



UNIVERSIDAD TÉCNICA PARTICULAR DE LOJA
La Universidad Católica de Loja

ÁREA TÉCNICA

TÍTULO DE INGENIERO EN ELECTRÓNICA Y TELECOMUNICACIONES

Compensación de armónicos y energía reactiva en cocinas de inducción.

TRABAJO DE FIN DE TITULACIÓN

AUTOR: Cumbicus Jiménez, Milner Estalin

DIRECTOR: Jaramillo Pacheco, Jorge Luis, Ing.

LOJA—ECUADOR

2015

APROBACIÓN DEL DIRECTOR DEL TRABAJO DE FIN DE TITULACIÓN

Ingeniero.

Jorge Luis Jaramillo Pacheco.

DOCENTE DE LA TITULACIÓN DE ELECTRÓNICA Y TELECOMUNICACIONES

De mi consideración:

El presente trabajo de fin de titulación Compensación de armónicos y energía reactiva en cocinas de inducción, realizado por Cumbicus Jiménez Milner Estalin, ha sido orientado y revisado durante su ejecución, por cuanto se aprueba la presentación del mismo.

Loja, mayo de 2015

f)

DECLARACIÓN DE AUTORÍA Y CESIÓN DE DERECHOS

Yo Cumbicus Jiménez Milner Estalin declaro ser autor del presente trabajo de fin de titulación: Compensación de armónicos y energía reactiva en cocinas de inducción, de la Titulación de Electrónica y Telecomunicaciones, siendo Jorge Luis Jaramillo Pacheco director del presente trabajo; y eximo expresamente a la Universidad Técnica Particular de Loja y a sus representantes legales de posibles reclamos o acciones legales. Además certifico que las ideas, conceptos, procedimientos y resultados vertidos en el presente trabajo investigativo, son de mi exclusiva responsabilidad.

Adicionalmente declaro conocer y aceptar la disposición del Art. 88 del Estatuto Orgánico de la Universidad Técnica Particular de Loja que en su parte pertinente textualmente dice: “Forman parte del patrimonio de la Universidad la propiedad intelectual de investigaciones, trabajos científicos o técnicos y tesis de grado o trabajos de titulación que se realicen con el apoyo financiero, académico o institucional (operativo) de la Universidad”

f.....

Cumbicus Jiménez Milner Estalin

1104678824

DEDICATORIA

*A mis padres,
hermanos,
y sobrinos.*

AGRADECIMIENTO

Agradezco al Ing. Jorge Luis Jaramillo, y a todos los docentes de la Titulación de Electrónica y Telecomunicaciones que me brindaron sus conocimientos en mi formación profesional.

ÍNDICE DE CONTENIDOS

CARÁTULA	i
APROBACIÓN DEL DIRECTOR DEL TRABAJO DE FIN DE TITULACIÓN.....	ii
DECLARACIÓN DE AUTORÍA Y CESIÓN DE DERECHOS	iii
DEDICATORIA.....	iv
AGRADECIMIENTO.....	v
ÍNDICE DE CONTENIDOS	vi
LISTA DE FIGURAS	viii
LISTA DE TABLAS.....	x
RESUMEN	1
ABSTRACT.....	2
INTRODUCCIÓN	3
CAPÍTULO I	5
FUNDAMENTOS DE LA COCCIÓN POR INDUCCIÓN Y DE LAS COCINAS DE INDUCCIÓN MAGNÉTICA	5
1.1. La cocción por inducción	6
1.2. Fundamentos del calentamiento por inducción	6
1.2.1. Inducción electromagnética.	7
1.2.2. Efecto piel.....	8
1.2.3. Transferencia de Calor.	9
1.3. Cocinas de inducción.....	10
1.3.1. Generalidades.	10
1.3.2. Fuente de Alimentación.	10
1.3.3. Filtros y protecciones.....	10
1.3.4. Rectificación.	11
1.3.5. Control.....	11
1.3.6. Inversor de alta frecuencia.....	11
1.3.7. Bobina.	12
1.4. Inversores resonantes	12
1.4.1. Inversor resonante de medio puente.	13
1.4.2. Inversor cuasi-resonante.	14
1.4.3. A manera de conclusión.	15
CAPITULO II	16
ESTADO DEL ARTE EN LA COMPENSACIÓN DE ARMÓNICOS EN COCINAS DE INDUCCIÓN	16
2.1. Justificación.....	17
2.2. Generalidades de la generación de armónicos y su compensación.....	17
2.2.1. Una breve referencia sobre la calidad de la energía eléctrica.....	17
2.2.2. Armónicos.	18
2.2.3. Clasificación de los armónicos.....	19
2.2.4. Espectro armónico y distorsión armónica total.....	20
2.2.5. Armónicos y transferencia de potencia	21
2.3. Métodos para la reducción de armónicos	21
2.3.1. Filtrado pasivo de armónicos.	21
2.3.2. Filtrado activo de armónicos	25
CAPÍTULO III	27
ESTADO DEL ARTE EN LA COMPENSACIÓN DE ENERGÍA REACTIVA EN COCINAS DE INDUCCIÓN	27
3.1. Introducción.....	28

3.2.	Respuesta en corriente alterna de los elementos básicos de un circuito eléctrico: resistor, inductor y capacitor.....	28
3.2.1.	Respuesta en corriente alterna de un resistor.....	28
3.2.2.	Respuesta en corriente alterna de un inductor.....	29
3.2.3.	Respuesta en corriente alterna de un capacitor.....	31
3.2.4.	Respuesta en corriente alterna de una red mixta.....	33
3.2.5.	Triángulo de potencias	33
3.2.6.	Potencia en una carga resistiva	35
3.2.7.	Potencia en una carga inductiva	36
3.2.8.	Potencia en una carga capacitiva	37
3.3.	Corrección del factor de potencia en cocinas de inducción.....	38
3.3.1.	Generalidades de la corrección del factor de potencia.....	38
3.3.2.	Compensación de armónicos y circuito expreso de cocinas de inducción.	41
	CAPÍTULO IV.....	43
	COMPENSACIÓN DE ARMÓNICOS Y ENERGÍA REACTIVA EN COCINAS DE INDUCCIÓN Y ALIMENTADORES, UTILIZANDO FILTROS ACTIVOS Y PASIVOS.....	43
4.1.	Introducción.....	44
4.2.	Planeación de la evaluación de desempeño de los filtros en la compensación de armónicos y de energía reactiva en CI y alimentadores.	44
4.2.1.	Consideraciones generales.	44
4.2.2.	Identificación de escenarios de compensación.....	45
4.3.	Evaluación de desempeño de los filtros en la compensación de armónicos y de energía reactiva en CI y alimentadores	46
4.3.1.	Evaluación del desempeño de un filtro pasivo conectado en paralelo cerca de una carga no lineal como la CI.....	46
4.3.2.	Evaluación del desempeño de un filtro pasivo trifásico en paralelo con un alimentador de media tensión.....	54
4.3.3.	Evaluación del desempeño de un filtro activo tipo shunt trifásico, conectado en paralelo a un alimentador de media tensión.....	61
4.4.	A manera de conclusión.	65
	CONCLUSIONES	66
	REFERENCIAS.....	68
	ANEXOS.....	72
	ANEXO 1. Diagrama de bloques de una cocina de inducción y formas de onda a la salida de cada bloque.....	72
	ANEXO 2. PAPER: Sobre la compensación de armónicos y energía reactiva en cocinas de inducción.....	72

LISTA DE FIGURAS

Fig. 1. 1. Equivalencia de la operación de un transformador y de una CI (esquema bobina- carga).	6
Fig. 1. 2. Distribución de la corriente en función de la profundidad del conductor.	8
Fig. 1. 3. Curva de la profundidad de penetración en función de la frecuencia para diversos materiales.....	9
Fig. 1. 4. Operación de una cocina de inducción.....	9
Fig. 1. 5. Diagrama de bloques de una cocina de inducción.	10
Fig. 1. 6. Estructura de un IGBT.	11
Fig. 1. 7. Esquemas inversores resonantes utilizados en las CI.....	12
Fig. 1. 8. Esquema de un inversor resonante de medio puente.	13
Fig. 1. 9. Formas de onda de disparo de los IGBT y señales de salida de un IR de medio puente.....	14
Fig. 1. 10. Esquema de un inversor cuasi-resonante.	14
Fig. 1. 11. Formas de onda de disparo del IGBT y señal de salida de un inversor cuasi-resonante.	15
Fig. 2. 1. Influencia de los armónicos en la deformación de la señal senoidal fundamental.....	18
Fig. 2. 2. Espectro armónico de una señal.	20
Fig. 2. 3. Configuración de filtros pasivos.....	22
Fig. 2. 4. Esquema general para filtrado pasivo de armónicos en una red monofásica tres hilos a una CI.....	25
Fig. 2. 5. Conexión de un sistema de compensación tipo FAP con la red eléctrica, y con la carga no lineal.....	25
Fig. 3. 1. Señales de voltaje y corriente en un elemento puramente resistivo de un circuito de CA.	29
Fig. 3. 2. Parámetros que determinan la oposición de un elemento inductivo al flujo de carga.....	29
Fig. 3. 3. Figura 19. Respuesta senoidal de un elemento inductivo.....	30
Fig. 3. 4. Señales de voltaje y corriente en un elemento puramente inductivo.	30
Fig. 3. 5. Respuesta senoidal de un elemento capacitivo.....	32
Fig. 3. 6. Señales de voltaje y corriente en un elemento puramente capacitivo.....	32
Fig. 3. 7. Representación de la potencia entregada a una carga.	34
Fig. 3. 8. Diagrama de potencias para las cargas inductivas.....	35
Fig. 3. 9. Diagrama de potencias para las cargas capacitivas.....	35
Fig. 3. 10. Señal de potencia en una carga puramente resistiva de un circuito de CA.	36
Fig. 3. 11. Señal de potencia en una carga puramente inductiva de un circuito de CA.	37
Fig. 3. 12. Señal de potencia en una carga puramente capacitiva de un circuito de CA.	38

Fig. 3. 13. Compensación de energía reactiva de acuerdo al tipo de conexión.	40
Fig. 3. 14. Esquema general de compensación pasiva de energía reactiva y de armónicos en una red trifásica de alimentación a CI.	42
Fig. 4. 1. Escenarios de ubicación de filtros pasivos para armónicos.	46
Fig. 4. 2. Modelo en Simulink para evaluación del desempeño de un filtro pasivo monofásico (220V, 60Hz) conectado en paralelo a una CI.	49
Fig. 4. 3. Pantalla de Simulink que muestra la THD de corriente sin el filtro pasivo monofásico conectado a la CI.	51
Fig. 4. 4. Pantalla de Simulink que muestra la THD de corriente con el filtro pasivo monofásico conectado a la CI.	52
Fig. 4. 5. Formas de onda de la potencia activa y reactiva en la red (Pq Fuente), en la carga (PQ Carga); y, compensación de potencia reactiva en los filtros (PQ Comp).	53
Fig. 4. 6. Formas de onda del voltaje y corriente en la red, corriente en la carga, y, corriente de compensación del filtro.	54
Fig. 4. 7. Modelo en Simulink para evaluación del desempeño de un filtro pasivo trifásico (13.8kV, 60Hz) conectado en paralelo a un alimentador de media tensión.	57
Fig. 4. 8. Pantalla de Simulink que muestra la THD de corriente sin el filtro pasivo trifásico conectado al alimentador.	58
Fig. 4. 9. Pantalla de Simulink que muestra la THD de corriente con el filtro pasivo trifásico conectado al alimentador.	59
Fig. 4. 10. Formas de onda de la potencia activa y reactiva en la red (PQ Fuente), en las cargas no lineales (PQ Cargas no Lineales); y, compensación de potencia reactiva de los filtros (PQ Filtros).	60
Fig. 4. 11. Formas de onda de voltajes y corrientes en la red, corrientes en la carga, y, corrientes de los filtros.	61
Fig. 4. 12. Modelo en Simulink para evaluación del desempeño de un filtro activo trifásico (13.8kV, 60Hz) conectado en paralelo a un alimentador de media tensión.	62
Fig. 4. 13. Pantalla de Simulink que muestra la THD de corriente con el filtro activo trifásico conectado al alimentador.	63
Fig. 4. 14. Formas de onda de la potencia activa y reactiva en la red (PQ Fuente), en las cargas no lineales (PQ Cargas no Lineales); y, compensación de potencia reactiva del filtro activo (PQ Compensación).	64
Fig. 4. 15. Formas de onda de voltajes y corrientes en la red, corrientes en la carga, y, corrientes de compensación.	65

LISTA DE TABLAS

Tabla 2. 1. Parámetros de los armónicos más usuales.....	20
Tabla 3. 1. Valores del factor “K” más usuales.....	41
Tabla 4. 1. Frecuencia del armónico, orden y magnitud.....	45
Tabla 4. 2. Variables a considerar para la evaluación del desempeño de un filtro pasivo conectado en paralelo cerca de una carga no lineal como la CI.	47
Tabla 4. 3. Valores de diseño del filtro pasivo monofásico.....	50
Tabla 4. 4. Variables a considerar para la evaluación del desempeño de un filtro pasivo trifásico conectado en paralelo con un alimentador de media tensión. ...	54
Tabla 4. 5. Valores de diseño del filtro pasivo trifásico.....	55

RESUMEN

En este trabajo se explica los fundamentos de la cocción de alimentos por inducción, se describe el estado del arte en la compensación de armónicos y energía reactiva (factor de potencia) en cocinas de inducción, y, se analiza el desempeño de filtros pasivos en redes monofásicas, y de filtros pasivos y activos conectados a redes trifásicas, para compensar los problemas generados por el funcionamiento de cocinas de inducción.

PALABRAS CLAVES: cocinas de inducción magnética, operación de las cocinas de inducción magnética, compensación de armónicos, compensación de energía reactiva, filtros activos y pasivos.

ABSTRACT

This research work explains the bases of cooking with induction; the art is described in harmonic compensation and reactive power (power factor) in induction stoves; furthermore, it was analyzed the development of passive filters in phase networks and active phase networks connected to offset the problems caused by the operation of induction stoves.

KEY WORDS: Magnetic induction stoves, operation of the magnetic induction cookers, harmonic compensation, reactive power compensation, active and passive filters.

INTRODUCCIÓN

La tecnología de cocción por inducción no solo presenta una mejor eficiencia energética, sino que también registra una mayor rapidez de cocción, a tal punto que esta tecnología está reemplazando a los sistemas tradicionales de cocción (leña, gas, y, resistencia eléctrica) [1], [2].

Ya que las políticas nacionales han marcado un gran interés de la cocción por inducción, desde la Sección de Electrónica y Telecomunicaciones del Departamento de Ciencias de la Computación y Electrónica de la UTP, se planteó la iniciativa de iniciar una serie de acciones que permitan conocer los principios de operación de las cocinas de inducción (CI), identificar su impacto en las redes eléctricas, y, difundir los resultados entre los interesados.

En este contexto, y, considerando el tratamiento que se ha dado en el país a la introducción de las CI, el profundizar en torno a la compensación de armónicos y de energía reactiva (factor de potencia) en CI es relevante. Establecido el principio de funcionamiento de una CI, y el estado del arte en la compensación de armónicos y factor de potencia en CI, el equipo de trabajo decidió investigar el comportamiento de filtros pasivos conectados a CI, y, el desempeño de filtros pasivos y activos conectados en uno de los alimentadores trifásicos que proveen de energía eléctrica a un grupo de CI. El desempeño de los filtros en cada uno de los escenarios se analizó utilizando modelos matemáticos desarrollados en el aplicativo Simulink [31], perteneciente a la plataforma MATLAB [32].

En este documento, se describe los resultados obtenidos en cuatro capítulos. En el capítulo 1 se describe los fundamentos de la cocción de alimentos por inducción, y, se explica el funcionamiento de los diversos bloques de una cocina de inducción magnética, enfatizando la operación de los inversores resonantes de alta frecuencia.

En el capítulo 2 se describe el estado del arte en la compensación de armónicos en cocinas de inducción, partiendo de una referencia sobre calidad de energía y de la explicación de la naturaleza de los armónicos.

En el capítulo 3 se analiza el estado del arte en la compensación de energía reactiva en cocinas de inducción, partiendo de una referencia sobre la respuesta de los elementos básicos en corriente alterna, potencia aparente y reactiva, y, la corrección del factor de potencia.

En el capítulo 4 se presentan los resultados obtenidos al evaluar el desempeño de filtros pasivos conectados a redes monofásicas, y, de filtros pasivos y activos conectados a redes trifásicas, en la compensación de armónicos y de energía reactiva (factor de potencia) en cocinas de inducción y en los alimentadores que las proveen de energía eléctrica.

CAPÍTULO I
FUNDAMENTOS DE LA COCCIÓN POR INDUCCIÓN Y DE LAS COCINAS DE
INDUCCIÓN MAGNÉTICA

1.1. La cocción por inducción

La aparición de los modernos dispositivos electrónicos semiconductores de potencia (BJTs, MOSFETs e IGBTs), permitió el abaratamiento de los sistemas de calentamiento por inducción, y, permitió la consiguiente introducción en el mercado de consumo a tal punto que, la cocción por inducción está reemplazando a los sistemas tradicionales de cocción (leña, gas, y, resistencia eléctrica) [1].

La tecnología de cocción por inducción no solo presenta una mejor eficiencia energética, sino que también registra una mayor rapidez de cocción. La cocción por inducción alcanza niveles de eficiencia del 80,6%, la eficiencia de la cocción eléctrica por resistencia llega al 65,3%, mientras que la basada en gas alcanza el 51,3% [2].

1.2. Fundamentos del calentamiento por inducción

El funcionamiento de una cocina de inducción (CI) puede explicarse a través de la operación de un transformador (ver Fig. 1. 1) [3]. La bobina de la CI tiene que maximizar la energía calorífica generada en el recipiente, construido con materiales de baja resistencia y alta permeabilidad magnética [4]. Entonces, el calentamiento por inducción se compone de tres factores básicos: la inducción electromagnética, el efecto piel, y la transferencia de calor.

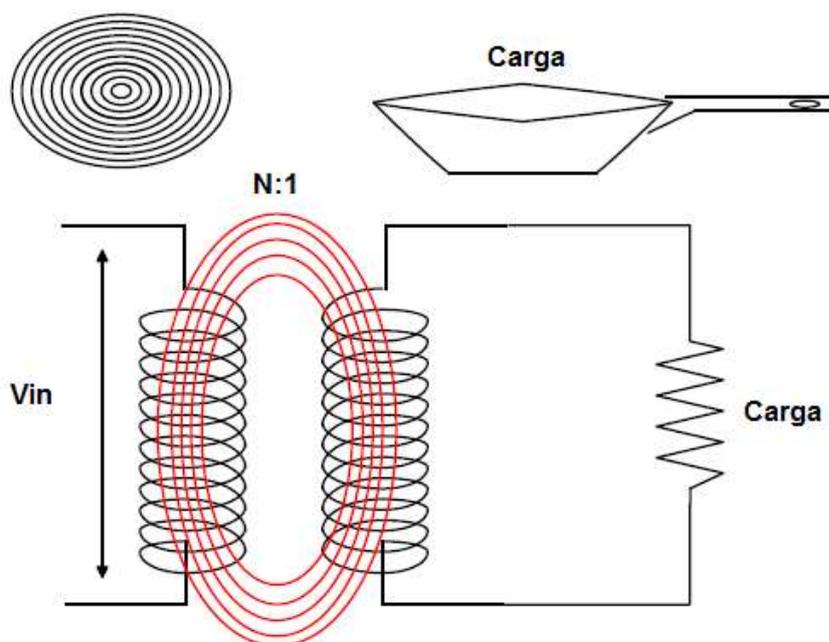


Fig. 1. 1. Equivalencia de la operación de un transformador y de una CI (esquema bobina- carga).

Fuente: http://www.onsemi.com/pub_link/Collateral/AND9166-D.PDF

1.2.1. Inducción electromagnética.

El calentamiento por inducción se basa en las leyes de la inducción magnética (Ley de Faraday y Ampere) y del efecto Joule [5].

De acuerdo a la Ley de Ampere, cuando una corriente alterna fluye por una bobina, un campo magnético es formado alrededor de la misma (ver expresión (1)).

$$NI = Hl \quad (1)$$

En dónde,

- N, es el número de espiras en el conductor
- I, es la corriente que lo atraviesa, A
- H, es la intensidad del campo magnético, A/m
- l, es la longitud del circuito, m

Si la corriente que pasa por el inductor es variante en el tiempo, el campo magnético producido también lo será, con lo cual se obtendrá un flujo magnético alterno.

