de tensión y corriente cuando una cocina de inducción se encuentra conectada a la residencia, es decir conectada a un tomacorriente, pero esta cocina no se encuentra en el proceso de cocción.

Los resultados de los armónicos de tensión y el THD de tensión de las 4 cocinas de inducción en modo de espera, hasta el armónico 15 se presentan en la Figura 4 (siguiente página). El THD de tensión es 2.92%, 3.00%, 2.92% y 2.82% para las cocinas 1, 2, 3 y 4, respectivamente, siendo el quinto armónico el más considerable con valores de 2.89%, 2.98%, 2.89% y 2.7%.

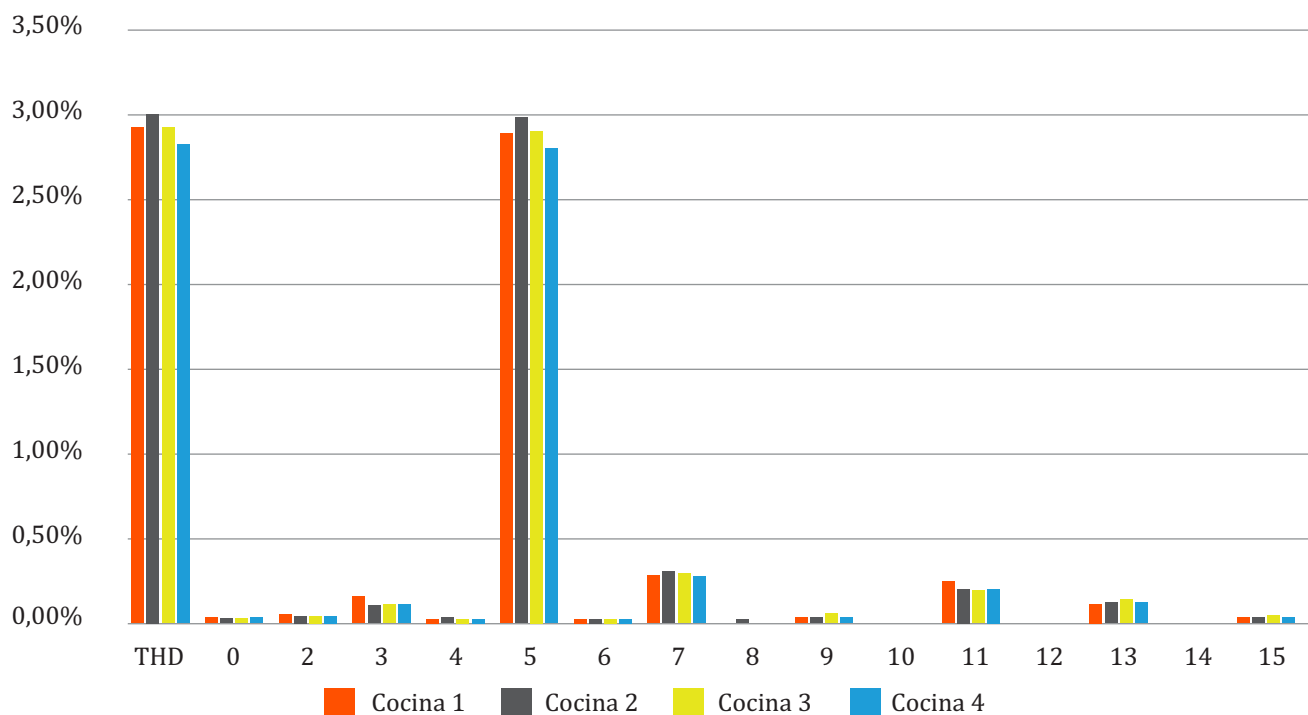
El crecimiento medio del THD de tensión en valor absoluto por la inclusión de cocinas de inducción es de 2.83% a 2.91%, es decir tan solo 0.08%. En este sentido, los armónicos de tensión en hogares

con cocinas de inducción, cumplen con los límites establecidos en los estándares IEC 61000-3-6, EN 50160 y la regulación CONELEC 004/01 de calidad de energía.