Según la ley de Faraday, en toda sustancia conductora que se encuentra dentro de un campo magnético variable, se producirá una fuerza electromotriz cuyo valor se determina a través de la expresión (2) [6].

$$\varepsilon = -N \frac{d\phi_m}{dt} \quad (2)$$

En dónde,

- ε , es el voltaje inducido (fem), V
- N, es el número de espiras en el conductor
- ϕ_m , es el flujo del campo magnético, Wb

Finalmente, el calentamiento del recipiente se produce al generarse dentro de éste, corrientes inducidas de Foucault o de Eddy, las cuales disipan energía en forma de calor, según lo establece la ley de Joule tal como lo muestra la ecuación (3) [2].

$$P = \frac{E^2}{R} \quad (3)$$

En dónde,

- P, es la potencia disipada en el recipiente, W
- E, es el voltaje inducido, V

R, es la resistencia determinada por la resistividad ρ y la permeabilidad μ del objeto conductor, Ω

1.2.2. Efecto piel.

Cuando una corriente alterna fluye en un conductor, se presenta la tendencia a que la corriente fluya principalmente por su superficie, con lo que la distribución no es uniforme, dependiendo de la profundidad y de la frecuencia de la corriente (ver ecuaciones (4) y (5)) [4]. La densidad de la corriente disminuye exponencialmente a la profundidad de la superficie, tal como lo muestra la Fig. 1. 2.

$$J = J_s e^{-d/\delta} \quad (4)$$

En dónde,

J, es la densidad de corriente, A/m^2

J_s , es la densidad de corriente en la superficie del conductor, A/m^2

d, es la profundidad del conductor, mm

δ , es la profundidad de penetración, mm

$$\delta = \sqrt{\frac{\rho}{\pi f \mu}} \quad (5)$$

En dónde,

ρ , es la resistividad del conductor, Ωm

f, es la frecuencia de operación, Hz

μ , es la permeabilidad magnética, H/m

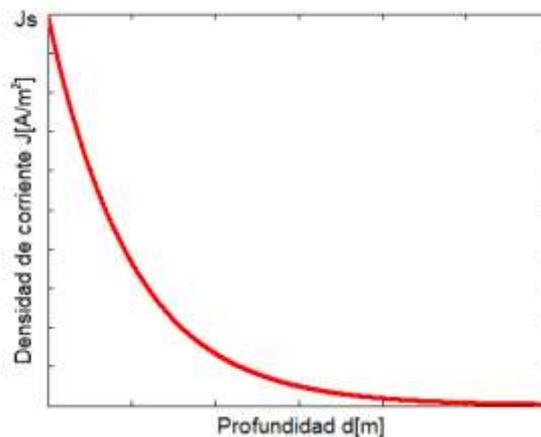


Fig. 1. 2. Distribución de la corriente en función de la profundidad del conductor.
Elaboración: Autores.

La Fig. 1. 3 muestra curvas de la profundidad de penetración, en función de la frecuencia de la corriente, para algunos materiales.

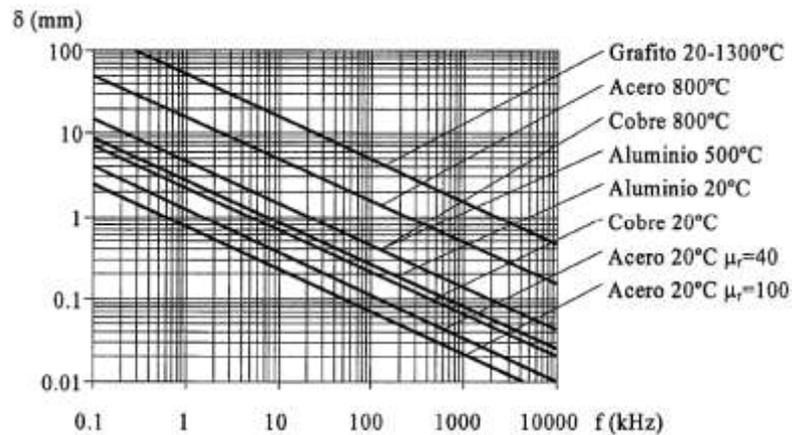


Fig. 1. 3. Curva de la profundidad de penetración en función de la frecuencia para diversos materiales

Fuente: <http://bibdigital.epn.edu.ec/bitstream/15000/2165/1/CD-2931.pdf>

1.2.3. Transferencia de Calor.

En una CI se registra el apareamiento de corrientes de Eddy (ver Fig. 1. 4) que generan calor. La cantidad de calor generado se relaciona al efecto Joule o calentamiento óhmico, que explica que la energía portada por la corriente eléctrica a través de un conductor, se disipa como calor (ver expresión (6)) [2].

$$P = VI \quad (6)$$

En dónde,

- P, es la potencia convertida de energía eléctrica a energía térmica, W
- I, es la corriente que fluye por el conductor (corrientes inducidas), A
- V, es el voltaje aplicado al recipiente, V

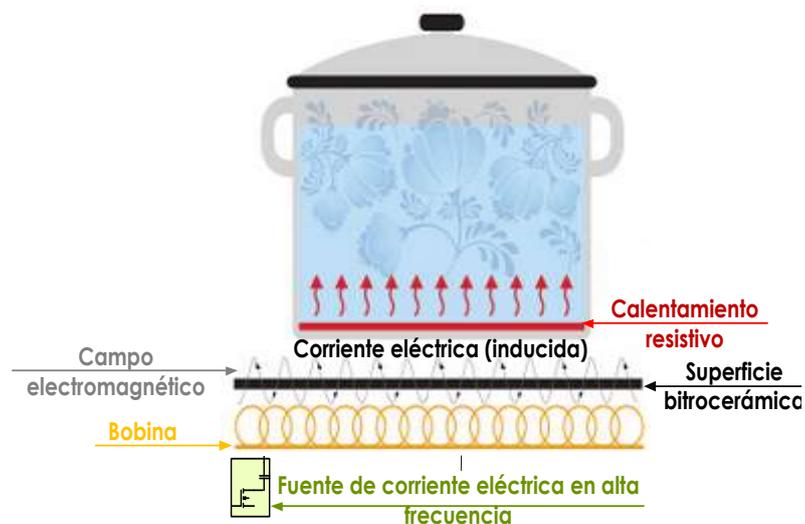


Fig. 1. 4. Operación de una cocina de inducción.

Fuente: <http://www.ecuadorcambia.com/>

1.3. Cocinas de inducción

1.3.1. Generalidades.

En una CI de mercado, una corriente eléctrica de alta frecuencia (entre 20 y 100 KHz) fluye a través de una bobina plana de cobre en forma de espiral, produciendo un campo electromagnético oscilante. Este campo induce en un recipiente (olla, sartén, cacerola, etc.) una corriente eléctrica, que al fluir por el recipiente produce calentamiento resistivo generando calor que se transfiere a los alimentos (ver Fig. 1. 4).

En una CI, el valor de la corriente es grande mientras que el voltaje se mantiene bajo [4]. La potencia disipada es proporcionada por un circuito resonante tipo RLC, en serie o en paralelo, cuyos elementos se escogen de forma tal que el circuito se comporta como uno resistivo puro, eliminando los efectos de reactancia y mejorando el factor de potencia.

Funcionalmente, una CI está formada por seis bloques: fuente de alimentación, filtros y protecciones, rectificación, control, inversor de alta frecuencia, y, la bobina que induce el campo magnético en el recipiente (ver Fig.1. 5 y anexo 1).

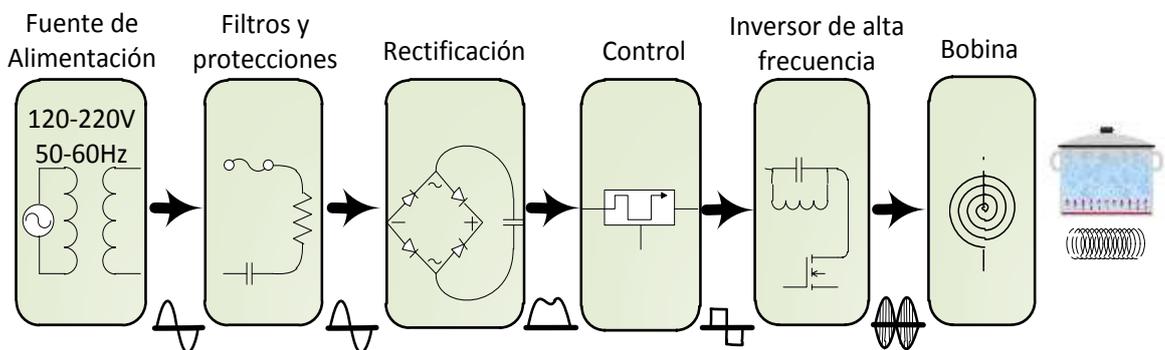


Fig. 1. 5. Diagrama de bloques de una cocina de inducción.

Elaboración: Autores.

1.3.2. Fuente de Alimentación.

La fuente de alimentación se conecta directamente a la red eléctrica de baja tensión, siempre que se cumpla con la tensión y frecuencia especificadas por el fabricante.

1.3.3. Filtros y protecciones.

Los filtros de interferencia electromagnética (EMI) o filtros de compatibilidad electromagnética (EMC), restringen el ingreso a la red eléctrica, de la energía electromagnética potencialmente generada en el circuito de potencia del inversor, ante las

altas frecuencias de la señal [7]. En algunos diseños de CI de baja gama, se obvia esta protección.

1.3.4. Rectificación.

El bloque de rectificación proporciona voltaje y corriente DC, a los elementos activos y pasivos de los bloques siguientes.

1.3.5. Control.

El bloque de control permite al usuario regular la potencia o los tiempos de cocción, a través de una pantalla digital con escalas numéricas [10]. Adicionalmente, el bloque de control se encarga de gestionar la operación de los actuadores.

1.3.6. Inversor de alta frecuencia.

El inversor de alta frecuencia genera una onda de voltaje o corriente alterna, de determinada magnitud y frecuencia, a partir de una fuente de energía continua. Su funcionamiento se basa en la conversión CD a CA, utilizando conmutadores rápidos como los denominados IGBT's (Insulated Gate Bipolar Transistor) [11]. Un IGBT es un conmutador electrónico que puede manejar altas potencias a altas frecuencias de conmutación, mediante una señal de CD aplicada a la terminal de su compuerta le permite conducir entre sus terminales emisor-colector (ver Fig. 1. 6).

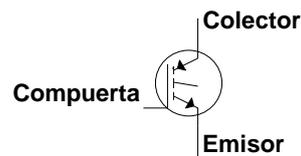


Fig. 1. 6. Estructura de un IGBT.
Elaboración: Autores.

Generalmente se emplean inversores resonantes conformados por un resistor, un capacitor, y, un inductor, conectados en serie o en paralelo (ver Fig. 1. 7). En estos esquemas, la frecuencia de resonancia responde a la velocidad de transferencia de energía entre los elementos, y se determina a través de la ecuación (7) [3].

$$f_{\text{res}} = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (7)$$

En dónde,

- f_{res} , es la frecuencia de resonancia del circuito, Hz
- L , es la inductancia en el inductor, H
- C , es la capacitancia en el capacitor, F

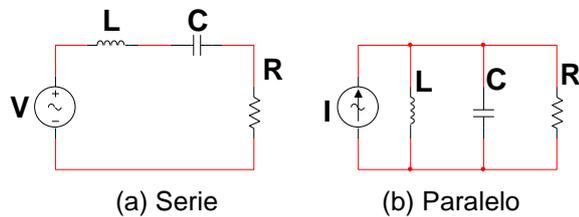


Fig. 1. 7. Esquemas inversores resonantes utilizados en las CI.
Elaboración: Autores.

Las reactancias inductiva y capacitiva se calculan mediante las expresiones (8) y (9) respectivamente, mientras que el valor de la impedancia de un resonador en serie, se determina por la expresión (10).

$$X_L = j2\pi fL \quad (8)$$

$$X_C = \frac{1}{j2\pi fC} \quad (9)$$

$$|Z| = \sqrt{R^2 + \left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)^2} \quad (10)$$

En dónde,

- X_L , es la reactancia inductiva, Ω
- j , es el operador del fasor
- f , es la frecuencia de trabajo del circuito, Hz
- L , es la inductancia en el inductor, H
- X_C , es la reactancia capacitiva, Ω
- C , es la capacitancia en el capacitor, F
- $|Z|$, es la impedancia del resonador en serie, Ω
- R , es la resistencia del resistor, Ω

1.3.7. Bobina.

Generalmente se emplea bobinas planas en forma de espiral. Estas bobinas se encargan de producir un campo electromagnético cerca al recipiente, campo que luego se transformará en calentamiento resistivo para la cocción de los alimentos.

1.4. Inversores resonantes

Los inversores resonantes (IR) son el bloque fundamental de una CI. Un IR incorpora un

circuito tanque para crear las oscilaciones (usualmente sinusoidales), y, trabaja a muy altas frecuencias de conmutación con pocas pérdidas de potencia, utilizando técnicas de control como PWM [12]. El trabajo con frecuencias de conmutación en el orden de los kHz, permite que los inductores y capacitores sean de menor tamaño y precio.

En las CI se utilizan principalmente 2 topologías para los IR: el IR de medio puente, y, el inversor cuasi-resonante [3], [4].

1.4.1. Inversor resonante de medio puente.

El IR en serie de medio puente consta de 2 capacitores de igual valor, conectados en serie a través de la señal de entrada CD, de tal forma que cada capacitor se carga a la mitad del voltaje de entrada ($V_0/2$).

Este tipo de IR es más utilizado en las CI de múltiples hornillas o focos. El circuito equivalente de la carga es un circuito resonante tanque, conformado por una bobina inductiva, un capacitor resonante, y, la resistencia equivalente del recipiente [4].

En este IR, la etapa de potencia se compone de dos interruptores IGBT con diodos antiparalelos, dos condensadores, y, una bobina (ver Fig. 1. 8). En relación a la expresión (7), este circuito tiene tres modos de operación: para $f < f_{res}$ se comporta como un circuito capacitivo, para $f > f_{res}$ se comporta como un circuito inductivo, y, para $f = f_{res}$ se comporta como circuito resistivo.

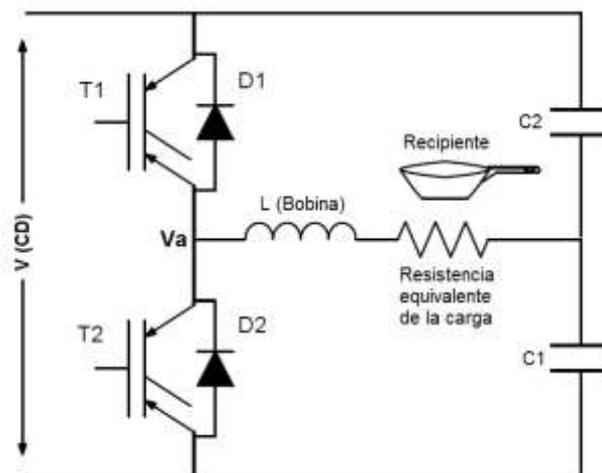


Fig. 1. 8. Esquema de un inversor resonante de medio puente.
Fuente: http://www.onsemi.com/pub_link/Collateral/AND9166-D.PDF

El principio de operación del circuito de potencia del IR se muestra en la Fig. 1. 9. $V_{Compuerta T1}$, y, $V_{Compuerta T2}$ son las señales de disparo de los IGBT. El voltaje de salida V_a se amortigua mediante el capacitor (señal senoidal de color rojo). El semiciclo positivo

de t_{0-2} es controlado por $V_{\text{Compuerta T1}}$ y el negativo t_{2-4} por $V_{\text{Compuerta T2}}$.

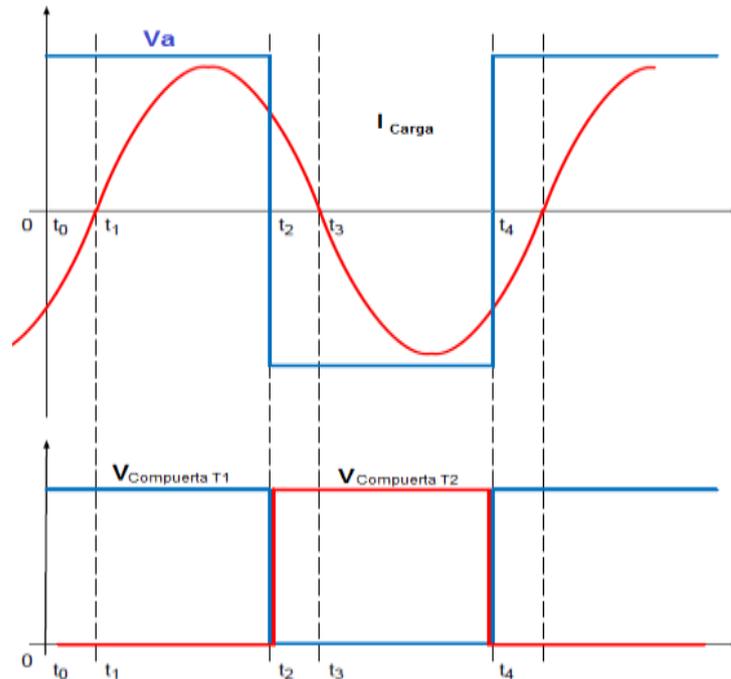


Fig. 1. 9. Formas de onda de disparo de los IGBT y señales de salida de un IR de medio puente.

Fuente: http://www.onsemi.com/pub_link/Collateral/AND9166-D.PDF

1.4.2. Inversor cuasi-resonante.

Este tipo de inversor es el más utilizado en las CI, inversores de microondas, aplicaciones de calentamiento por inducción, y otras aplicaciones. La operación de un inversor cuasi-resonante es similar a la de un IR de medio puente (ver Fig. 1. 10), pero difieren en los métodos de control de disparo, ya que utiliza un solo IGBT, el diodo antiparalelo, un capacitor y el inductor [10].

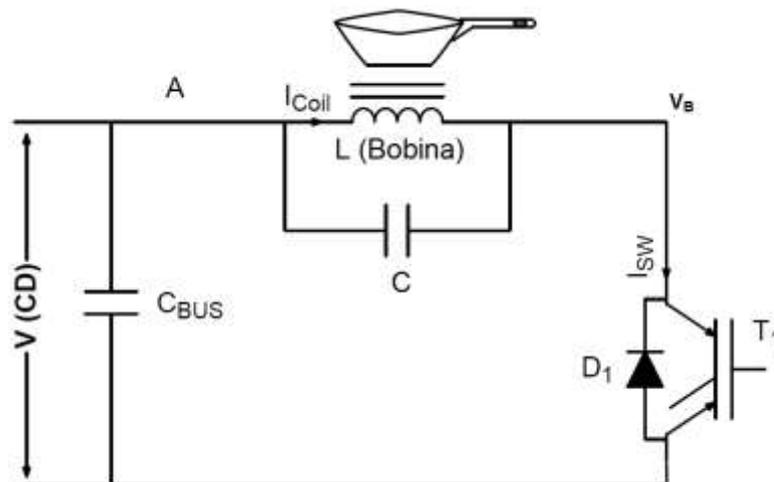


Fig. 1. 10. Esquema de un inversor cuasi-resonante.

Fuente: http://www.onsemi.com/pub_link/Collateral/AND9166-D.PDF

Las señales de este inversor se muestran en la Fig. 1. 11. $V_{\text{Compuerta T1}}$ controla el disparo del IGBT, V_B es la señal del voltaje salida, I_{Load} es determinada por el circuito tanque y será entrega al recipiente. Desde t_{0-1} el IGBT se activa y carga el capacitor, desde t_{1-3} el capacitor se descarga entregando su energía a la carga.

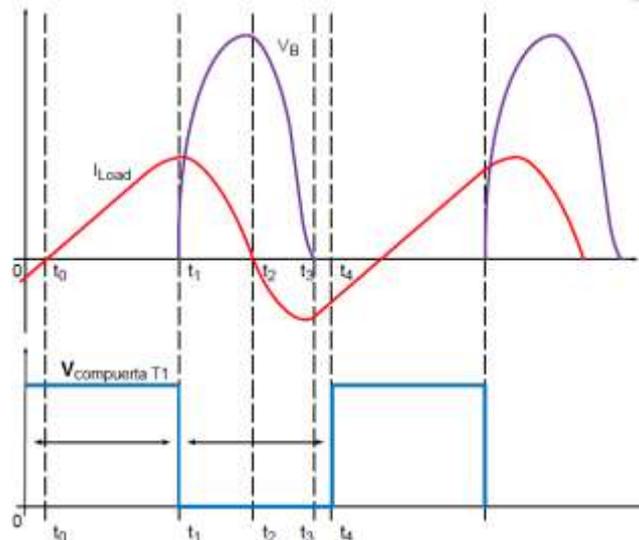


Fig. 1. 11. Formas de onda de disparo del IGBT y señal de salida de un inversor cuasi-resonante.

Fuente: http://www.onsemi.com/pub_link/Collateral/AND

1.4.3. A manera de conclusión.

Las 2 topologías de IR tienen ventajas y desventajas. Los IR de medio puente, tienen conmutación estable, son de bajo costo y de fácil diseño; mientras que su principal desventaja radica en la necesidad de 2 circuitos de switcheo. Los inversores cuasi-resonantes necesitan de un único circuito de switcheo, por lo que el circuito impreso es más pequeño, y, se reducen los costos de producción en masa; mientras que su principal desventaja es su conmutación inestable.

Las CI se comportan como una carga no lineal [13], [14]. Algunos modelos tienen potencias máximas de trabajo de cerca de 7200W [15], por lo que es muy probable que su bloque de rectificación y su inversor de alta frecuencia inyecten armónicos en la red eléctrica, afectando la calidad de energía eléctrica (CEL). Por esta razón será necesario a futuro, determinar el efecto de las CI en la CEL en la red de distribución, e, identificar algunos métodos para minimizar los posibles efectos.

CAPITULO II
ESTADO DEL ARTE EN LA COMPENSACIÓN DE ARMÓNICOS EN COCINAS DE
INDUCCIÓN

2.1. Justificación

En la bibliografía [16], [17] se explica que la generación y transporte máximos de energía activa, que produzca trabajo útil, son fundamentales en el concepto de calidad y eficiencia energética. El máximo requerido se logra compensando las cargas de energía reactiva y la energía de distorsión armónica. Esta distorsión armónica es generada por algunos equipos eléctricos y electrónicos, que contienen componentes no lineales (rectificadores, reactancias, variadores de velocidad, arrancadores electrónicos, etc.).

Por otra parte, en la bibliografía [13], [18] se recalca que si bien las CI se clasifican como cargas no lineales, la distorsión armónica que generan es inferior a la provocada por una laptop. En [4] se señala que los circuitos resonantes de medio puente son ampliamente utilizados en las CI, y, que durante su operación se comportan como un circuito resistivo puro a la frecuencia de resonancia del diseño. De no cumplirse esta condición (para frecuencias diferentes a la de resonancia), se afectaría la calidad de energía en la red de distribución.

En este contexto, se decidió continuar con la investigación propuesta para este proyecto, profundizando tanto en la compensación de armónicos como en la del factor de potencia. Este documento presenta los resultados obtenidos al establecer el estado del arte en la compensación de armónicos.

2.2. Generalidades de la generación de armónicos y su compensación

2.2.1. Una breve referencia sobre la calidad de la energía eléctrica.

En términos generales, el concepto de calidad en la provisión de energía eléctrica (CEL) incluye 2 dimensiones: confiabilidad y disponibilidad, y, calidad de potencia eléctrica [6].

La provisión de energía eléctrica se considera confiable y disponible, si se puede contar con el servicio donde y cuando se necesite, sin fallas ni cortes. La calidad de potencia eléctrica se relaciona si la tensión, frecuencia, y, forma de onda son las adecuadas.

La CEL puede ser analizada desde 3 tres perspectivas: la del consumidor, la del fabricante de equipos, y, la del proveedor de energía. Para el consumidor es relevante la afectación que las variaciones de tensión provocan en los equipos. Para el fabricante de equipos, prima el garantizar la tolerancia suficiente que permita evitar daños en los mismos. Para el proveedor, son importantes las características de las corrientes consumidas por sus clientes, y, las posibles afectaciones a la red en función de la calidad

de consumo [17].

Un aspecto influyente en la calidad de energía es la distorsión armónica. Un usuario puede agregar inconscientemente distorsión a la red, al conectar cargas no lineales.

En nuestro país, el ente regulador de los parámetros de la energía eléctrica y de la calidad del servicio eléctrico de distribución, es el Consejo Nacional de Electricidad (CONELEC).

2.2.2. Armónicos.

Los armónicos son señales senoidales o cosenoidales, cuyas frecuencias son múltiplos enteros de la frecuencia fundamental de alimentación [19].

Los armónicos son generados por cargas no lineales que, conectadas a la red eléctrica alterna y senoidal, absorben corrientes no lineales, cuya amplitud y frecuencia dependen de la deformación de la onda de corriente [17] (ver Fig. 2. 1). Generalmente, los armónicos de tercer, quinto y séptimo orden agregan el mayor nivel de distorsión armónica, independientemente del tipo de carga [20], [21].

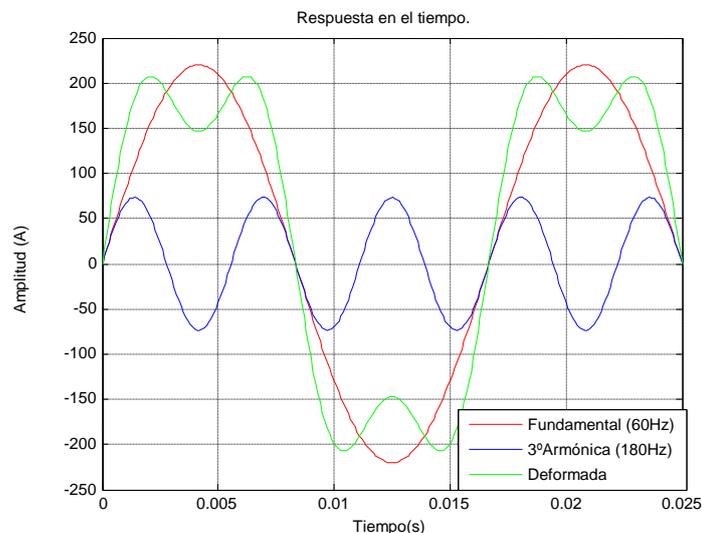


Fig. 2. 1. Influencia de los armónicos en la deformación de la señal senoidal fundamental.

Elaboración: Autores.

La presencia de armónicos en la red disminuye el factor de potencia al aumentar la potencia a transportar, dispara interruptores de forma repentina, incrementa el calentamiento de transformadores, produce vibraciones y sobrecargas en las máquinas, entre otros.

Por otra parte, el perjuicio económico de la presencia de armónicos se refiere a costos visibles y costos ocultos. Como visible se identifica el mayor consumo eléctrico

relacionado con la existencia de energía reactiva. En el grupo de costos ocultos se incluye las pérdidas en distribución, las pérdidas de potencia y energía, la inversión en la ampliación de instalaciones, y, los costos relacionados al paro de procesos productivos, que causan problemas.

Algunos equipos eléctricos y electrónicos inducen armónicos en la red eléctrica de distribución. Entre estos se nombra a los equipos electrónicos conectados a la red monofásica, a los equipos de calentamiento por inducción magnética, a los equipos de soldadura eléctrica, a los arrancadores electrónicos, a los variadores de velocidad, entre otros. En este contexto, y, debido a que como política de gobierno se prevé sustituir el uso de gas licuado de petróleo por electricidad para uso doméstico en cocción de alimentos y calentamiento de agua [22], existe preocupación en torno a que el ingreso de la nueva carga en la red, podría afectar la CEL.

2.2.3. Clasificación de los armónicos.

Los armónicos se clasifican de acuerdo a tres parámetros: orden, frecuencia, y, secuencia.

Considerando que la frecuencia fundamental en la red eléctrica ecuatoriana es de 60 Hz, el número de orden se define como la relación entre la frecuencia del armónico y la frecuencia fundamental (ver ecuación (11)).

$$n = \frac{f_n}{f_{60}} \quad (11)$$

En dónde,

- n, es el número de armónico
- f_n , es la frecuencia del armónico, Hz
- f_{60} , es la frecuencia fundamental, Hz

Se conoce como frecuencia del armónico al resultado de multiplicar el número del orden del armónico por la frecuencia fundamental.

La secuencia del armónico responde al giro del armónico con respecto a la fundamental. De acuerdo a la secuencia, los armónicos son (+), (-), y, (0). Los armónicos de secuencia (+) tienen rotación directa, y, producen calentamiento de conductores, rotura de circuitos, etc. Los armónicos de secuencia (-) tienen rotación inversa, y, producen un efecto de freno además de calentamiento de conductores. Los armónicos de secuencia (0) o “triplens”, no tienen sentido de rotación, pero pueden causar calentamiento [17].

Las ondas simétricas contienen únicamente armónicas impares, mientras que las ondas asimétricas tienen tanto armónicas pares como impares [23]. La Tabla 2. 1 muestra los parámetros de los armónicos más usuales.

Tabla 2. 1. Parámetros de los armónicos más usuales.

Orden	Frecuencia (Hz)	Secuencia
1 (fundamental)	60	+
2	120	-
3	180	0
4	240	+
5	300	-
6	360	0
7	420	+
8	480	-
9	540	+
---	---	---
n	60*n	---

Elaboración: Autores

2.2.4. Espectro armónico y distorsión armónica total

Utilizando la transformada rápida de Fourier, cualquier señal puede ser descompuesta en sus armónicos, en el dominio de la frecuencia. En la Fig. 2. 2 se puede observar el espectro armónico de una señal senoidal; la fundamental 60Hz, y los armónicos 3^{ro}, 5^{to}, y 7^{mo}.

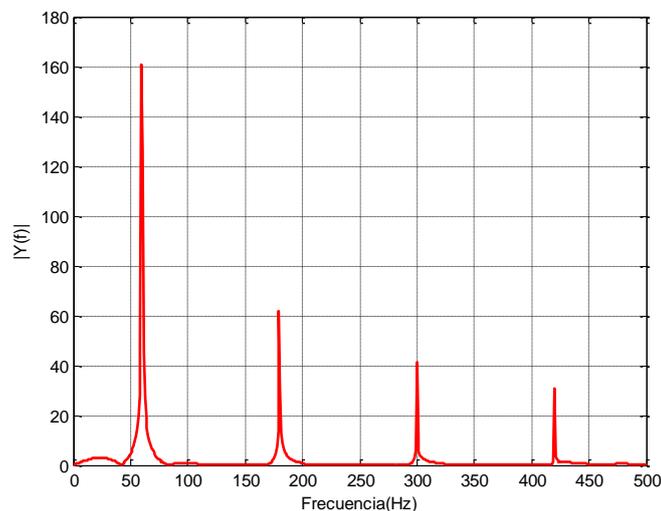


Fig. 2. 2. Espectro armónico de una señal.

Elaboración: Autores

Se conoce como distorsión armónica total (THD) a la relación entre el contenido armónico de la señal, y la primera armónica o fundamental. La THD tiene un valor comprendido entre 0% e infinito [24], y, se define a través de la ecuación (12). La distorsión se mide por separado para corriente y para voltaje.

$$\text{THD} = \frac{\sqrt{\sum_{a=2}^n I_{h_a}^2}}{I_{h_1}} 100\% \quad (12)$$

En dónde,

THD, es la distorsión armónica total, %
a, es el número de orden del armónico
 I_{h_a} , es la corriente del armónico a, A
 I_{h_1} , es la corriente de la fundamental, A

2.2.5. Armónicos y transferencia de potencia

Al aumentar la distorsión armónica, la forma de onda se asemeja a pulsos con grandes picos de corriente. El valor eficaz de la corriente aumenta, lo que provoca una potencia aparente mayor, mientras que la potencia activa y el factor de potencia se mantienen sin cambio (puesto que dependen de la frecuencia fundamental) [24].

En esta situación, los equipos eléctricos se sobrecalientan, y, los vatímetros de discos de inducción operan incorrectamente, ya que están diseñados para funcionar con ondas no distorsionadas y a la frecuencia fundamental [24].

2.3. Métodos para la reducción de armónicos

Para reducir armónicos en potencia se emplea una gama de métodos, entre los que se menciona la adecuación de instalaciones, la incorporación de transformadores de aislamiento con desplazamiento, la incorporación de inductancias antiarmónicas; el redimensionando del neutro; y, la instalación de filtros pasivos y activos [25]. En el marco de este proyecto, se decidió prestar especial interés al funcionamiento de los filtros.

2.3.1. Filtrado pasivo de armónicos.

En el filtrado pasivo, se utiliza resistencias, inductancias y capacitancias para la cancelación de la energía reactiva y de los armónicos [25].

En este filtrado se utilizan filtros de sintonizado simple, pasa bajas, pasa altas, pasa banda, o, rechaza banda. Los filtros tienen un orden determinado por el número de elementos reactivos que lo componen [20]. La Fig. 2. 3 muestra los filtros pasivos de mayor uso. El filtro pasivo más común es el de sintonía simple, debido a su diseño sencillo y a su bajo costo [26].

La fuente de alimentación, la carga y el filtro, se conectan en paralelo, lo que proporciona

una menor impedancia a la corriente armónica en la frecuencia de sintonía, de tal forma que las corrientes armónicas se desvíen por la ruta de menor impedancia a través del filtro [26].

Para el diseño de un **filtro de sintonía simple**, la selección adecuada del tamaño del condensador es muy importante desde el punto de vista del factor de potencia. La relación entre la reactancia capacitiva y la potencia reactiva, se expresa a través de la expresión (13).

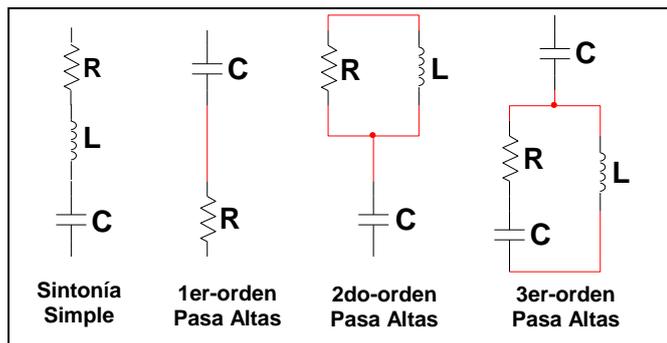


Fig. 2. 3. Configuración de filtros pasivos.
Elaboración: Autores.

$$Q_{\text{filtro}} = \frac{V_{\text{cap}}^2}{X_c} \quad (13)$$

En dónde,

- Q_{filtro} , es la potencia reactiva, KVAR
- V_{cap} , es el voltaje de línea en el capacitor, V
- X_c , es la reactancia capacitiva, Ω

Por su parte, el valor de la reactancia capacitiva está dado por la expresión (14).

$$X_c = \frac{1}{2\pi fC} \quad (14)$$

En dónde,

- f , es la frecuencia de trabajo, Hz
- C , es la capacitancia del capacitor, F

De la ecuación (14) el valor de la capacitancia en faradios se calcula como lo muestra la expresión (15).

$$C = \frac{1}{2\pi fX_c} \quad (15)$$

En dónde,

- f, es la frecuencia de trabajo, Hz
- X_c , es la reactancia capacitiva, Ω

Para las condiciones de resonancia deberían ocurrir cuando la reactancia capacitiva sea igual a la reactancia inductiva (ver expresiones (16) y (17)).

$$X_c = X_L \quad (16)$$

$$\frac{1}{2\pi fC} = 2\pi fL \quad (17)$$

En dónde,

- X_c , es la reactancia capacitiva del capacitor, Ω
- X_L , es la reactancia inductiva del inductor, Ω
- f, es la frecuencia de trabajo, Hz
- C, es la capacitancia en el capacitor, F
- L, es la inductancia en el inductor, H

De forma que, el valor de la inductancia puede ser obtenido a través de la expresión (18).

$$L = \frac{1}{(2\pi f_s)^2 C} \quad (18)$$

En dónde,

- L, es la inductancia en el inductor, H
- f_s , es la frecuencia de sintonización del filtro, Hz
- C, es la capacitancia en el capacitor, F

Finalmente, la resistencia del filtro dependerá del factor de calidad (Q) que nos indica la pureza de sintonización, definido por la expresión (19) [26].

$$R = \frac{\sqrt{\frac{L}{C}}}{Q} \quad (19)$$

En dónde,

- R, es el valor de la resistencia, Ω
- C, es la capacitancia en el capacitor, F
- L, es la inductancia en el inductor, H
- Q, índice de pureza de sintonización

El valor de resistencia del filtro puede ser obtenido por la selección del factor de calidad

de un rango entre $20 < Q < 100$ [26].

En el diseño de un **filtro de segundo orden pasa altas** es similar al de un filtro de sintonía simple de segundo orden, en el que un inductor y un resistor son conectados en paralelo, tal como lo muestra la Fig. 2. 3. Este tipo de filtro proporciona un buen rendimiento de filtrado, y disminuye las pérdidas de energía en la frecuencia fundamental [26]. La impedancia de este filtro está dada por la expresión (20). Mientras que la frecuencia de corte se puede determinar mediante la expresión (18).

$$Z = \frac{1}{j2\pi fC} + \frac{1}{\left(\frac{1}{R} + \frac{1}{j2\pi fL}\right)} \quad (20)$$

En dónde,

- Z, impedancia del filtro, Ω
- j, es el operador del fasor
- f, es la frecuencia de trabajo, Hz
- R, es el calor de la resistencia, Ω
- C, es la capacitancia en el capacitor, F
- L, es la inductancia en el inductor, H

El factor de calidad típico para este filtro esta entre 0,5 y 5 [21], y se calcula mediante la expresión (21).

$$Q = \frac{R}{X_C} \quad (21)$$

En dónde,

- Q, índice de pureza de sintonización
- R, es el calor de la resistencia, Ω
- X_C , es la reactancia capacitiva del capacitor, Ω

Para los criterios de selección del tipo de filtro; las frecuencias armónicas inferiores sufren de una alta distorsión armónica, en comparación con las armónicas de alta frecuencia. Por esta razón, se recomienda utilizar un filtro de sintonía simple hasta la décima tercera armónica. Para armónicas de orden superior, se puede utilizar un filtro pasa altas de segundo orden [21].

La Fig. 2. 4 muestra el esquema del filtrado pasivo de armónicos en paralelo con una cocina de inducción en una red de 220V-60Hz.

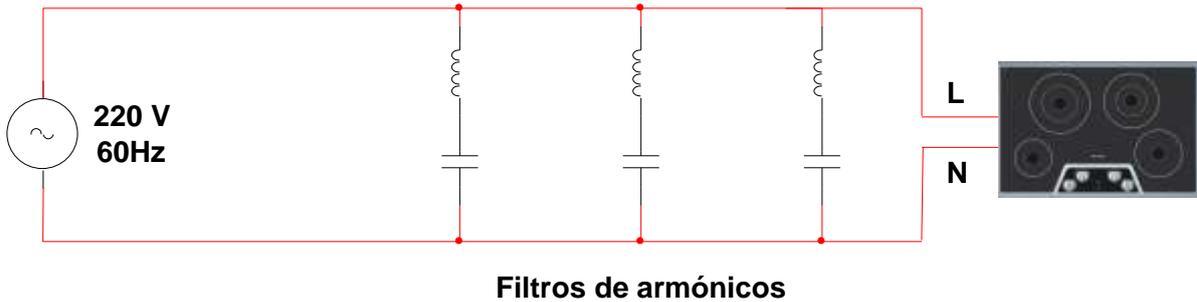


Fig. 2. 4. Esquema general para filtrado pasivo de armónicos en una red monofásica tres hilos a una CI.

Elaboración: Autores.

2.3.2. Filtrado activo de armónicos

Los filtros activos contienen dispositivos tipo IGBT y circuitos electrónicos para su control. Los filtros activos minimizan los problemas de los filtros pasivos, ya que utilizan sistemas de compensación (o filtros activos de potencia FAP) para adaptarse a los cambios en la red eléctrica, el uso de componentes electrónicos hace que su implementación sea costosa y su diseño más complicado pero se ve reflejado en el desempeño en comparación con el filtrado pasivo.

Un FAP está conformado por convertidores estáticos de potencia conectados a un elemento de almacenamiento de energía en continua, y, por una etapa de control [13].

Los FAP se conectan en serie o paralelo con la carga no lineal (ver Fig. 2. 5). La configuración del convertidor del filtro activo depende del sistema en el cual está siendo empleado, y, se diferencian esquemas monofásico de una rama o medio puente, monofásico de dos ramas o de puente completo, trifásico de tres ramas, y, trifásico de cuatro ramas con conexión a neutro.