Los resultados de los armónicos de corriente y el THD de corriente de las 4 cocinas de inducción en modo de espera, hasta el armónico 15 se presentan en la Figura 5 (siguiente página). El THD es 0.16%, 0.13%, 0.10% y 0.07% para las cocinas 1, 2, 3 y 4, respectivamente. El tercer armónico tiene valores de 0.07%, 0.07%, 0.07%, 0.06%. El quinto armónico tiene valores de 0.14%, 0.11%, 0.04%, 0.03%.

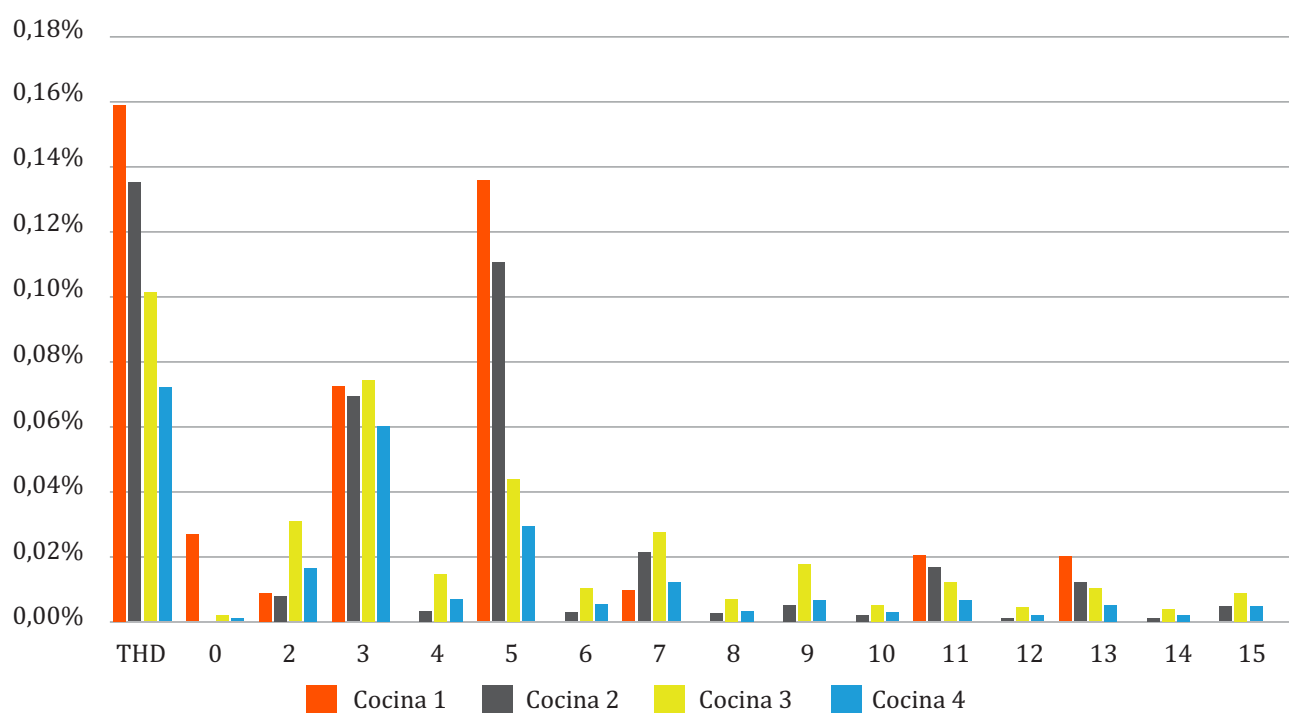
El crecimiento medio del THD de corriente en valor absoluto por la inclusión de cocinas de inducción es de 0.10% a 0.115%, es decir tan solo 0.015 %. Se puede observar que al incluir cualquiera de los 4 modelos de cocinas de inducción los armónicos de tensión y corriente siguen encontrándose con valores inferiores a los dictados por normativas nacionales e internacionales.