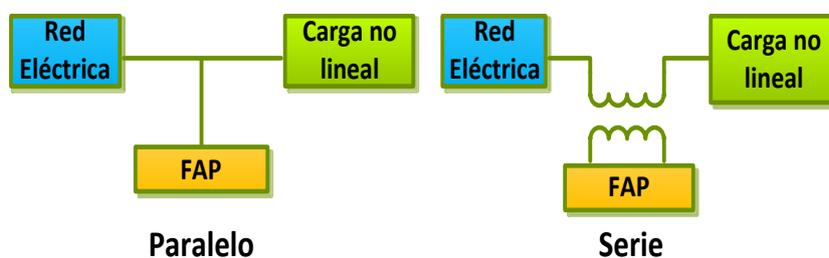


Fig. 2. 5. Conexión de un sistema de compensación tipo FAP con la red eléctrica, y con la carga no lineal.

Elaboración: autores.

Mediante los algoritmos de control apropiados, los FAP actúan como fuentes de corriente

o tensión, cancelan de forma instantánea los armónicos de ambos tipos, y, se autoadaptan a la variación de los mismos [23]. También pueden ser utilizados para la compensación total o parcial de energía reactiva, el equilibrado de corrientes de fase, y, la cancelación de la corriente de neutro [25].

El **filtrado activo paralelo** se utiliza para eliminar corriente armónica, compensar potencia reactiva; y, equilibrar corrientes desbalanceadas, inyectando corrientes de compensación [17].

El **filtrado activo serie** se utiliza para eliminar voltaje armónico, y, balancear y regular el voltaje en terminales de la línea [17].

Adicionalmente, se utilizan combinaciones de filtros activos serie y paralelo, conocidos como filtros híbridos [17].

CAPÍTULO III
ESTADO DEL ARTE EN LA COMPENSACIÓN DE ENERGÍA REACTIVA EN COCINAS
DE INDUCCIÓN

3.1. Introducción

La presencia de corrientes armónicas, provocadas por cargas no lineales, puede influir en un bajo factor de potencia ($\cos\varphi$) [27], lo que trae consigo un aumento de la corriente aparente, y, por lo tanto, un aumento en las pérdidas eléctricas en el sistema. Al bajar la eficiencia eléctrica, se afectan los costos de operación del sistema eléctrico, y, se sobrecargan generadores, transformadores y líneas de distribución [28].

En ondas senoidales puras, el voltaje y la corriente definen el ángulo φ como la diferencia de fases de las dos señales ($\varphi = \varphi_v - \varphi_i$). Por otra parte, φ se muestra como el ángulo entre la potencia activa (P) y el valor absoluto de la aparente (S), razón por la cual el factor de potencia es un indicador del aprovechamiento de la energía eléctrica, que puede tomar valores entre 0 y 1 [29]. El valor ideal de 1 está relacionado con que toda la energía tomada del suministro eléctrico, es transformada en trabajo útil. Las empresas proveedoras de electricidad fijan el valor mínimo del factor de potencia, y multan a sus usuarios por presentar valores inferiores al límite establecido.

Es este trabajo se describe los métodos de compensación de energía reactiva y mejoramiento del $\cos\varphi$, partiendo de la respuesta de los elementos básicos en corriente alterna (CA), y, concluyendo en la explicación de una de las soluciones más comunes para la optimización del $\cos\varphi$ en cocinas de inducción (CI).

3.2. Respuesta en corriente alterna de los elementos básicos de un circuito eléctrico: resistor, inductor y capacitor

3.2.1. Respuesta en corriente alterna de un resistor.

En un resistor, la frecuencia de la señal senoidal de voltaje o corriente, no afecta el valor de la resistencia. En un resistor trabajando en CA se cumple la Ley de Ohm [27] (ver ecuación 1).

$$i = \frac{v}{R} \quad (22)$$

En dónde,

- i, es la corriente que atraviesa el resistor, A
- v, es el voltaje aplicado, V
- R, es la resistencia en el resistor, Ω

En un elemento puramente resistivo, el voltaje y la corriente se encuentran en fase, es decir, sus valores pico máximos y mínimos coinciden en cualquier instante de tiempo (ver Fig. 3. 1).

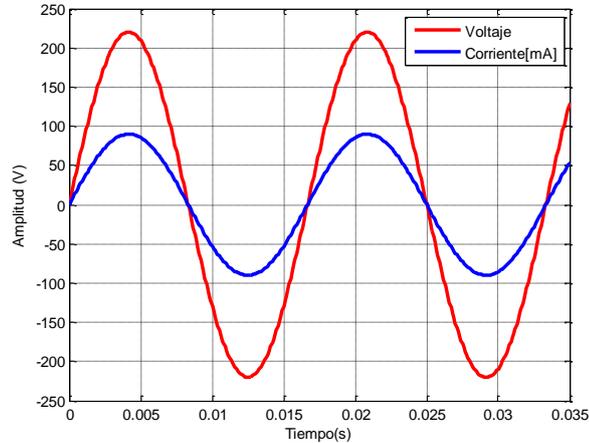


Fig. 3. 1. Señales de voltaje y corriente en un elemento puramente resistivo de un circuito de CA.
Elaboración: Autores.

3.2.2. Respuesta en corriente alterna de un inductor

Para una configuración en serie, entre una fuente de CA y un inductor (ver Fig. 3. 2), la caída de tensión en el elemento ($V_{elemento}$) se opone a la fuerza electromotriz de la fuente e . Por lo tanto, se reduce la magnitud de la corriente i . La oposición del elemento al flujo de carga (corriente i) determina la magnitud de caída de tensión a través del elemento.

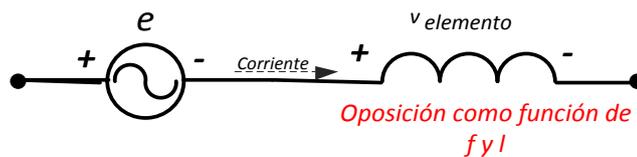


Fig. 3. 2. Parámetros que determinan la oposición de un elemento inductivo al flujo de carga.
Elaboración: Autores.

La caída de tensión en un inductor, es directamente proporcional a la velocidad de cambio de la corriente en la bobina (ver Fig. 3. 3). En consecuencia, entre más alta es la frecuencia, mayor será la velocidad de cambio de la corriente, y, mayor será la magnitud de la caída de tensión (ver expresión 23).

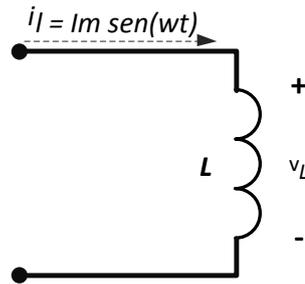


Fig. 3. 3. Figura 19. Respuesta senoidal de un elemento inductivo.
Elaboración: Autores.

$$v_L = L \frac{di_L}{dt} \quad (23)$$

En dónde,

- v_L , es la caída de tensión en el inductor, V
- L , es la inductancia del inductor, H
- $\frac{di}{dt}$, es la velocidad de cambio de la carga y descarga en el inductor.

La Fig. 3 .4 muestra la forma de las ondas de voltaje y corriente para un elemento puramente inductivo, en el que el v_L se adelanta a i_L por 90° , o lo que es lo mismo, i_L se atrasa de v_L por 90° (ver ecuación 24).

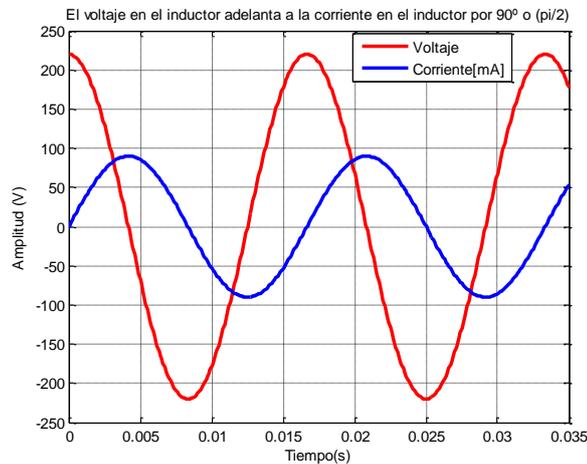


Fig. 3. 4. Señales de voltaje y corriente en un elemento puramente inductivo.

Elaboración: Autores.

$$v_L = V_p \text{sen}(\omega t + 90^\circ) \quad (24)$$

En dónde,

- V_p , es el voltaje pico en el inductor, V

ω , es la frecuencia angular, $\frac{\text{rad}}{\text{seg}}$
 t , es el periodo, s

La magnitud ωL , denominada como reactancia de un inductor, se representa simbólicamente como X_L , y se mide en Ohms. La reactancia inductiva es la oposición al flujo de corriente, la cual produce un intercambio continuo de energía entre la fuente y el campo magnético del inductor. En otras palabras la reactancia inductiva, a diferencia de la resistencia (la cual disipa energía en forma de calor), no disipa energía eléctrica (ignorando los efectos de la resistencia interna del inductor) [3].

A través de la Ley de Ohm, la reactancia inductiva se puede expresar como se muestra en la expresión (25).

$$X_L = \frac{V_p}{I_p} \quad (25)$$

En dónde,

X_L , es la reactancia del inductor, Ω
 V_p , es el voltaje pico en el inductor, V
 I_p , es la corriente pico en el inductor, A

3.2.3. Respuesta en corriente alterna de un capacitor

En una red capacitiva, el voltaje que atraviesa el capacitor está limitado por la velocidad a la que se deposita la carga (o se libera) en las placas del capacitor, durante las fases de carga y descarga respectivamente. En otras palabras, un cambio instantáneo en el voltaje a través del capacitor, se opone por el hecho de que hay un elemento de tiempo requerido para depositar una carga (o liberarla) en las placas del capacitor (ver Fig. 3. 5).

Puesto que, la capacitancia es una medida de la velocidad a la que un capacitor almacenará una carga en sus placas, para un cambio particular en el voltaje a través del capacitor, entre más alto sea el valor de la capacitancia, mayor será la corriente capacitiva resultante. Además, entre más alta sea la velocidad de cambio del voltaje a través del capacitor, mayor será la corriente capacitiva [3] (ver expresión 26).

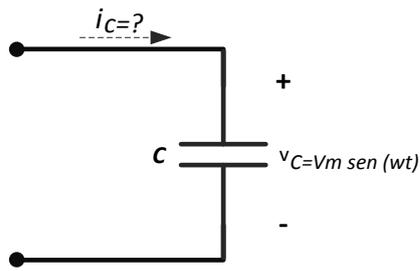


Fig. 3. 5. Respuesta senoidal de un elemento capacitivo.
Elaboración: Autores

$$i_C = C \frac{dv_C}{dt} \quad (26)$$

En dónde:

- i_C , es la corriente en el capacitor, A
- C , es la capacitancia del capacitor, F
- $\frac{dv}{dt}$, es la velocidad de cambio en la carga y descarga del capacitor.

La Fig. 3. 6 muestra la forma de las ondas de voltaje y corriente para un elemento puramente capacitivo, en dónde la i_C se adelanta a v_C por 90° , o v_C se atrasa de i_C por 90° , (ver expresión 27).

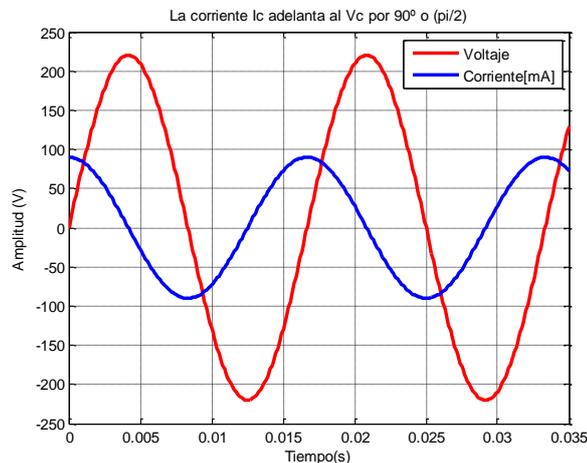


Fig. 3. 6. Señales de voltaje y corriente en un elemento puramente capacitivo.
Elaboración: Autores

$$i_C = I_p \text{sen}(wt + 90^\circ) \quad (27)$$

En dónde,

- I_p , es la corriente pico en el capacitor, A

La magnitud $1/\omega C$, se denomina reactancia de un capacitor, se representa simbólicamente mediante X_C , y, se mide en Ohms,

A través de la Ley de Ohm, la reactancia capacitiva se puede expresar como se muestra en la expresión (28).

$$X_C = \frac{V_p}{I_p} \quad (28)$$

En dónde,

- X_C , es la reactancia del capacitor, Ω
- V_p , es el voltaje pico en el capacitor, V
- I_p , es la corriente pico en el capacitor, A

3.2.4. Respuesta en corriente alterna de una red mixta

Si la corriente se retrasa al voltaje aplicado, la red es predominante inductiva. Si la corriente se adelanta al voltaje aplicado, la red es predominante capacitiva. Si la corriente y el voltaje están en fase, la red es puramente resistiva.

3.2.5. Triángulo de potencias

Para cualquier sistema, como el que se muestra en la Figura 23, la potencia proporcionada a una carga, en cualquier instante, se define como el producto del voltaje aplicado y la corriente resultante (ver expresión 29).

$$p = vi \quad (29)$$

En dónde:

- p , es la potencia disipada en el elemento, W
- v , es el voltaje en el elemento, V
- i , es la corriente en el elemento, A

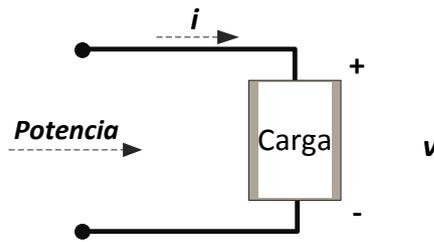


Fig. 3. 7. Representación de la potencia entregada a una carga.
Elaboración: Autores

En el caso de sistemas eléctricos de corriente alterna, se habla de 3 formas de potencia: activa, reactiva, y, aparente o total.

La potencia activa (P) en el circuito, se transforma en otras formas de energía como lumínica, térmica, mecánica, etc. La potencia activa entrega al circuito, es la energía que se transforma en trabajo útil.

La potencia reactiva (Q) se disipa en las cargas no lineales inductivas o capacitivas. Esta potencia fluctúa por la red, entre el generador y la carga, pero no se transforma en trabajo útil, aunque es necesaria para el funcionamiento de los sistemas.

En el sentido vectorial, en un sistema de coordenadas, la potencia activa se puede representar sobre el eje x, mientras que la reactiva se imputa al eje y; como resultado, se forma un triángulo rectángulo. La magnitud de la hipotenusa del triángulo resultante se denomina potencia aparente (S) (ver expresión 30).

$$S = P + Q \quad (30)$$

En dónde,

- S, es la potencia aparente, VA
- P, es la potencia activa, W
- Q, es la potencia reactiva, VAR

Para una carga inductiva, el fasor de potencia S se define mediante la ecuación (31), y, se presenta tal como lo muestra la Fig. 3. 8.

$$S = P + jQ_L \quad (10)$$

En dónde,

- P, es la potencia activa en el inductor, W
- Q_L , es la potencia reactiva en el inductor, VAR

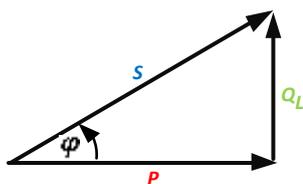


Fig. 3. 8. Diagrama de potencias para las cargas inductivas.
Elaboración: Autores

Para una carga capacitiva, el fasor de potencia S se define mediante la expresión (32), y se presenta tal como lo muestra la Fig. 3. 9.

$$S = P - jQ_C \quad (32)$$

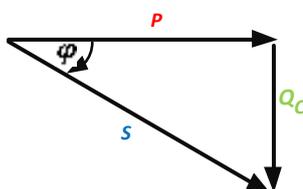


Fig. 3. 9. Diagrama de potencias para las cargas capacitivas.
Elaboración: Autores

Si una red tiene elementos tanto inductivos como capacitivos, el componente reactivo del triángulo de potencia se determinará mediante la diferencia entre la potencia reactiva proporcional a cada uno.

3.2.6. Potencia en una carga resistiva

Para una red de CA, el voltaje y la corriente se expresan como lo muestran las expresión (33) y (34), respectivamente. Consecuentemente, la potencia instantánea se define a través de la expresión (35).

$$v = V_p \text{sen}(\omega t + \theta) \quad (33)$$

$$i = I_p \text{sen}(\omega t + \theta) \quad (34)$$

$$p = V_p I_p \text{sen}(\omega t) \text{sen}(\omega t + \varphi) \quad (35)$$

Aplicando algunas identidades trigonométrica [3], la potencia instantánea puede expresarse como lo muestra la ecuación (36).

$$p = V_p I_p \cos\varphi (1 - \cos 2\omega t) + V_p I_p \text{sen}\varphi (\text{sen} 2\omega t) \quad (36)$$

Para un circuito puramente resistivo, v e i están en fase, y φ es igual a 0. Entonces, la potencia puede expresarse como lo muestra las ecuaciones (37) y (38).

$$P_R = V_p I_p (1 - \cos 2\omega t) + 0 \quad (37)$$

$$P_R = V_p I_p - V_p I_p \cos 2\omega t \quad (38)$$

En dónde, $V_p I_p$ es el promedio o el término de CD, mientras que $V_p I_p \cos 2\omega t$ corresponde a una onda coseno negativa, con el doble de frecuencia que la señal de entrada, y, un valor pico de $V_p I_p$ [29]. La Fig. 3. 10 muestra la gráfica de la señal de potencia, en la que se aprecia que los valores pico y promedio de la curva están siempre sobre el eje horizontal. Esto indica que la potencia total proporcionada a un resistor se disipará en forma de calor.

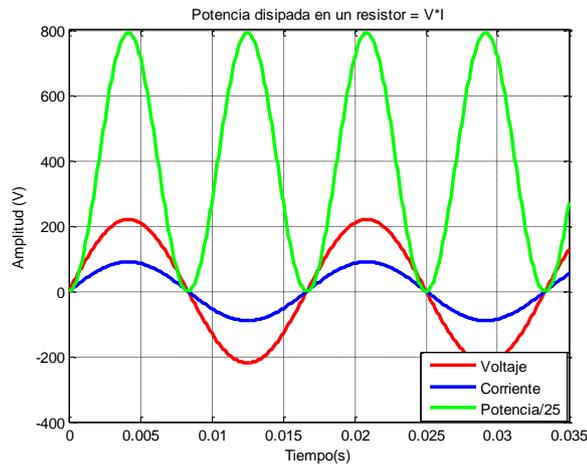


Fig. 3. 10. Señal de potencia en una carga puramente resistiva de un circuito de CA.
Elaboración: Autores.

3.2.7. Potencia en una carga inductiva

En un circuito puramente inductivo, el voltaje adelanta a la corriente (ver Fig.3.11), con un ángulo φ de 90° . Entonces, la potencia puede expresarse como lo muestra la ecuación (39).

$$P_L = 0 + V_p I_p \sin 2\omega t \quad (39)$$

La potencia en el inductor corresponde a una onda senoidal, cuya frecuencia es el doble de la señal de entrada, y, con un valor pico de $V_p I_p$ [2]. La Fig. 3. 11 muestra la forma de esta señal. Durante un ciclo completo, la potencia entregada por la fuente al inductor (ciclo positivo) es igual a la devuelta a la fuente por el inductor (ciclo negativo). El generador es obligado a “prestar” cierta cantidad de energía al circuito inductivo,

consciente de que esta no será aprovechada, produciendo más energía para suplir la demanda.

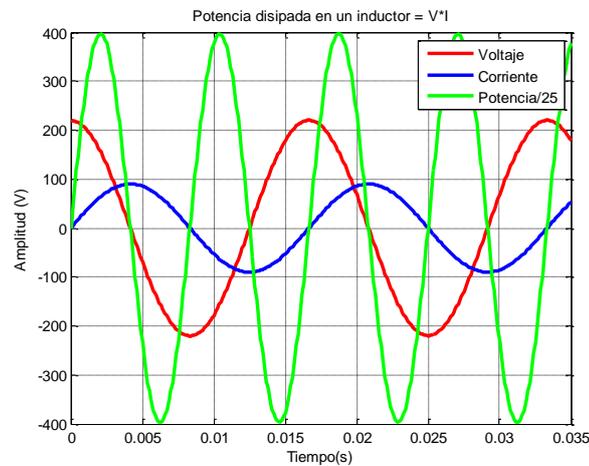


Fig. 3. 11. Señal de potencia en una carga puramente inductiva de un circuito de CA.
Elaboración: Autores.

Desde la perspectiva del triángulo de potencias, la potencia en el inductor es reactiva (ver ecuaciones 40 y 41).

$$Q = V_p I_p \text{sen}\varphi \quad (40)$$

En dónde,

- Q , es la potencia reactiva, VAR
- V_p , es el voltaje pico, V
- I_p , es la corriente pico, A
- φ , es el ángulo de fase entre el voltaje y la intensidad.

$$Q_L = I_p^2 X_L \quad (41)$$

En dónde,

- Q_L , es la potencia reactiva, VAR
- I_p^2 , es la corriente pico, A

3.2.8. Potencia en una carga capacitiva

En un circuito puramente capacitivo, la corriente se adelanta al voltaje en 90° (ver Fig.3.12), por lo que la potencia puede ser expresada como lo muestra la ecuación (42).

$$P_C = 0 - V_p I_p \text{sen}2\omega t \quad (42)$$

En la Fig. 3. 12 se muestra que la potencia entregada por la fuente al capacitor, es exactamente igual a la que el capacitor devuelve a la fuente durante un ciclo completo.

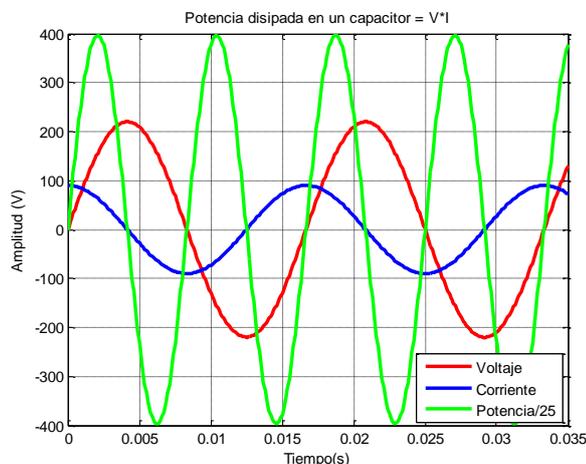


Fig. 3. 12. Señal de potencia en una carga puramente capacitiva de un circuito de CA.
Elaboración: Autores.

La potencia reactiva asociada con el capacitor se puede expresar a través de las ecuaciones (43) y (44).

$$Q = V_p I_p \quad (43)$$

En dónde,

- Q , es la potencia reactiva, VAR
- V_p , es el voltaje pico, V
- I_p , es la corriente pico, A

$$Q_C = I_p^2 X_C \quad (44)$$

En dónde,

- Q_C , es la potencia reactiva en el capacitor, VAR
- I_p^2 , es la corriente pico, A

3.3. Corrección del factor de potencia en cocinas de inducción

3.3.1. Generalidades de la corrección del factor de potencia

El diseño de cualquier sistema de transmisión de potencia es sensible a la magnitud de la corriente en las líneas. Las corrientes incrementadas producen mayores pérdidas de

potencia, por un factor al cuadrado (ver ecuación 45). Por otra parte, para una mayor corriente se requiere de cables de mayor diámetro, lo que impacta en el costo de implementación del sistema.

$$P = I_p^2 R \quad (45)$$

La corriente de suministro es mínima, cuando la potencia activa es igual a la potencia aparente, y, por lo tanto la potencia reactiva es igual a cero. En este caso, $\cos\phi$ se aproxima a la unidad, y, la red se comporta como una red resistiva.

El proceso de introducir en el circuito, elementos reactivos para acercar el factor de potencia a la unidad, se denomina corrección del factor de potencia. Debido a que, la mayoría de las cargas son inductivas, el proceso normalmente implica introducir elementos con características capacitivas.

Durante la compensación, se puede originar sobrecompensaciones o subcompensaciones.

La potencia reactiva de las cargas inductivas se compensa con la conexión, en paralelo, de capacitancias. Existen dos tipos de compensación: fija y dinámica. En la compensación fija, se suministra al sistema, de manera constante, la misma potencia reactiva. En la compensación dinámica se suministra la potencia reactiva requerida según la demanda.

Por otra parte, la compensación puede ser individual, en grupo, o centralizada.

En la compensación individual a cada consumidor inductivo se le asigna el condensador necesario. Esta compensación se utiliza en grandes consumidores de trabajo continuo (ver Fig. 3. 13) [28].

En la compensación en grupos, se agrupa a consumidores de igual potencia y régimen temporal de trabajo, compensando la energía reactiva por medio de un único condensador común. Este tipo de compensación se utiliza, por ejemplo, para compensar un grupo de lámparas fluorescentes (ver Fig. 3. 14) [28].

En la compensación central, la potencia reactiva de varios consumidores, de diferentes potencias y regímenes temporales de trabajo, se compensa por medio de un banco de condensadores (ver Fig. 3.14) [28].

La potencia requerida en el banco de condensadores, se puede encontrar mediante las ecuaciones (46), y (47).

$$Q_C = P * (\tan(\cos^{-1}\varphi_1) - \tan(\cos^{-1}\varphi_2)) \quad (46)$$

$$Q_C = P * K \quad (47)$$

En dónde,

- Q_C , es la potencia reactiva requerida en el banco, *VAR*
- P , es la potencia activa en el sistema, *W*
- φ_1 , es el valor de phi antes de la corrección
- φ_2 , es el valor de phi deseado
- K , es el factor *K* de compensación

El factor *K* de compensación se obtiene a partir del $\cos\varphi$ actual y deseado en el sistema, utilizando tablas como las que se muestra en la Tabla 3.1 [28].

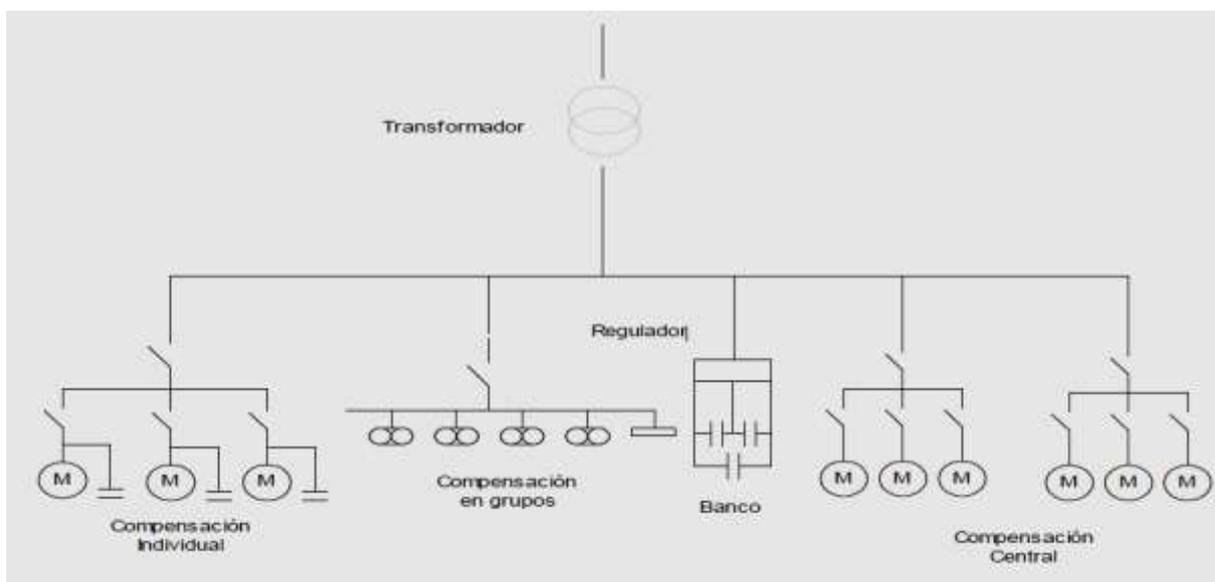


Fig. 3. 13. Compensación de energía reactiva de acuerdo al tipo de conexión.

Fuente: <http://www.si3ea.gov.co/Portals/0/Gie/Tecnologias/factor.pdf>

Tabla 3. 1. Valores del factor “K” más usuales.

FP antes de compensar		Factor de potencia después de compensar											
		$\cos\varphi$	0,8	0,84	0,88	0,9	0,92	0,95	0,96	0,97	0,98	0,99	1
		$\text{tg}\varphi$	0,75	0,646	0,54	0,484	0,43	0,329	0,292	0,251	0,203	0,142	0
$\cos\varphi$	$\text{tg}\varphi$												
0,400	2,291		1,541	1,645	1,752	1,807	1,865	1,963	2	2,041	2,088	2,149	2,291
0,430	2,100		1,35	1,454	1,56	1,615	1,674	1,771	1,808	1,849	1,897	1,957	2,1
0,460	1,930		1,18	1,284	1,391	1,446	1,504	1,602	1,639	1,68	1,727	1,788	1,93
0,490	1,779		1,029	1,133	1,239	1,295	1,353	1,45	1,487	1,528	1,576	1,637	1,779
0,520	1,643		0,893	0,997	1,103	1,158	1,217	1,314	1,351	1,392	1,44	1,5	1,643
0,550	1,518		0,768	0,873	0,979	1,034	1,092	1,19	1,227	1,268	1,315	1,376	1,518
0,580	1,405		0,655	0,759	0,865	0,92	0,979	1,076	1,113	1,154	1,201	1,262	1,405
0,610	1,299		0,549	0,653	0,759	0,815	0,873	0,97	1,007	1,048	1,096	1,157	1,299
0,640	1,201		0,451	0,555	0,661	0,716	0,775	0,872	0,909	0,95	0,998	1,058	1,201
0,670	1,108		0,358	0,462	0,568	0,624	0,682	0,779	0,816	0,857	0,905	0,966	1,108
0,700	1,020		0,27	0,374	0,48	0,536	0,594	0,692	0,729	0,77	0,817	0,878	1,02
0,730	0,936		0,186	0,29	0,396	0,452	0,51	0,608	0,645	0,686	0,733	0,794	0,936
0,760	0,855		0,105	0,209	0,315	0,371	0,429	0,526	0,563	0,605	0,652	0,713	0,855
0,790	0,776		0,026	0,13	0,236	0,292	0,35	0,447	0,484	0,525	0,573	0,634	0,776
0,800	0,750		-	0,104	0,21	0,266	0,324	0,421	0,458	0,499	0,547	0,608	0,75
0,810	0,724		-	0,078	0,184	0,24	0,298	0,395	0,432	0,473	0,521	0,581	0,724
0,820	0,698		-	0,052	0,158	0,214	0,272	0,369	0,406	0,447	0,495	0,556	0,698
0,830	0,672		-	0,026	0,132	0,188	0,246	0,343	0,38	0,421	0,469	0,53	0,672
0,840	0,646		-	-	0,106	0,162	0,22	0,317	0,354	0,395	0,443	0,503	0,646
0,850	0,620		-	-	0,08	0,135	0,194	0,291	0,328	0,369	0,417	0,477	0,62
0,860	0,593		-	-	0,054	0,109	0,167	0,265	0,302	0,343	0,39	0,451	0,593
0,870	0,567		-	-	0,027	0,082	0,141	0,238	0,275	0,316	0,364	0,424	0,567
0,880	0,540		-	-	-	0,055	0,114	0,211	0,248	0,289	0,337	0,397	0,54
0,890	0,512		-	-	-	0,028	0,086	0,184	0,221	0,262	0,309	0,37	0,512
0,900	0,484		-	-	-	-	0,058	0,156	0,193	0,234	0,281	0,342	0,484
0,910	0,456		-	-	-	-	0,03	0,127	0,164	0,205	0,253	0,313	0,456
0,920	0,426		-	-	-	-	-	0,097	0,134	0,175	0,223	0,284	0,426
0,930	0,395		-	-	-	-	-	0,067	0,104	0,145	0,192	0,253	0,395
0,940	0,363		-	-	-	-	-	0,034	0,071	0,112	0,16	0,22	0,363
0,950	0,329		-	-	-	-	-	-	0,037	0,078	0,126	0,186	0,329
0,960	0,292		-	-	-	-	-	-	-	0,041	0,089	0,149	0,292
0,970	0,251		-	-	-	-	-	-	-	-	0,048	0,108	0,251
0,980	0,203		-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,061	0,203
0,990	0,142		-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,142

Fuente: http://www.rtrenergia.es/downloads/reactiva_2012.pdf

3.3.2. Compensación de armónicos y circuito expreso de cocinas de inducción.

En un trabajo anterior se explicó que las CI utilizan principalmente 2 topologías de inversores resonantes (IR): el IR de medio puente, y, el inversor cuasi-resonante. Los IR forman parte de la etapa de potencia, y se encargan de generar oscilaciones de alta frecuencia. Los IR están conformados por una bobina inductiva, un capacitor resonante, y, una resistencia.

Si la carga del IR es resistiva pura, la tensión y la corriente serán señales cuadradas, y, el

factor de potencia de salida será igual a 1. Cuando a la carga se añade una componente inductiva (carga serie RL), se afecta el factor de potencia, y, para compensarlo se requiere la conexión de un componente reactivo adecuado [30], generalmente un condensador conectado en serie (circuito resonante serie RLC).

En resumen, las cocinas de inducción, para la compensación de energía reactiva, y, la eliminación de armónicos, se puede utilizar arreglos de bancos de condensadores, con inductores en serie de protección, y, filtros L-C de armónicos en conexión fija a la red (ver Fig. 3.14)

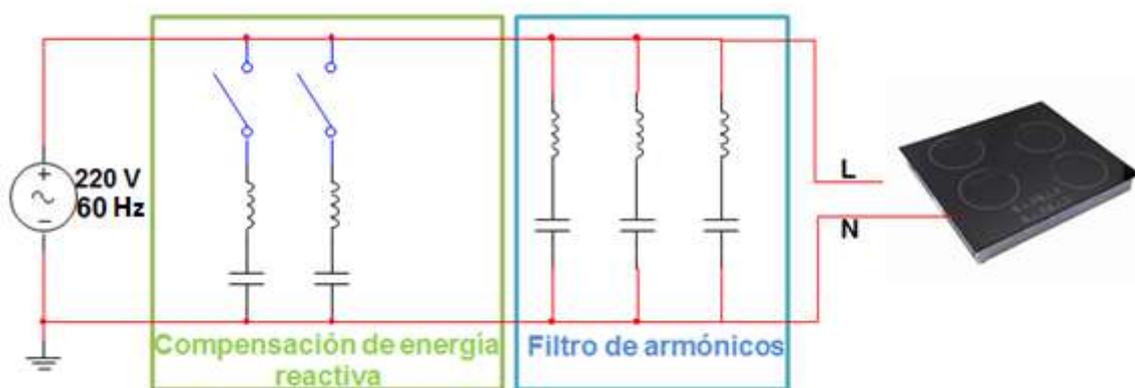


Fig. 3. 14. Esquema general de compensación pasiva de energía reactiva y de armónicos en una CI.
Elaboración: Autores.

CAPÍTULO IV
COMPENSACIÓN DE ARMÓNICOS Y ENERGÍA REACTIVA EN COCINAS DE
INDUCCIÓN Y ALIMENTADORES, UTILIZANDO FILTROS ACTIVOS Y PASIVOS

4.1. Introducción

En los capítulos anteriores se demostró que la presencia de corrientes armónicas, provocadas por cargas no lineales, puede influir en un bajo factor de potencia ($\cos\phi$), con el consiguiente aumento de la corriente aparente, y, un aumento en las pérdidas eléctricas del sistema. Para minimizar esta situación, se puede emplear diversos recursos, como el uso de filtros activos y pasivos.

En el marco de este proyecto, el interés principal gira entorno a la compensación de armónicos y de energía reactiva (factor de potencia) en cocinas de inducción (CI). Considerando la realidad técnica y económica del país, el equipo de trabajo decidió investigar el comportamiento de filtros pasivos conectados en la CI, y, el desempeño de filtros pasivos y activos conectados en uno de los alimentadores trifásicos que proveen de energía eléctrica a un grupo de CI.

El desempeño de los filtros en cada uno de los escenarios se analizó utilizando modelos matemáticos desarrollados en el aplicativo Simulink [31], perteneciente a la plataforma MATLAB [32].

En este documento se describen los resultados obtenidos.

4.2. Planeación de la evaluación de desempeño de los filtros en la compensación de armónicos y de energía reactiva en CI y alimentadores.

4.2.1. Consideraciones generales.

En el informe presentado por el Ministerio de Electricidad y Energía Renovable (MEER) del Ecuador, en relación a la sustitución de las cocinas de gas licuado de petróleo por CI [33], se señala que los principales armónicos generados por las CI, a nivel de transformador, son los impares, siendo los más representativos el 3^{ro}, 5^{to}, 7^{mo}, 9^{no}, y, 11^{ro}. También se explica que en ningún caso se supera el 10% de distorsión de voltaje, cumpliendo con las normas técnicas emitidas por el Consejo Nacional de Electricidad (CONELEC).

En [18], se indica que la distorsión armónica total (total harmonic distortion-THD) de corriente en una CI, es mayor que la THD de voltaje. En [34] se afirma que, los armónicos en la onda de corriente que más afectan, son el 3^{ro} y el 5^{to}, mientras que el resto de armónicos disminuyen de magnitud al aumentar su orden. La Tabla 4. 1 muestra la frecuencia del armónico, su orden, y la magnitud máxima que puede alcanzar con respecto a la fundamental [6].

Tabla 4. 1. Frecuencia del armónico, orden y magnitud.

Frecuencia	Orden del armónico	Magnitud
60	Fundamental	1.000
180	3	0.333
300	5	0.200
420	7	0.143
660	11	0.091
780	13	0.077

Fuente: <http://cdigital.uv.mx/bitstream/123456789/31227/1/felixjavierhernandeztolentino.pdf>

En este contexto, se requiere identificar un esquema de filtro pasivo y/o activo que permita reducir los armónicos de mayor magnitud en la onda de corriente, provocados por las CI. Para cumplir con el objetivo propuesto, se plantea desarrollar modelos matemáticos del funcionamiento de filtros pasivos y/o activos conectados a cargas no lineales, generadoras de armónicos 3^{ro}, 5^{to} y 7^{mo}, con una determinada potencia reactiva (fenómeno típico de una carga no lineal).

4.2.2. Identificación de escenarios de compensación.

Usualmente, el problema de armónicos se trata desde los síntomas y no desde el origen, por lo que se adopta una serie de medidas que aumentan la tolerancia del sistema a los armónicos; o, se modifica circuitos y sistemas para reducir el impacto, atrapar, o bloquear los armónicos con filtros [35].

La utilización de filtros pasivos para armónicos en sistemas de potencia, tienen dos objetivos: servir de sumidero para las corrientes y tensiones armónicas, y/o proveer al sistema de toda o parte de la potencia reactiva que se necesita. Sin embargo, la mala ubicación y un diseño no adecuado de filtros puede empeorar la situación [35].

En la bibliografía [35] se identifica dos escenarios para ubicar un filtro pasivo para armónicos (ver Fig. 4. 1): cerca de la carga no lineal en circuitos de baja tensión (para evitar la inyección de armónicos de corriente al sistema por parte de la carga), y, en el alimentador de media tensión (para disminuir las pérdidas del sistema).

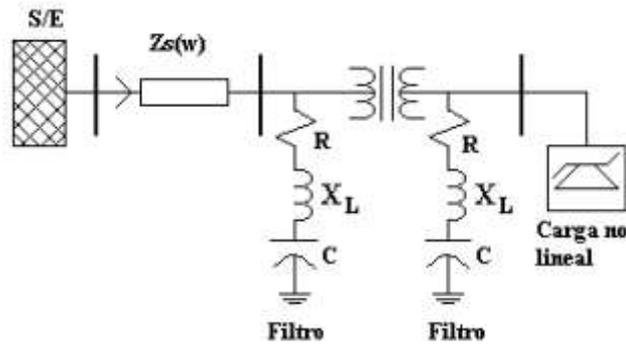


Fig. 4. 1. Escenarios de ubicación de filtros pasivos para armónicos.

Fuente: <http://cdigital.uv.mx/bitstream/123456789/31227/1/felixjavierhernandeztolentino.pdf>

Con un filtrado pasivo se puede compensar total o parcialmente la energía reactiva en el sistema, a través de las capacitancias del filtro. Sin embargo es necesario considerar los riesgos de sobrecompensación o subcompensación descritos en los capítulos anteriores. Por otra parte, la resonancia en paralelo con capacitores y reactores para compensación del factor de potencia, puede originar resonancias que producen corrientes o voltajes excesivos, que afectan al sistema [35].