Figura 4. Resultados de los armónicos de tensión de las 4 cocinas de inducción en modo de espera, hasta el armónico 15



Fuente: Elaboración de autores

Figura 5. Resultados de los armónicos de corriente de las 4 cocinas de inducción en modo de espera, hasta el armónico 15



Fuente: Elaboración de autores

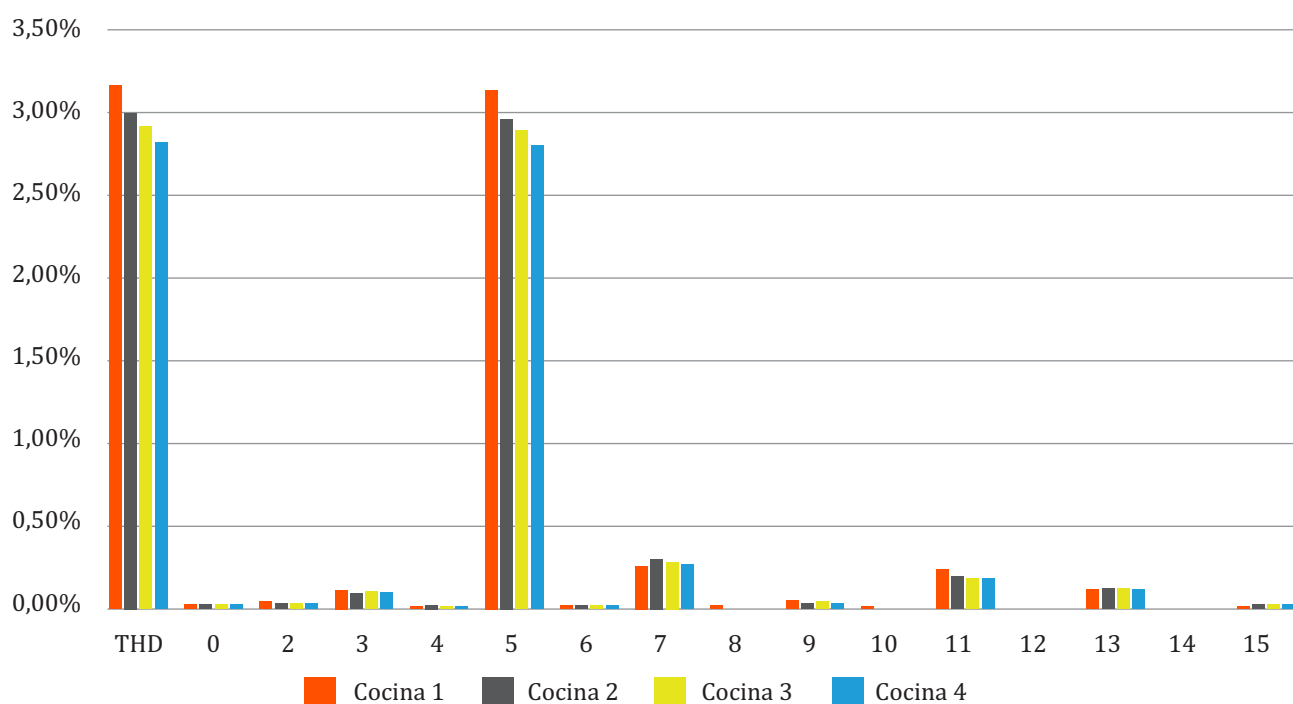
3.3 Armónicos de la residencia con cocina de inducción en operación

En esta subsección se presentan los resultados de armónicos de tensión y corriente cuando una cocina de inducción se encuentra conectada a la residencia y funcionando, es decir se encuentra en el proceso de cocción de alimentos. Los resultados armónicos de tensión y el THD de tensión de las 4 cocinas de inducción, hasta el armónico 15, se presenta en la Figura 6. El THD 3.16%,

2.99%, 2.91% y 2.82% para las cocinas 1, 2, 3 y 4, respectivamente, siendo el quinto armónico el más considerable con valores de 3.14%, 2.96%, 2.89% y 2.79%.

El crecimiento medio del THD de tensión en valor absoluto por la inclusión de cocinas de inducción es de 2.83% a 2.97%, es decir tan solo 0.14%.

Figura 6: Resultados de los armónicos de tensión de las 4 cocinas de inducción en estado de operación, hasta el armónico 15



Fuente: Elaboración de autores

Los resultados de los armónicos de corriente y el THD de corriente de las 4 cocinas de inducción en estado de operación se presentan en la Figura 7. Los THD de corriente fueron 0.34%, 0.32%, 0.16% y 0.27% para las cocinas 1, 2, 3 y 4, respectivamente. El tercer armónico tiene valores de 0.20%, 0.24%, 0.09%, 0.11%.

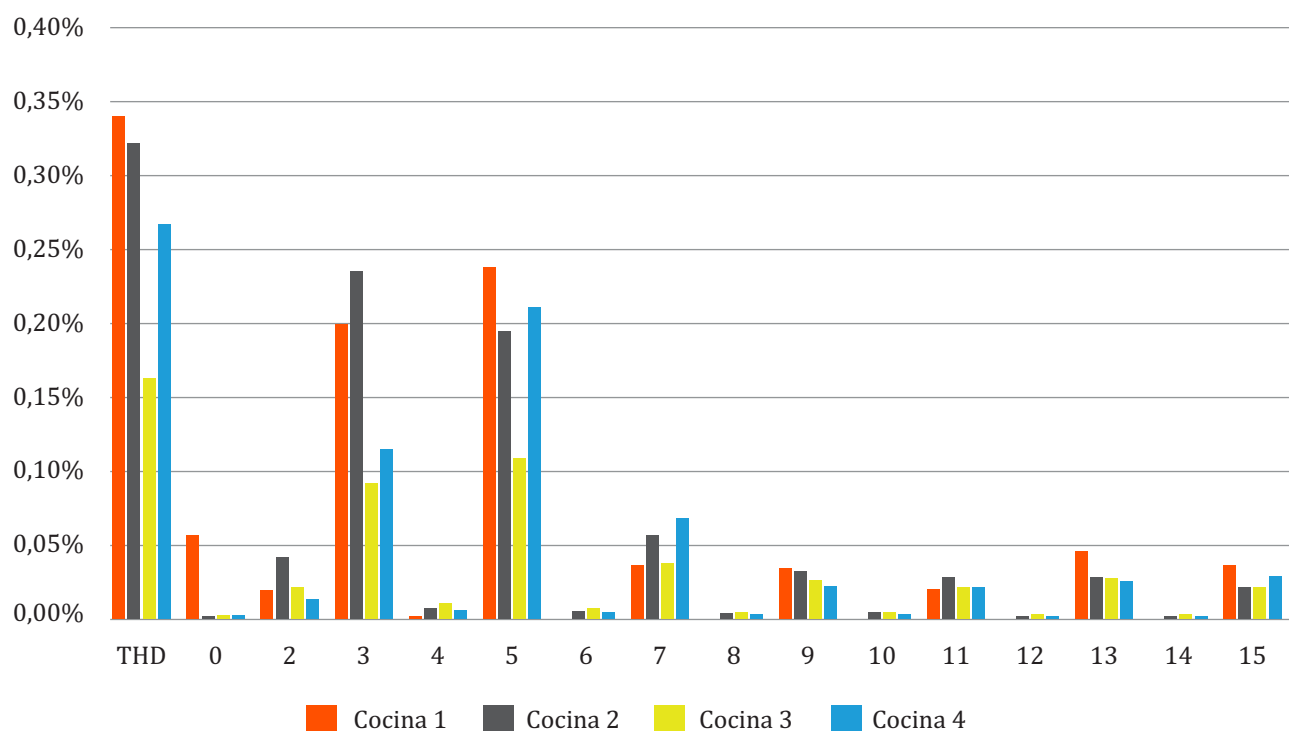
El quinto armónico tiene valores de 0.24%, 0.19%, 0.11%, 0.21%.

El crecimiento medio del THD de corriente en valor absoluto por la inclusión de cocinas de inducción es de 0.10% a 0.27%, es decir 0.17%, esto equivale a un crecimiento de 170%.

Se puede observar que al operar cualquiera de los cuatro modelos de cocinas de inducción los armónicos de voltaje y corriente cumplen con los límites establecidos en los estándares IEC

61000-3-6, EN 50160 y la regulación CONELEC 004/01 de calidad de energía. Sin embargo los armónicos de corriente tienen un crecimiento significativo.