En este contexto, el equipo de trabajo decidió explorar la compensación con filtros pasivos en 2 escenarios de ubicación: en paralelo cerca de la carga no lineal que representa una CI (para compensar armónicos de la onda de corriente), y, en paralelo a un alimentador de media tensión. Adicionalmente, considerando que de acuerdo a la bibliografía [36] los filtros activos son óptimos para aplicaciones con gran variación de carga o un amplio espectro de armónicos a compensar, para efectos comparativos se decidió indagar el desempeño de un filtro activo en un alimentador de media tensión.

4.3. Evaluación de desempeño de los filtros en la compensación de armónicos y de energía reactiva en CI y alimentadores

4.3.1. Evaluación del desempeño de un filtro pasivo conectado en paralelo cerca de una carga no lineal como la CI.

La Tabla 4. 2 resume las variables a considerar en la construcción del modelo matemático en este escenario. La generación de los armónicos 3^{ro} , 5^{to} y 7^{mo} , se hará a la mitad de su máxima magnitud.

Tabla 4. 2. Variables a considerar para la evaluación del desempeño de un filtro pasivo conectado en paralelo cerca de una carga no lineal como la CI.

V, voltaje de la red, Vrms	220
F, frecuencia de la red, Hz	60
P, potencia activa de la carga, W	7200
Q, demanda de potencia reactiva inductiva, VAR	1720
L_{LF}, inductancia de la línea fuente, H	0,0013

Elaboración: Autores

El voltaje y la frecuencia corresponden a los de una red típica en Ecuador para instalación de CI. La potencia activa se obtuvo del catálogo de una CI existente en el mercado local, identificada con el grupo de alta demanda de energía [15]. La potencia reactiva se calculó utilizando las expresiones (48), (49), (50). La inductancia de la línea fuente se calculó aplicando la expresión (51).

$$P_i = \frac{P_o}{\eta} \quad (48)$$

En dónde,

- P_i , es la potencia de línea, W
- P_o , es la potencia de la carga, W
- η , es la eficiencia de la carga, 85 %

$$\varphi = \cos^{-1}F_p \quad (49)$$

En dónde,

- φ , es el ángulo phi, °
- F_p , es el factor de potencia de la carga, 0,98

$$Q_L = P_i \tan \varphi \quad (50)$$

En dónde,

- Q_L , es la potencia reactiva inductiva, VAR
- P_i , es la potencia de línea, W
- φ , es el ángulo phi, °

$$L_{LF} = \frac{X_{LF}}{2\pi f} \quad (51)$$

En dónde,

L_{LF} , es la inductancia de la línea fuente, H

X_{LF} , es la impedancia de la línea, 0,50 Ω

f , es la frecuencia de la red, Hz

La Fig. 4. 2 muestra el modelo en Simulink para la evaluación del desempeño del filtro en este escenario. Se utilizará tres filtros de sintonía simple, resonando a la frecuencia de los armónicos a compensar. Para dimensionar los filtros de sintonía simple, se determina secuencialmente la capacitancia, la inductancia, y, finalmente la resistencia.

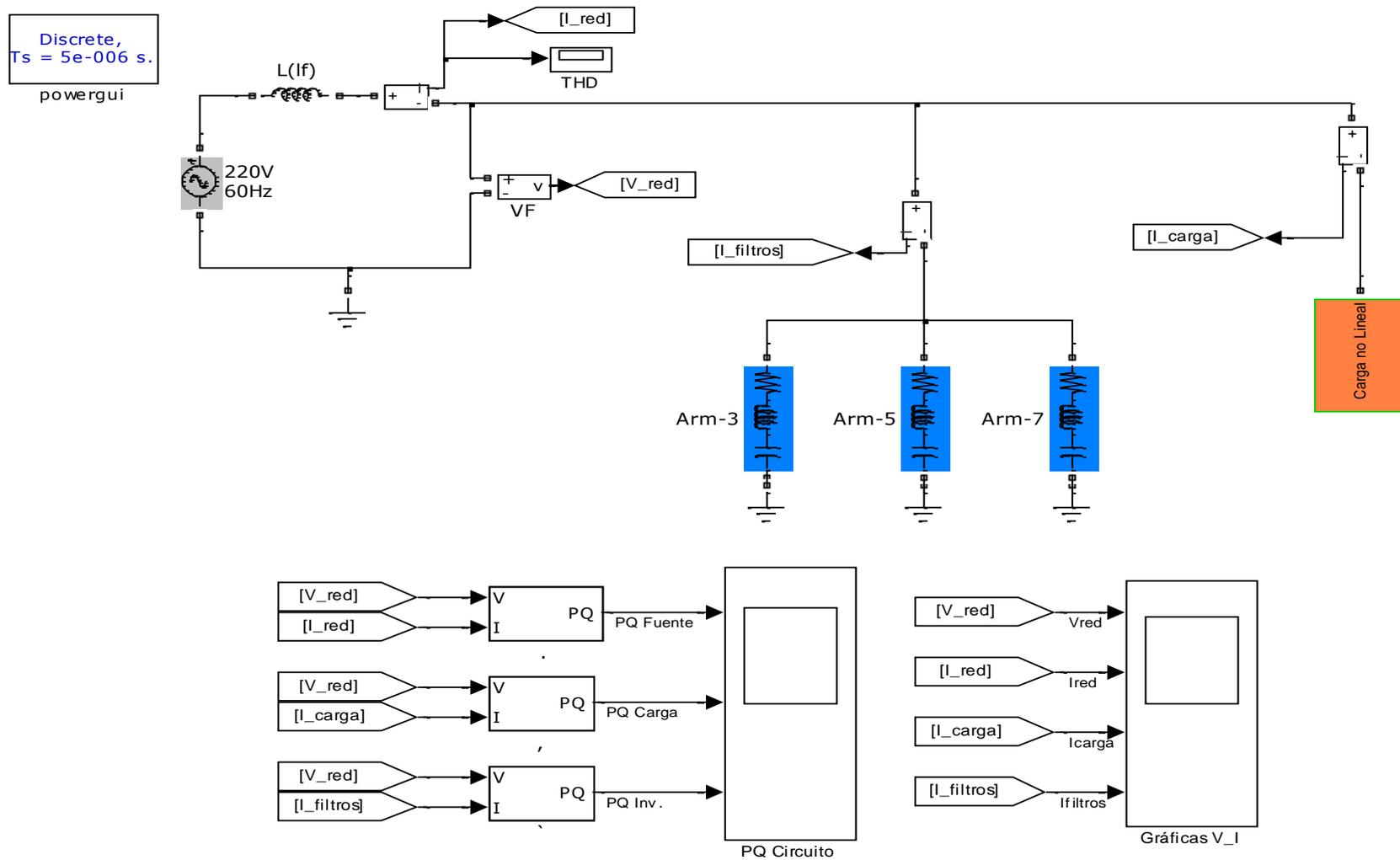


Fig. 4. 2. Modelo en Simulink para evaluación del desempeño de un filtro pasivo monofásico (220V, 60Hz) conectado en paralelo a una carga no lineal como una CI.
 Elaboración: Autores.

La capacitancia de los filtros se determina mediante la ecuación (52). La capacitancia calculada, se divide entre el número de filtros que se instalará en paralelo con la carga no lineal. La Tabla 4. 3 muestra los resultados obtenidos.

$$C = \frac{Q_{(kVAR)} * 1000}{2\pi f * V^2} \quad (52)$$

En dónde,

- C, es la capacitancia de compensación, F
- $Q_{(kVAR)}$, es la potencia reactiva demanda por la carga, kVAR
- f, es la frecuencia de la red, Hz
- V, es el voltaje de la red, V

Tabla 4. 3. Valores de diseño del filtro pasivo monofásico.

C, F	L, H	R, Ω
$C_{Arm3} = 31,43e - 6$	$L_{Arm3} = 24,87e - 3$	$R_{Arm3} = 0,28$
$C_{Arm5} = 31,43e - 6$	$L_{Arm5} = 8,95e - 3$	$R_{Arm5} = 0,17$
$C_{Arm7} = 31,43e - 6$	$L_{Arm7} = 4,57 - 3$	$R_{Arm7} = 0,12$

Elaboración: Autores.

La inductancia en cada filtro de sintonía simple, se encuentra a través de la ecuación (53) (ver Tabla 4. 3).

$$L_f = \frac{1}{(2\pi f_s)^2 C_f} \quad (53)$$

En dónde,

- L_f , es la inductancia requerida en cada filtro, H
- f_s , es la frecuencia de sintonía del filtro, Hz
- C_f , es la capacitancia de cada filtro, F

La resistencia en cada filtro de sintonía simple se define por la expresión (54) (ver Tabla 4. 3). Considerando que el factor de calidad del filtro (Q), determina la forma de la característica de impedancia, y hace que ésta sea más o menos estrecha o abrupta, se decidió utilizar un Q de 100 [35], que presenta una mejor pureza de sintonizado en los armónicos a eliminar.

$$R_f = \frac{\sqrt{L_f}}{Q C_f} \quad (54)$$

En dónde,

- R_f , es la resistencia requerida en cada filtro, Ω
- L_f , es la inductancia requerida en cada filtro, H
- C_f , es la capacitancia de cada filtro, F
- Q , es el índice para la pureza de sintonización, $20 \geq Q \leq 100$

Una vez construido el modelo, los resultados se obtuvieron empleando recursos de Simulink, como el análisis rápido de Fourier (FFT). Se determinó que la THD de corriente antes de instalar el filtro era del 19,49% (ver Fig. 4. 3), y, que se redujo al 3,05% una vez que el filtro estuvo operativo (ver Fig. 4. 4). Este valor corresponde a la norma IEEE (519) para el control de armónicos, que establece que el límite superior del THD de corriente es del 5% [26].

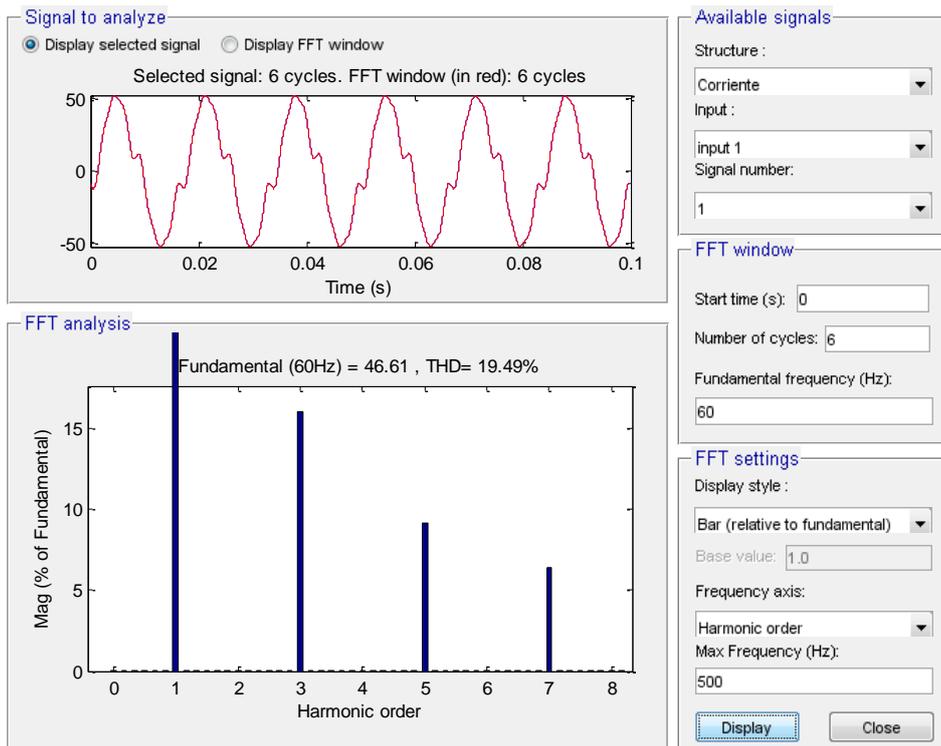


Fig. 4. 3. Pantalla de Simulink que muestra la THD de corriente sin el filtro pasivo monofásico conectado a la CI.

Elaboración: Autores.

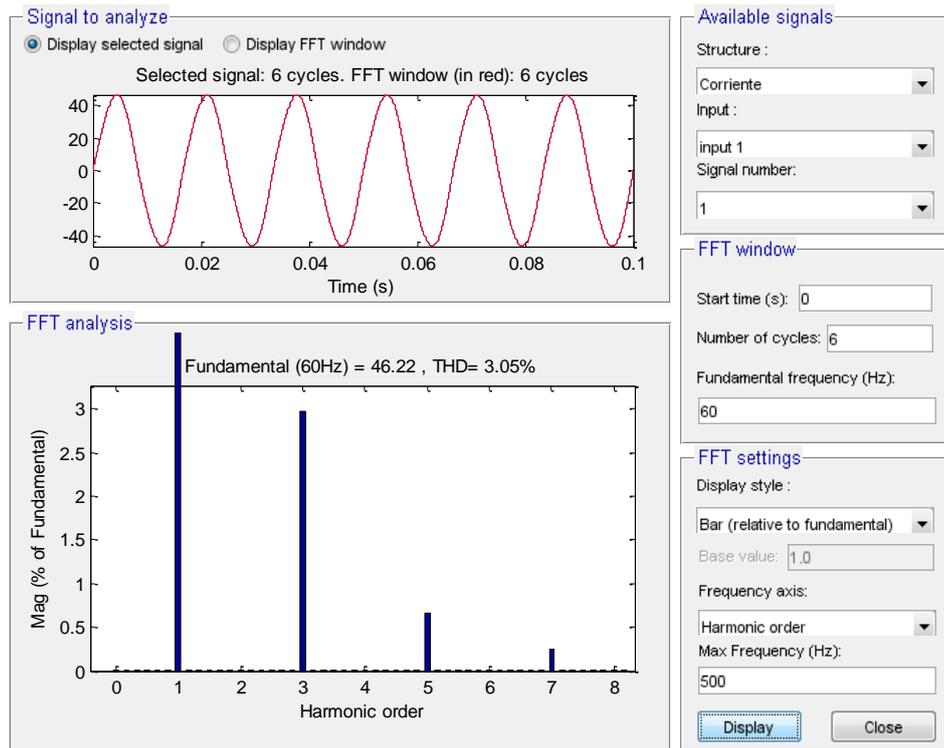


Fig. 4. 4. Pantalla de Simulink que muestra la THD de corriente con el filtro pasivo monofásico conectado a la CI.

Elaboración: Autores.

La Fig. 4. 5 muestra las formas de onda de la potencia activa (rojo) y reactiva (azul) en la red (fuente), en la carga (CI), y la compensación de potencia reactiva desde los filtros. Se concluye que los filtros operan correctamente, puesto que la potencia reactiva en la red es prácticamente nula.

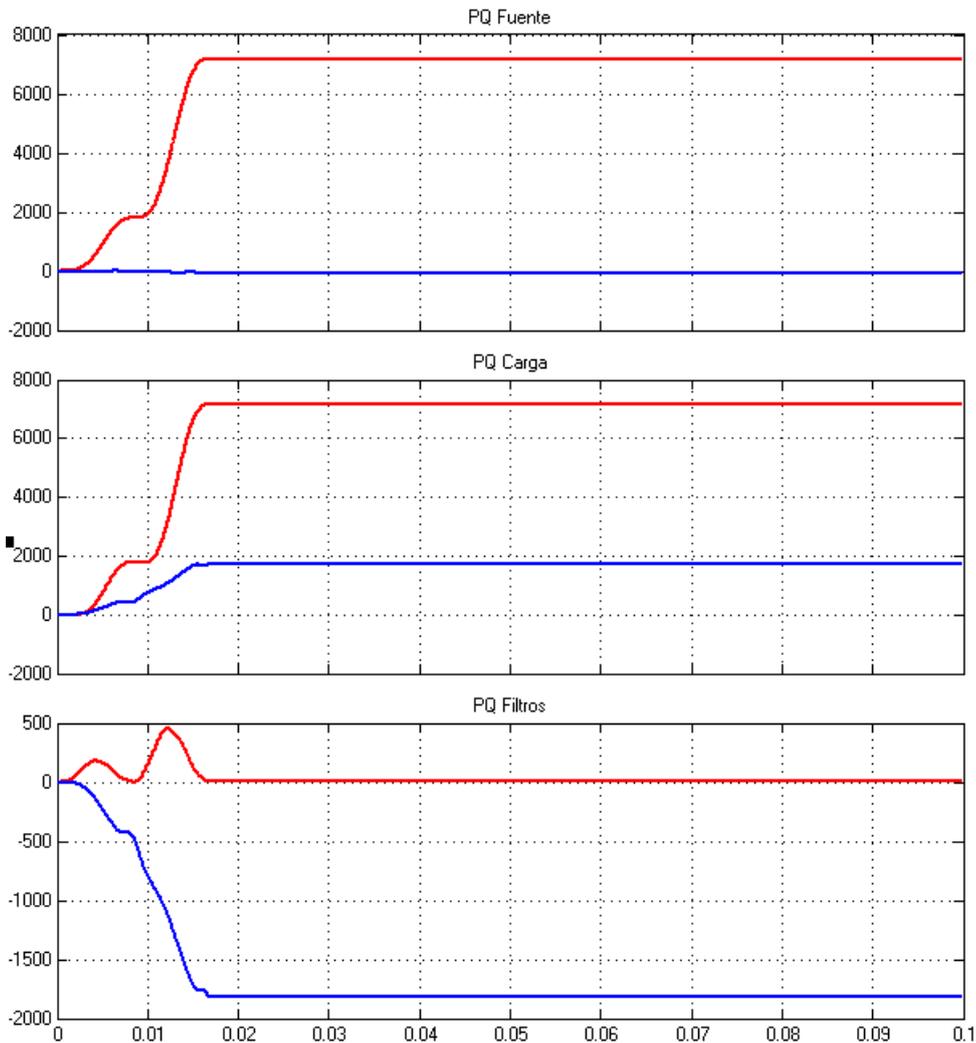


Fig. 4. 5. Formas de onda de la potencia activa y reactiva en la red (PQ Fuente), en la carga (PQ Carga); y, compensación de potencia reactiva en los filtros (PQ Comp).
Elaboración: Autores.

La Fig. 4. 6 muestra las formas de onda del voltaje y corriente en la red, la corriente en la carga, y, la corriente de compensación. Los resultados muestran que a pesar de que la corriente de la carga se distorsiona, el funcionamiento de los filtros devuelve a la red una corriente libre de armónicos.

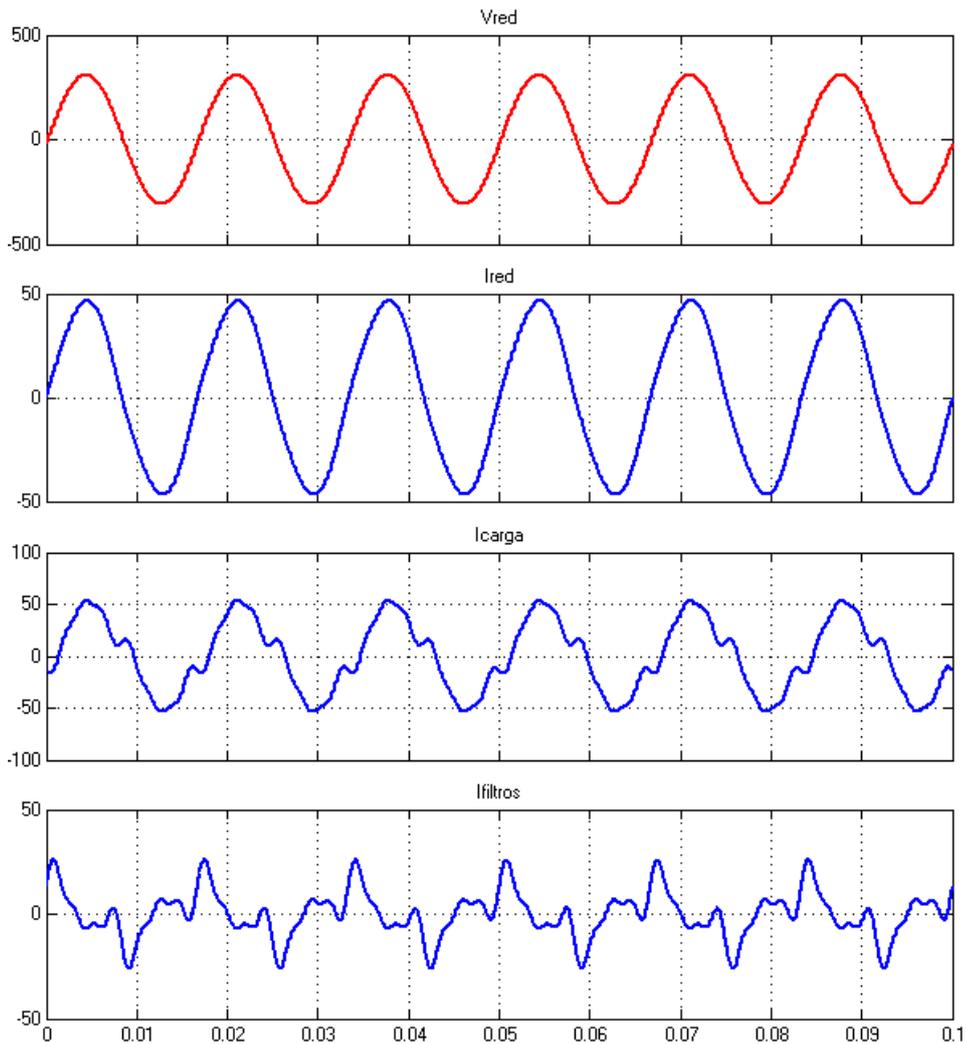


Fig. 4. 6. Formas de onda del voltaje y corriente en la red, corriente en la carga, y corriente de compensación del filtro.
Elaboración: Autores

4.3.2. Evaluación del desempeño de un filtro pasivo trifásico en paralelo con un alimentador de media tensión

Las variables a considerar en la construcción del modelo matemático en este escenario, se muestran en la Tabla 4. 4.