Figura 7. Resultados de los armónicos de corriente de las 4 cocinas de inducción en estado de, hasta el armónico 15



Fuente: Elaboración de autores

3.4 Tabulación de armónicos producto de las cocinas conectadas en modo de espera

Los resultados de los niveles de armónicos de tensión y corriente cuando las cocinas de inducción se encuentran en modo de espera se observa en la Tabla 3. El THD de tensión sufre un crecimiento medio en valor absoluto de 0.09% y máximo de 0.17%, el quinto armónico crece en cantidades similares. El THD de corriente sufre un crecimiento en valor absoluto de 0.02% y máximo de 0.06%, el tercer armónico decrece en valor absoluto una media de 0.02% y el quinto armónico crece 0.05%.

En cuanto a los análisis estadísticos, los resultados mostraron una covarianza entre los THD de tensión y el THD de corriente de 0.0019, lo que sugieren una relación entre los dos valores. La desviación típica en los THD de tensión varía entre 0.07 y 0.08, mientras que en el THD de corriente tiene una variación en dicho valor entre 0.01 y 0.05. Por último, la varianza se sitúa tanto para el THD de tensión y como el THD de corriente por debajo del 1%.

Tabla 3. Resultados de los niveles de armónicos de tensión y corriente cuando las cocinas de inducción se encuentran en modo de espera

			Sin cocina	Modo espera	Promedio	Desviación típica	Varianza	Diferencia	Diferencia promedio
Armónicos de tensión (%)	THD	1	2.83	2.92	2.91	0.07	0.004	0.09	0.09
		2		3.00				0.17	
		3		2.92				0.09	
		4		2.82				-0.01	
	5to	1	2.8	2.89	2.89	0.08	0.005	0.09	0.09
		2		2.98				0.18	
		3		2.89				0.09	
		4		2.79				-0.01	
Armónicos de corriente (%)	THD	1	0.1	0.16	0.11	0.04	0.001	0.06	0.01
		2		0.13				0.03	
		3		0.10				0.00	
		4		0.07				-0.03	
	5to	1	0.04	0.14	0.08	0.05	0.002	0.10	0.04
		2		0.11				0.70	
		3		0.04				0.00	
		4		0.03				-0.01	
	3ro	1	0.09	0.07	0.07	0.01	0.000	-0.02	-0.02
		2		0.07				-0.02	
		3		0.07				-0.02	
		4		0.06				-0.03	

Fuente: Elaboración de autores

3.5 Tabulación de armónicos producto de las cocinas en operación

En la Tabla 4 se puede observar la diferencia de los niveles de armónicos producidos por el funcionamiento de las cocinas de inducción en la casa prototipo. El THD de tensión sufre un crecimiento en valor absoluto de 0.14% y máximo de 0.33%, el quinto armónico crece en cantidades similares. El THD de corriente sufre un crecimiento medio en valor absoluto de 0.17% y máximo de 0.24%, el tercer armónico crece una media de 0.07% y el quinto armónico 0.15%.

En cuanto al análisis estadísticos, los resultados mostraron una covarianza entre los THD de tensión y el THD de corriente de 0.007, lo que sugieren una leve relación entre los dos valores. La desviación típica en los THD de tensión varía

entre 0.14 y 0.15, mientras que en el THD de corriente tiene una variación en dicho valor entre 0.06 y 0.08. Por último, la varianza se sitúa tanto para el THD de tensión llega hasta el 1.6% y como el THD de corriente por debajo del 1%.

Se destaca que el crecimiento del THD de corriente es significativo con un crecimiento medio sin cocina de inducción de 170% hasta 240%, No obstante, encuentra que al operar cualquiera de los 4 modelos de cocinas de inducción los armónicos de voltaje y corriente cumplen con los límites establecidos en los estándares IEC 61000-3-6, EN 50160 y la regulación CONELEC 004/01 de calidad de energía. Sin embargo, los armónicos de corriente tienen un crecimiento significativo.