Tabla 4. 4. Variables a considerar para la evaluación del desempeño de un filtro pasivo trifásico conectado en paralelo con un alimentador de media tensión.

V, voltaje de la red, kVrms	13,8
F, frecuencia de la red, Hz	60
P, potencia activa de la carga, MVA	6,41
Q, demanda de potencia reactiva inductiva, MVAR	1,8
L_{LF}, inductancia de la línea fuente, H	0,0013

Elaboración: Autores.

El voltaje y la frecuencia corresponden al suministro de energía en la ciudad de Loja, desde la Subestación Eléctrica (S/E) Sur. La potencia activa corresponde a la proyección de demanda de energía por el uso masivo de CI y calefones eléctricos hasta el año 2016, justificada en la bibliografía [37]. La demanda de potencia reactiva inductiva se calculó aplicando la expresión (55).

$$Q_L = VI * \text{sen}\varphi \quad (55)$$

En dónde,

- Q_L , es la potencia reactiva inductiva, VAR
- V , es el voltaje en la red, Vrms
- I , es la corriente en la red, A
- φ , es el ángulo phi (16,26), °

La inductancia línea fuente se calculó aplicando la expresión (51), instalando un inductor por cada fase.

El diseño de filtros pasivos trifásicos es similar al diseño de filtros pasivos monofásicos, pero se diferencia en que en cada fase se instala un filtro. La Tabla 4. 5 muestra los valores calculados para los elementos de los filtros pasivos a utilizar en este escenario.

El uso de transformadores trifásicos con conexión adecuada ayuda a reducir armónicos. Un transformador con conexión delta - estrella atrapa las armónicas múltiplos de 3 (3^{ro}, 6^{to}, 9^{no}, etc) [18]. En este contexto y, considerando la naturaleza de la carga a conectar en la red, se plantea compensar los armónicos 5^{to}, 7^{mo}, 11^{ro}, 13^{ro}, y, 17^{mo}, generados a un cuarto de su máxima magnitud. Para compensar los cuatro primeros armónicos, se utilizará filtros de sintonía simple. Para compensar el armónico 17^{mo} se empleará un filtro pasa altas de segundo orden, cuyo capacitor e inductor se calculan de la misma forma que en los filtros de sintonía simple, mientras que el valor de la resistencia se calcula mediante las expresiones (56) y (57). El índice de pureza de sintonización se eligió en 5 considerando las recomendaciones de la bibliografía [38].

Tabla 4. 5. Valores de diseño del filtro pasivo trifásico.

C,F	L,H	R, Ω
$C_{Arm5} = 5,01e - 6$	$L_{Arm5} = 56,18e - 3$	$R_{Arm5} = 1,06$
$C_{Arm7} = 5,01e - 6$	$L_{Arm7} = 28,66e - 3$	$R_{Arm7} = 0,76$
$C_{Arm11} = 5,01e - 6$	$L_{Arm11} = 11,61e - 3$	$R_{Arm11} = 0,48$
$C_{Arm13} = 5,01e - 6$	$L_{Arm13} = 8,31e - 3$	$R_{Arm13} = 0,41$
$C_{Arm17} = 5,01e - 6$	$L_{Arm17} = 4,86e - 3$	$R_{Arm17} = 155$

Elaboración: Autores

$$X_C = \frac{1}{2\pi f_s C_f} \quad (56)$$

En dónde,

- X_C , es la reactancia capacitiva, Ω
- f_s , es la frecuencia de sintonía del filtro, Hz
- C_f , es la capacitancia de cada filtro, F

$$R = X_C * Q \quad (57)$$

En dónde,

- R, es la resistencia del filtros pasa altas de segundo orden, Ω
- X_C , es la reactancia capacitiva, Ω
- Q, es el índice para la pureza de sintonización, $2 \geq Q \leq 5$

En la Fig. 4. 7 se muestra el modelo en Simulink para la evaluación del filtro en este escenario.

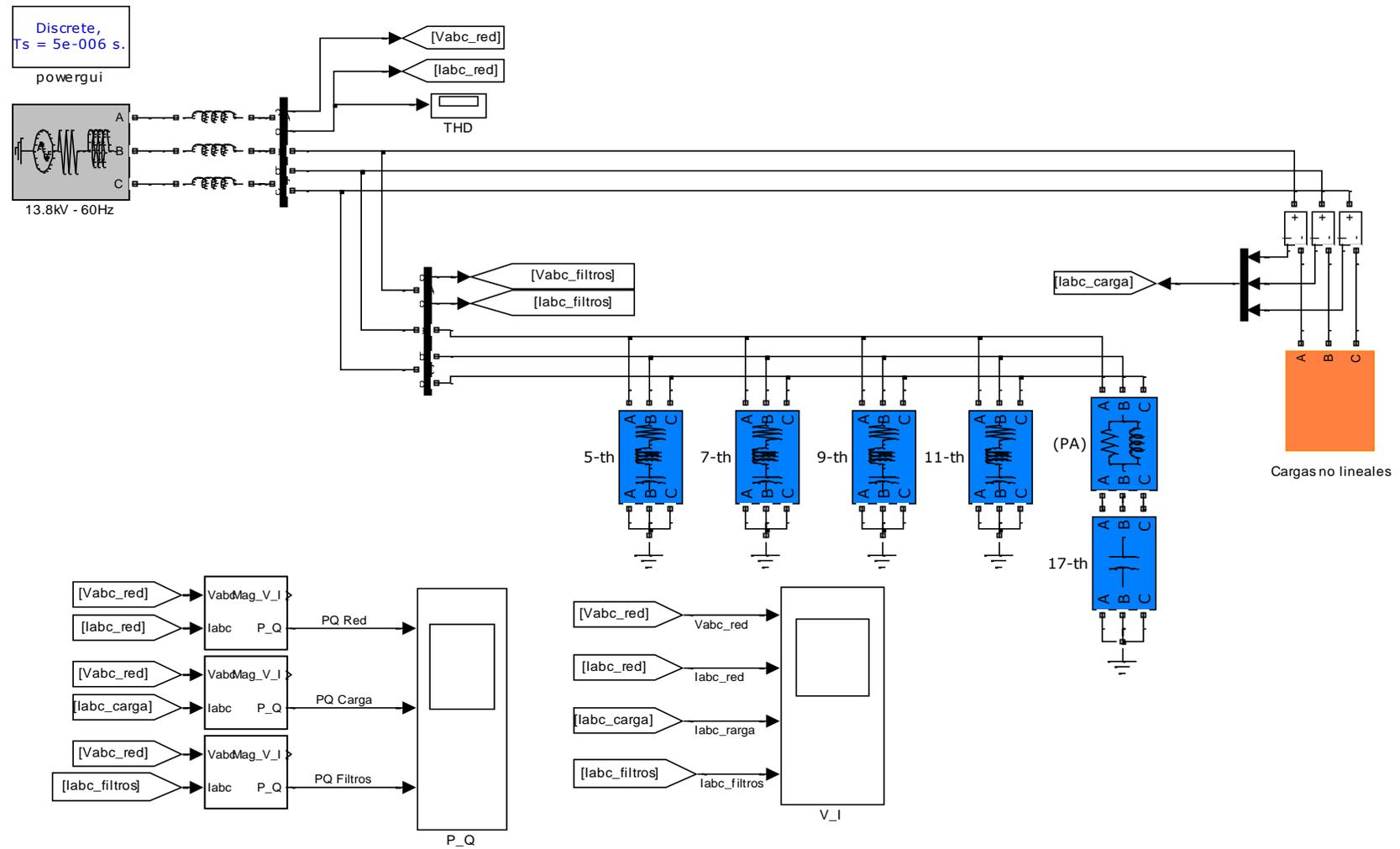


Fig. 4. 7. Modelo en Simulink para evaluación del desempeño de un filtro pasivo trifásico (13.8kV, 60Hz) conectado en paralelo a un alimentador de media tensión.

Elaboración: Autores.

Los resultados obtenidos en la simulación del funcionamiento del modelo, muestran que la THD de corriente antes de instalar el filtro era del 11,42% (ver Fig. 4. 8), y, que se redujo al 3,75% una vez que el filtro estuvo operativo (ver Fig. 4. 9). Este valor corresponde a la norma IEEE (519) para el control de armónicos, que establece que el límite superior del THD de corriente es del 5% [26].

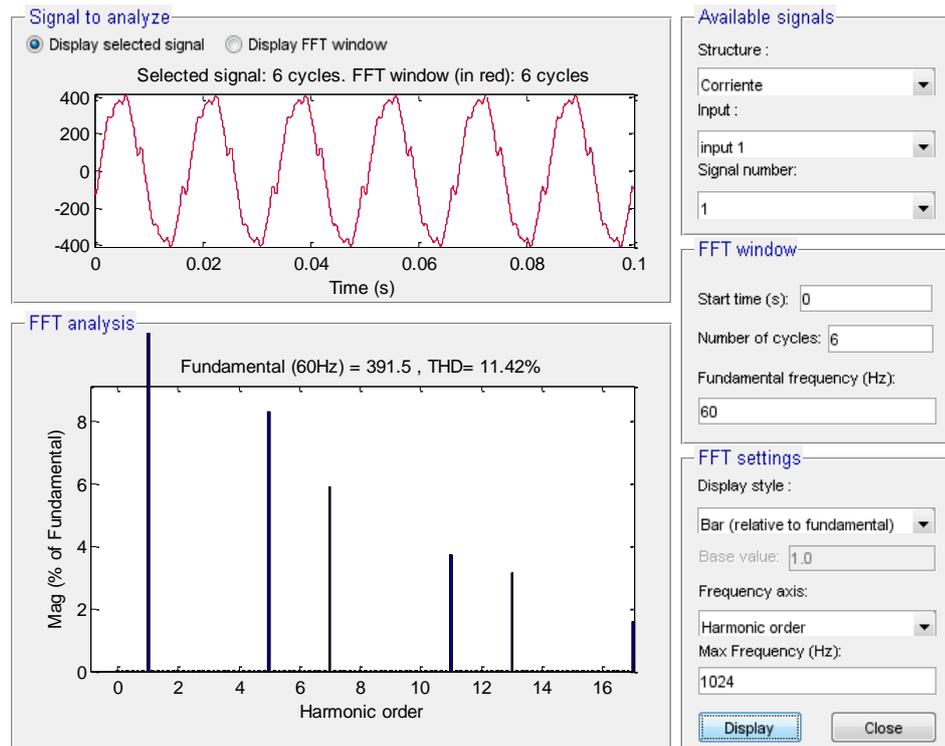


Fig. 4. 8. Pantalla de Simulink que muestra la THD de corriente sin el filtro pasivo trifásico conectado al alimentador.

Elaboración: Autores.

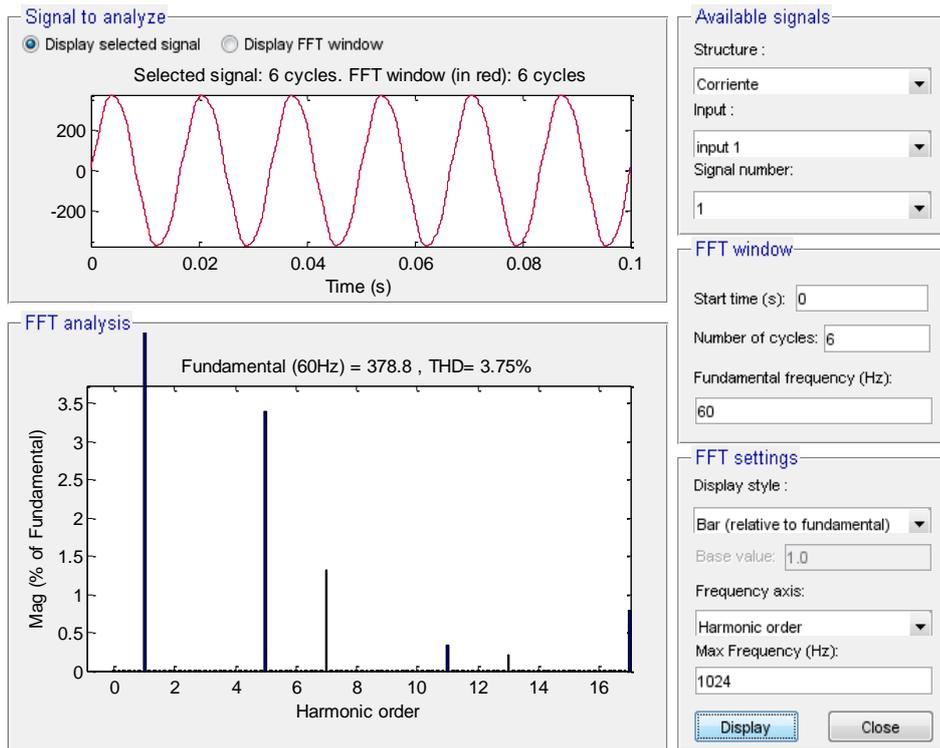


Fig. 4. 9. Pantalla de Simulink que muestra la THD de corriente con el filtro pasivo trifásico conectado al alimentador.

Elaboración: Autores

La Fig. 4. 10 muestra las formas de onda de la potencia activa (rojo) y reactiva (azul) en la red (fuente), en las cargas no lineales, y la compensación de potencia reactiva desde los filtros. Se concluye que los filtros operan correctamente, puesto que la potencia reactiva en la red es prácticamente nula.

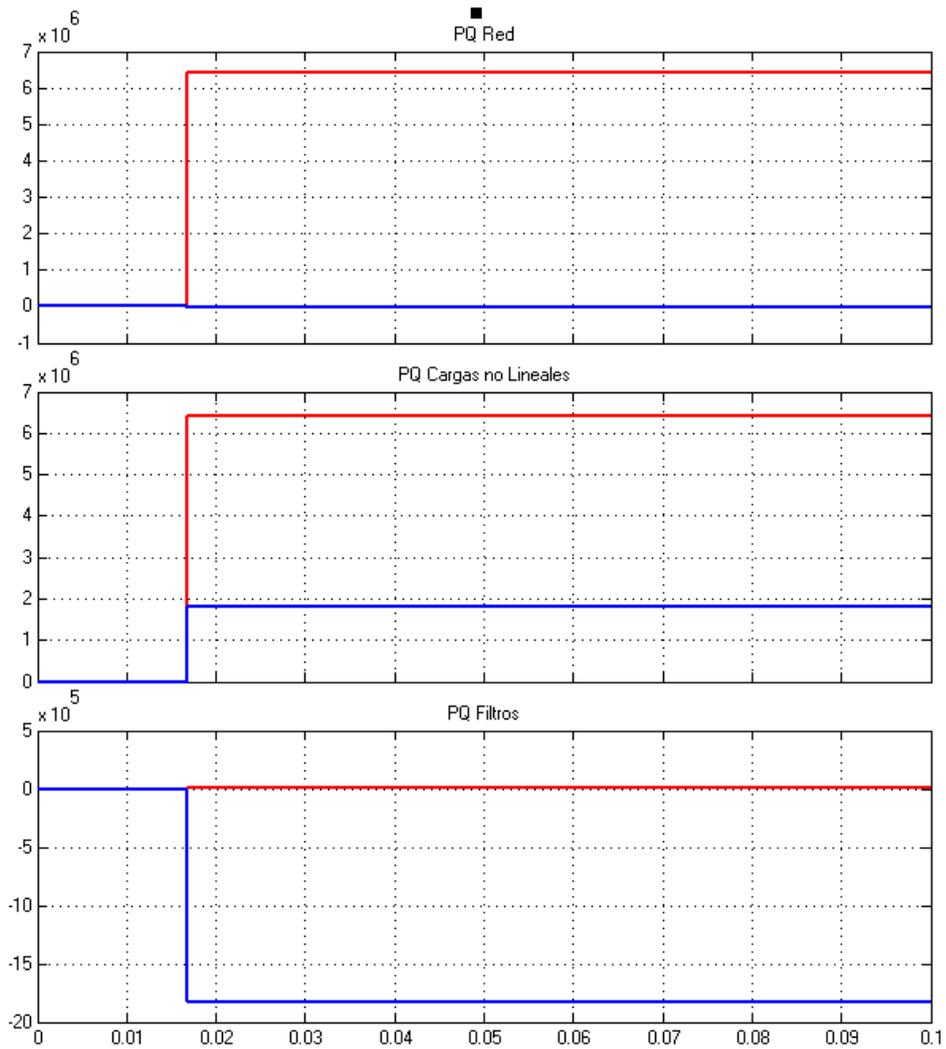


Fig. 4. 10. Formas de onda de la potencia activa y reactiva en la red (PQ Fuente), en las cargas no lineales (PQ Cargas no Lineales); y, compensación de potencia reactiva de los filtros (PQ Filtros).

Elaboración: Autores

La Fig. 4. 11 muestra las formas de onda del voltaje y corriente en la red, la corriente en la carga, y, la corriente de compensación; de las tres fases. Los resultados muestran que a pesar de que la corriente de la carga se distorsiona, el funcionamiento de los filtros devuelve a la red una corriente libre de armónicos que se asemeja a una senoidal pura.

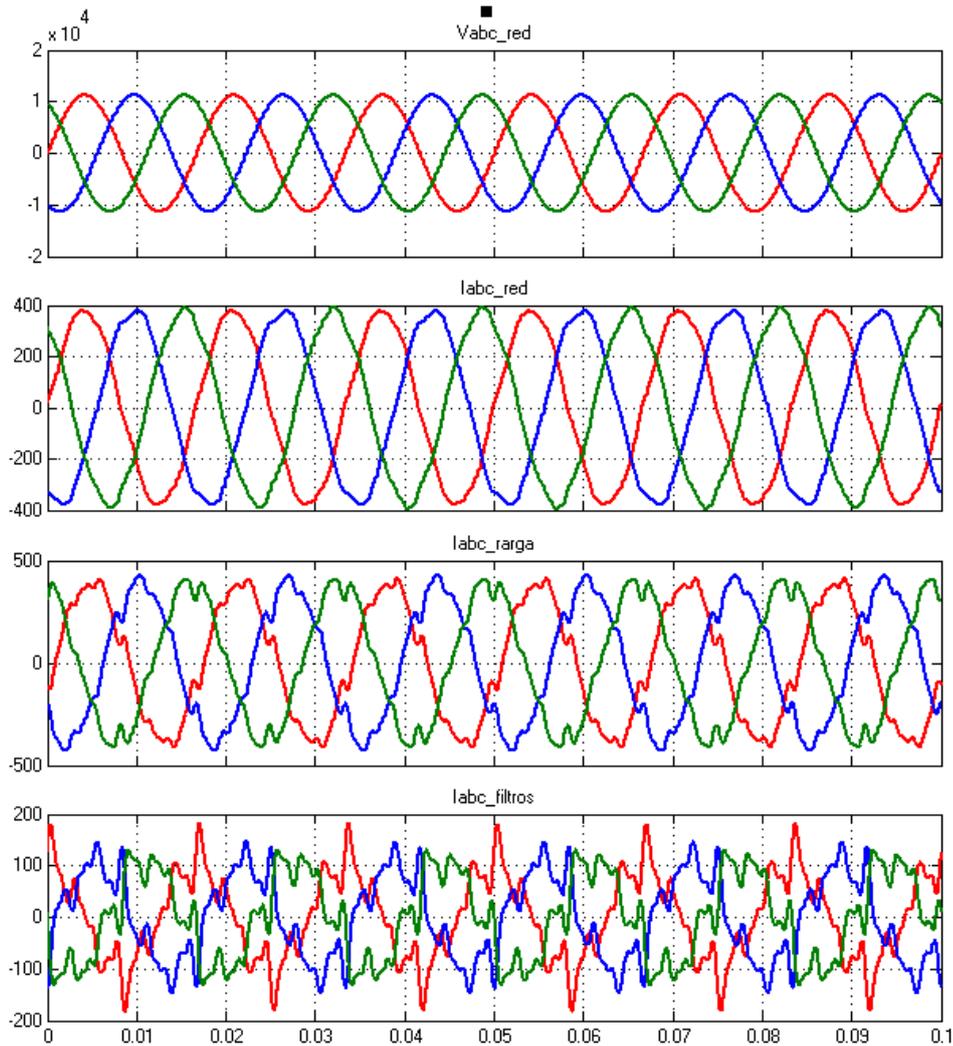


Fig. 4. 11. Formas de onda de voltajes y corrientes en la red, corrientes en la carga, y, corrientes de los filtros.
Elaboración: Autores.