Tabla 4. Resultados de los niveles de armónicos de tensión y corriente cuando la cocina se encuentra en funcionamiento y apagada

			Sin cocina	Funcionando	Promedio	Desviación típica	Varianza	Diferencia	Diferencia promedio
Armónicos de tensión (%)	THD	1	2.83	3.16	2.97	0.14	0.015	0.33	0.14
		2		2.99				0.16	
		3		2.91				0.08	
		4		2.82				-0.01	
	5to	1	2.8	3.14	2.89	0.15	0.016	0.34	0.15
		2		2.96				0.16	
		3		2.89				0.09	
		4		2.79				-0.01	
Armónicos de corriente (%)	THD	1	0.1	0.34	0.27	0.08	0.005	0.24	0.17
		2		0.32				0.22	
		3		0.16				0.06	
		4		0.27				0.17	
	5to	1	0.04	0.24	0.19	0.06	0.002	0.20	0.15
		2		0.19				0.15	
		3		0.11				0.07	
		4		0.21				0.17	
	3ro	1	0.09	0.20	0.16	0.07	0.004	0.11	0.07
		2		0.24				0.15	
		3		0.09				0.00	
		4		0.11				0.02	

Fuente: Elaboración de autores

4. DISCUSIÓN

Esta investigación presenta el análisis de la calidad de energía, dentro del PEC de Ecuador que pretende la introducción de 2 a 3 millones de cocinas de inducción, Para el análisis de la calidad de la energía se han tenido en cuenta un análisis de los armónicos de tensión y corriente en cuatro modelos de cocinas de inducción dentro del PEC. Este trabajo ayuda a la literatura existente sobre los estudios de los armónicos en el hogar. Además, dicha investigación sirve de insumo al gobierno de Ecuador para regular la política de electricidad en el hogar y potenciar el PEC. Además, puede impulsar a programas de cocción limpia, basado en electricidad alrededor del mundo.

Las mediciones realizadas evidencian que la cocina de inducción genera mayor distorsión armónica

de tensión durante su modo de funcionamiento que en el modo de espera, sin embargo, el crecimiento en valor absoluto fue de 0.08 % en caso de los armónicos de tensión y de 0.015% en el caso de los armónicos de corriente para cuando las cocinas están sin funcionar. El crecimiento en valor absoluto de los armónicos de tensión fue de 0.14 % y de 0.015% en el caso de los armónicos de corriente para cuando las cocinas están estaban funcionando. En ningún caso supera los límites establecidos en los estándares IEC 61000-3-6, EN 50160 y la regulación CONELEC 004/01 para calidad de energía eléctrica del Ecuador en distribución. El crecimiento medio en porcentaje del THD sin cocina de inducción es de 3 % y 5 % para las cocinas de inducción en modo de espera y funcionando, respectivamente.

El cambio de tecnología de cocción en el Ecuador, por cocinas de inducción, no generará problemas en la distorsión armónica de tensión y corriente.

De manera similar la distorsión armónica de corriente es superior cuando la cocina se encuentra funcionando que cuando se encuentra en modo de espera. El crecimiento en valor absoluto es relativamente bajo y en ningún caso supera los límites establecidos en las normas, de hecho, el valor es sumamente inferior a los límites. El crecimiento medio en porcentaje del THD sin cocina de inducción es de 20 % y 170 % para las cocinas de inducción en modo de espera y funcionando, respectivamente. En este punto cabe hacer hincapié que, aunque no se sobrepasen los límites establecidos en las normativas, en las horas donde las personas cocinan habrá un aumento de alrededor de 170 % en los armónicos de corriente en la red de distribución, principalmente el quinto armónico que crece 375 % y el tercer armónico que crece 78 %.

Los resultados obtenidos se encuentran en relación con los obtenidos dentro de la investigación "Analysis of the" Plan Fronteras" for Clean Cooking in Ecuador" (Martínez-Gómez, Guerrón & Riofrio, 2017) se analizaron los efectos de los armónicos de las cocinas de inducción en todo un pueblo al norte de Ecuador. Además, lo encontrado en los resultados, ayuda al análisis efectuado en "Análisis de la distorsión armónica y los efectos de atenuación y diversidad en áreas residenciales" (Suarez et al. 2005) donde se había realizado un análisis de la distorsión armónica, pero sin tener en cuenta la introducción masiva de algunos electrodomésticos. En este sentido se

encontraron valores de distorsión armónica en tensión y corriente similares a los encontrados en este artículo. La temática y los resultados de este artículo también están relacionados con la investigación "*A study on the effects of voltage distortion on current harmonics generated by modern SMPS driven home appliances in Smart Grid network*" (Kit, Tse, & Lau, 2012) observándose que se han encontrado resultados similares a los obtenidos en este artículo.

5. CONCLUSIONES

Este trabajo analiza la irrupción de cocina de inducción en Ecuador dentro del PEC, las cuales incorporan cargas no lineales, que inyectan armónicas de corriente, distorsionando su forma de onda. De esta forma se ha examinado cómo interactúan estas cargas con la impedancia del sector residencial, distorsionando la tensión y como las cocinas actúan sobre el sistema la red eléctrica.

Con los resultados obtenidos, se ha observado que el cambio de tecnología de cocción en el Ecuador por cocinas de inducción no generará problemas en la distorsión armónica de tensión y corriente en las residencias y hogares en los cuales se adquiera esta tecnología. Adicionalmente, se estima que no habrá repercusión en el THD de las redes de distribución. Sin embargo, sí incrementará el THD de corriente en las horas cuando el sector residencial cocina sus alimentos. Este crecimiento será del 170%, un valor considerable pero que no sobrepasa los límites de las normativas.

Esta investigación ayudaría en otros trabajos, para solucionar información sobre la calidad de la red eléctrica, por la irrupción de aparatos eléctricos dentro del hogar que genera la inclusión fuentes de perturbación de los sistemas eléctricos.

En este sentido, también puede ayudar a los programas de acceso a cocción limpia de alimentos basado en electricidad, ya que se observa que la cocina de inducción es un equipo que tienen unos niveles dentro de la norma de introducción de armónicos en la red.

BIBLIOGRAFÍA

- CONELEC, R. (2001). 004-01. Calidad del Servicio Eléctrico de Distribución.
- Kit, M. Y., Tse, C. F., & Lau, W. H. (2012, November). A study on the effects of voltage distortion on current harmonics generated by modern SMPS driven home appliances in Smart Grid network. In *Advances in Power System Control, Operation and Management (APSCOM 2012)*, 9th IET International Conference on IET, 1-6.
- IEEE Task Force. (1993) "Effects of harmonics on equipment", IEEE Trans. Power Delivery, 8.
- Martínez-Gómez, J., Ibarra, D., Villacis, S., Cuji, P., & Cruz, P. R. (2016). Analysis of LPG, electric and induction cookers during cooking typical Ecuadorian dishes into the national efficient cooking program. *Food Policy*, 59, 88-102.
- Martínez-Gómez, J., Guerr, G., & Riofrio, A. J. (2017). Analysis of the "Plan Fronteras" for Clean Cooking in Ecuador. *International Journal of Energy Economics and Policy*, 7(1).
- Norma, U. N. E. E. N. (1996). 50160. Características de la tensión suministrada por la redes de distribución.
- Plan Maestro de Electrificación. Ecuador 2012-2021. 2011.
- Riofrio, A., Carrión, D., Orozco, M., Vaca, D., & Martínez, J. (2014). Análisis del consumo energético en procesos de cocción eficiente para el sector residencial. In *Memorias del Congreso latinoamericano de ingeniería mecánica Colim* (Vol. 8, pp. 268-273).
- Riofrio, A. (2015). Modelización de una micro red fotovoltaica aplicada a equipos de cocción por inducción para el reemplazo de GLP. Quito, Pichincha, Ecuador: Universidad Politécnica Salesiana.
- Suárez, J., Mauro, G., Anault, D., & Agüero, C. (2005). Análisis de la distorsión armónica y los efectos de atenuación y diversidad en áreas residenciales. *Revista del IEEE América Latina*, 3(5), 71-77.
- Villacís, S., Martínez, J., Riofrio, A. J., Carrión, D. F., Orozco, M. A., & Vaca, D. (2015). Energy efficiency analysis of different materials for cookware commonly used in induction cookers. *Energy Procedia*, 75, 925-930.