4.3.3. Evaluación del desempeño de un filtro activo tipo shunt trifásico, conectado en paralelo a un alimentador de media tensión.

El principio de operación de un filtro activo conectado en paralelo, se basa en la inyección de la corriente armónica y de la corriente reactiva requerida por la carga. De esta forma, el sistema de potencia sólo aporta la componente fundamental de corriente, en fase con la respectiva tensión fase neutro [18].

Un filtro activo se forma principalmente de dos etapas: potencia y control. La etapa de potencia se encarga de suministrar las corrientes de compensación, mientras que la etapa de control dispara el IGBT que proporciona la energía de compensación a la red. El escenario de compensación coincide con el definido para estudiar el comportamiento de los filtros pasivos trifásicos. La Fig. 4. 12 muestra el modelo en Simulink, utilizado para la evaluación del filtro activo trifásico.

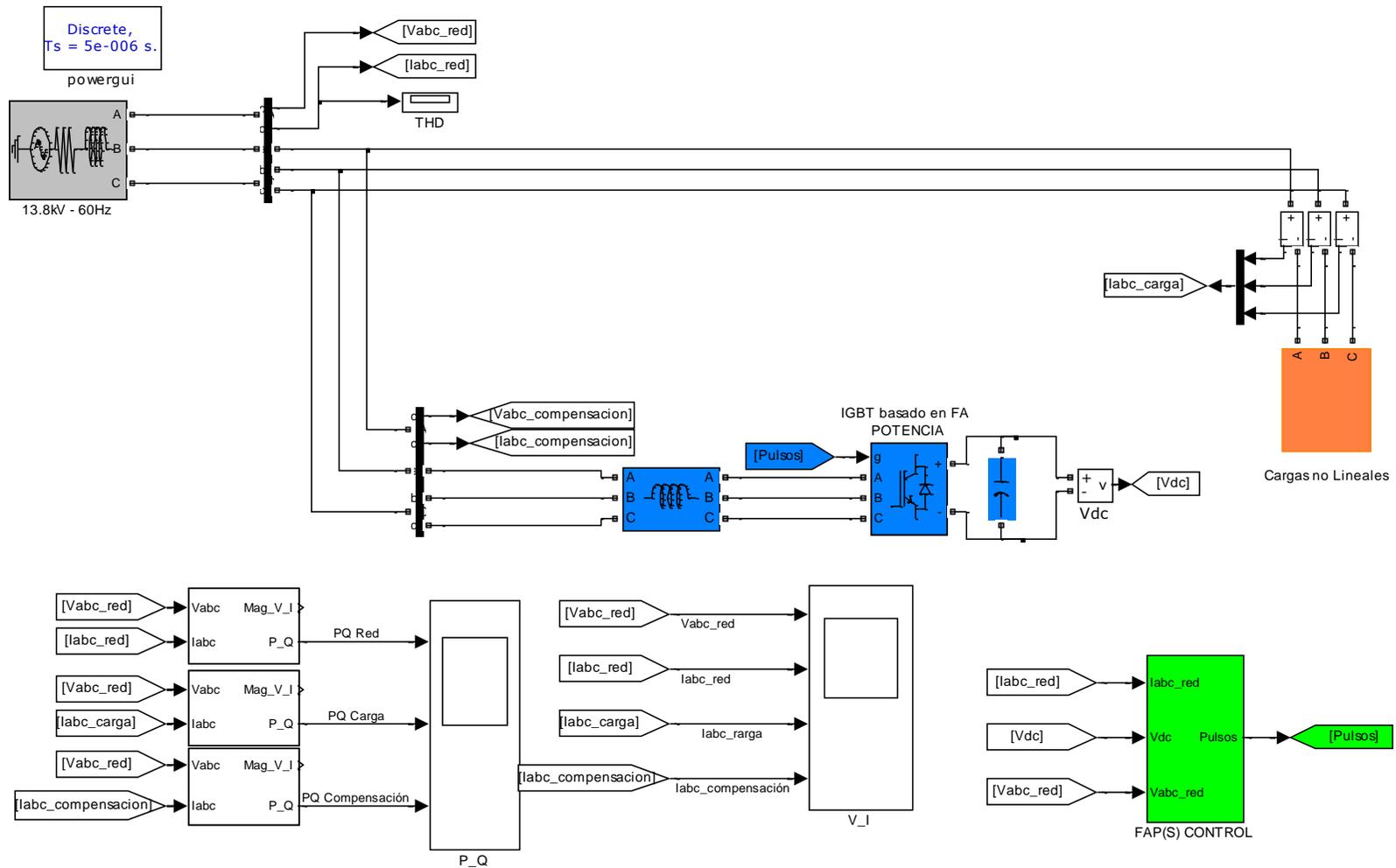


Fig. 4. 12. Modelo en Simulink para evaluación del desempeño de un filtro activo trifásico (13.8kV, 60Hz) conectado en paralelo a un alimentador de media tensión.
Elaboración: Autores.

Los resultados obtenidos en la simulación del funcionamiento del modelo, muestran que la THD de corriente antes de instalar el filtro era del 11,42% (ver Fig.4. 8), y, que se redujo al 2,54% una vez que el filtro activo estuvo operativo (ver Fig. 4. 13). En comparación, con el filtro pasivo trifásico, la THD de corriente se redujo solo al 3,75%.

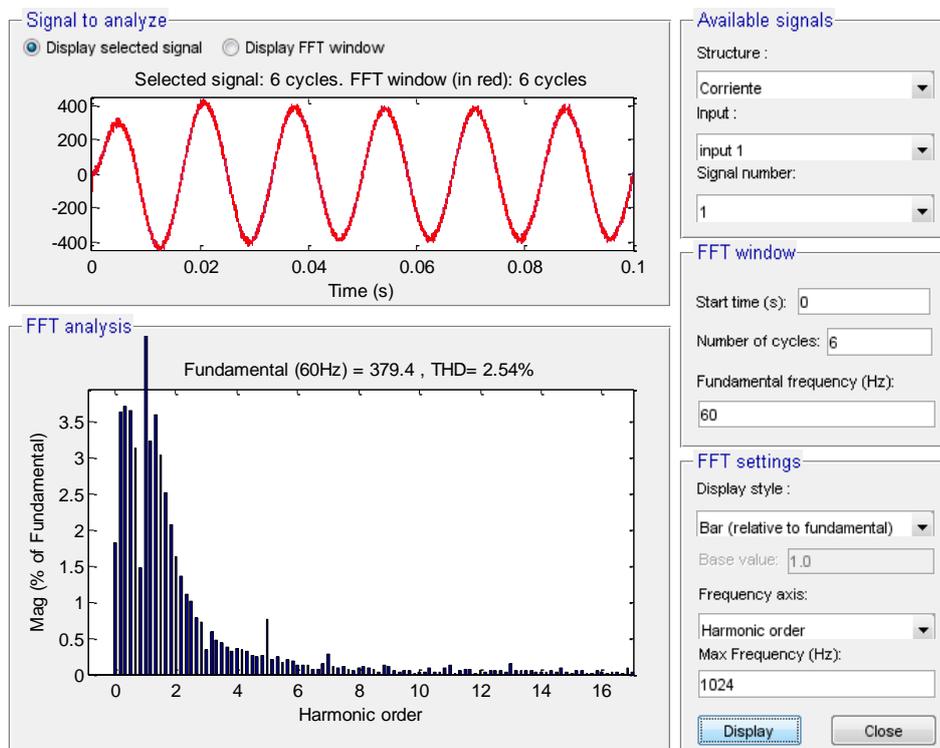


Fig. 4. 13. Pantalla de Simulink que muestra la THD de corriente con el filtro activo trifásico conectado al alimentador.

Elaboración: Autores

La Fig. 4. 14 muestra las formas de onda de la potencia activa (rojo) y reactiva (azul) en la red (fuente), en las cargas no lineales, y la compensación de potencia reactiva desde del filtro activo. Se concluye que luego del filtrado activo, la potencia reactiva en la red es prácticamente nula.

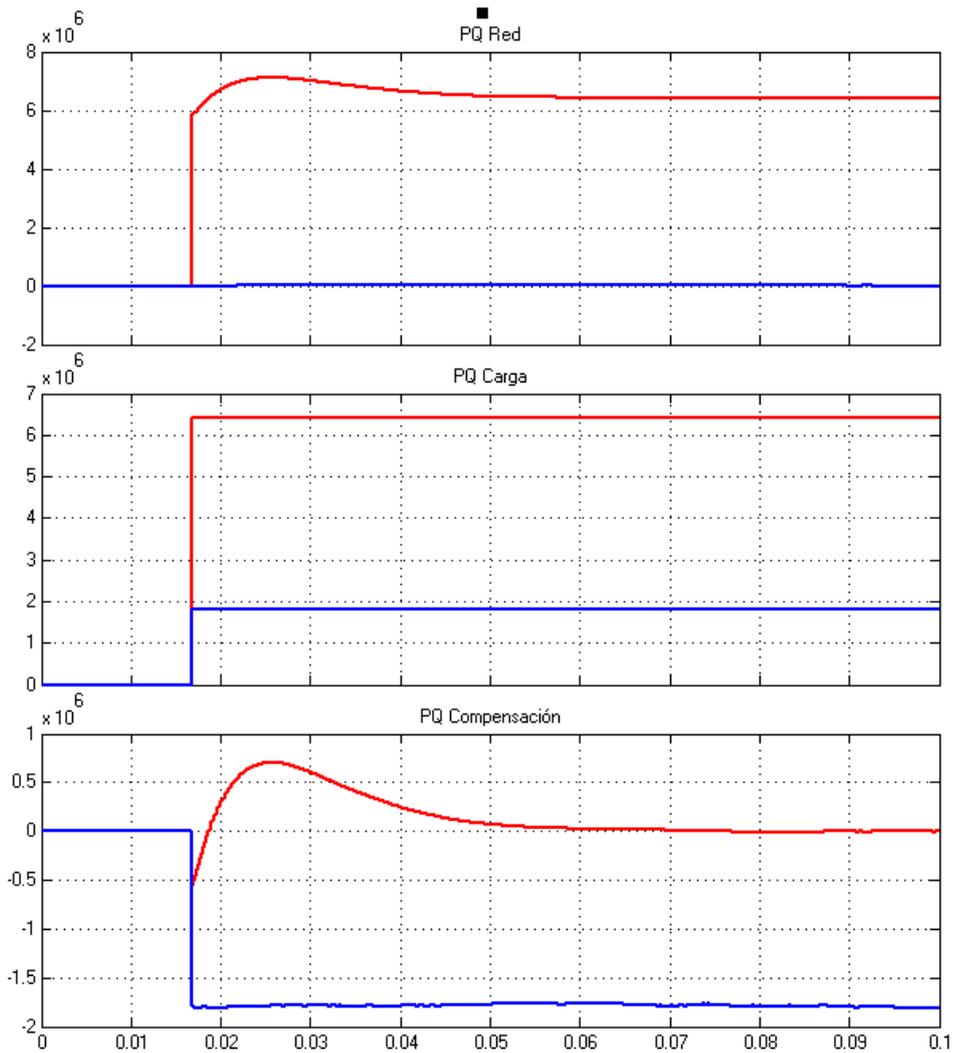


Fig. 4. 14. Formas de onda de la potencia activa y reactiva en la red (PQ Fuente), en las cargas no lineales (PQ Cargas no Lineales); y, compensación de potencia reactiva del filtro activo (PQ Compensación).

Elaboración: Autores.

La Fig. 4. 15 muestra las formas de onda de voltaje y corriente en la red, la corriente en la carga, y, la corriente de compensación (en las tres fases). Los resultados muestran que, a pesar de que la corriente de la carga se distorsiona, el funcionamiento de los filtros devuelve a la red una corriente libre de armónicos, que se asemeja a una senoidal pura.

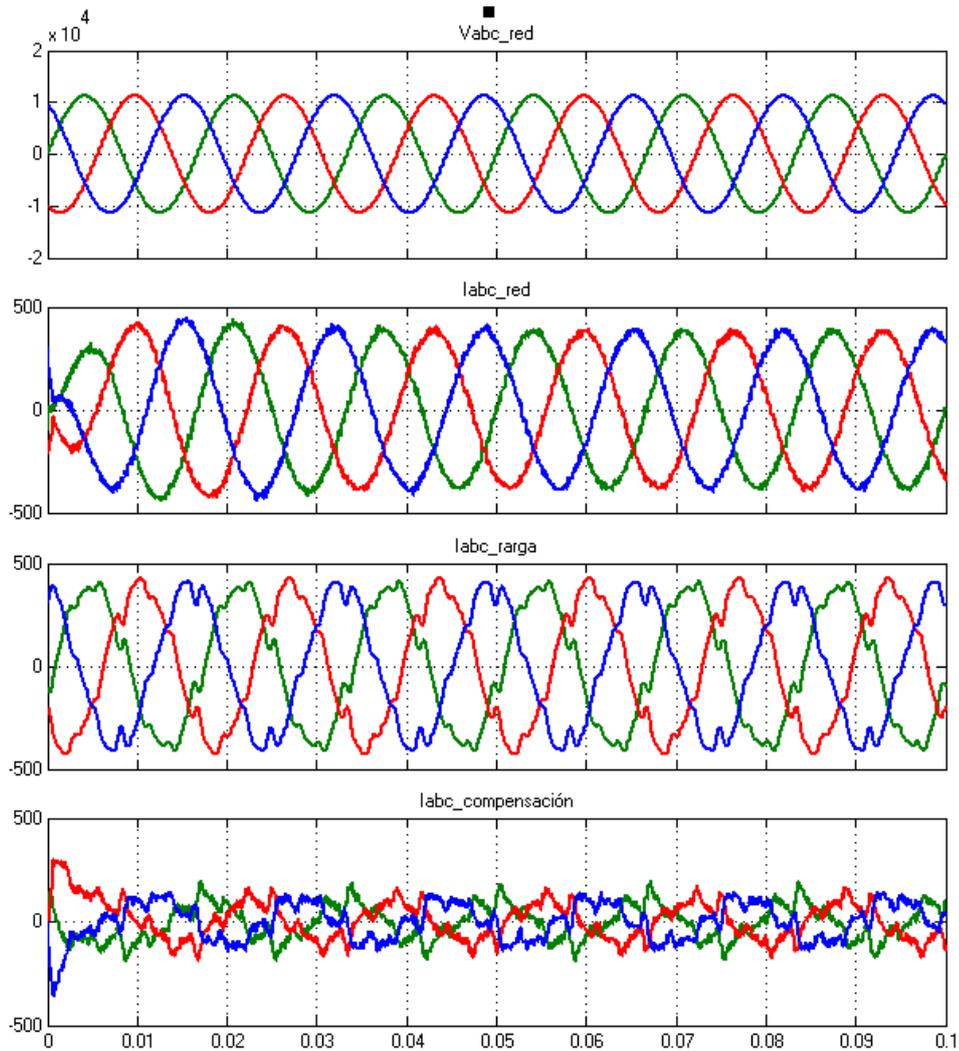


Fig. 4. 15. Formas de onda de voltajes y corrientes en la red, corrientes en la carga, y, corrientes de compensación.
Elaboración: Autores.

4.4. A manera de conclusión.

El empleo de filtros demostró ser una estrategia válida para la compensación de armónicos y factor de potencia en las instalaciones que albergan CI.

Se comprobó que el uso de filtros pasivos monofásicos es efectivo para compensar los problemas generados por la CI de manera local, mientras que los filtros activos trifásicos mostraron su alto desempeño compensando los problemas causados por las CI a nivel de un alimentador. El uso de uno o de otro tipo de filtro dependerá de si la compensación es responsabilidad del propietario de la CI, o si se trata el problema a nivel del proveedor local de energía eléctrica.

CONCLUSIONES

- En el calentamiento por inducción actúan tres fenómenos importantes: la inducción electromagnética, el efecto piel, y el principio de la transferencia de calor.
- El calentamiento por inducción genera calentamiento resistivo en un recipiente, en función de la corriente de Eddy que se forma en la superficie, cuando el recipiente se ubica dentro del campo magnético generado por la bobina de una CI.
- Para el bloque de inversor de alta frecuencia de una CI, el esquema más utilizado es el del inversor cuasi-resonante, debido a su bajo costo de producción en masa, aunque sus indicadores de eficiencia no sean altos.
- El creciente uso de cargas no lineales en la red eléctrica, obliga a utilizar métodos de compensación de armónicos, y, de bajo factor de potencia, entre otros.
- En una cocina de inducción, la afectación mayor al factor de potencia puede provenir del IR, razón por la cual los fabricantes adoptan las medidas compensatorias que se corresponden con la teoría general de compensación del factor de potencia, utilizando filtros.
- En este trabajo se ha presentado la simulación de filtrado pasivo en paralelo con una carga no lineal (CI), antes de instalar el filtro la THD de corriente era de 19,49%, una vez instalado el filtro la THD se redujo al 3,05% cumpliendo con el estándar IEEE 519 de la recomendación para el control de armónicos.
- En filtrado pasivo trifásico la THD de corriente antes de instalar los filtros alcanzó un valor de 11.42%, con el filtrado pasivo trifásico se redujo a 3,75%, de la misma manera con filtrado activo trifásico disminuyó a 2,54% dando un mejor resultado; en ambos casos se cumple con el estándar IEEE 519.
- El empleo de filtros demostró ser una estrategia válida para la compensación de armónicos y factor de potencia en las instalaciones que albergan CI. Se comprobó que el uso de filtros pasivos monofásicos es efectivo para compensar los problemas generados por la CI de manera local, mientras que los filtros activos trifásicos mostraron su alto desempeño compensando los problemas causados por las CI a nivel de un alimentador. El uso de uno o de otro tipo de filtro dependerá de si la compensación es responsabilidad del propietario de la CI, o si se trata el

problema a nivel del proveedor local de energía eléctrica.

REFERENCIAS

- [1] GOBIERNO DE ARAGON. “Tecnologías electrónicas aplicadas a cocción por inducción”. [Online]. Disponible en: <http://www.aragoninvestiga.org/Tecnologias-electronicas-aplicadas-a-coccion-por-induccion/>
- [2] Salazar Masson, J. “Estudio técnico-comparativo para la introducción de cocinas eléctricas de inducción magnética en el Ecuador”. [Online]. Disponible en: <http://bibdigital.epn.edu.ec/bitstream/15000/2165/1/CD-2931.pdf>
- [3] FAIRCHILD Semiconductor. “AN-9012 Induction heating system topology review”. [Online]. Disponible en: <https://www.fairchildsemi.com/application-notes/AN/AN-9012.pdf>
- [4] ON Semiconductor. “Induction Cooking - Everything you need to know”. [Online]. Disponible en: http://www.onsemi.com/pub_link/Collateral/AND9166-D.PDF
- [5] Gómez, V. “Influencia de los Componentes Parásitos en el Análisis y Diseño de Inversores Resonantes Paralelo para Aplicaciones de Calentamiento por Inducción”. [Online]. Disponible en: <http://www.uv.es/~vesteveg/Tesis.pdf>
- [6] Montaña Méndez, N. Mesías Fernández, D. “Diseño de una planta Ensambladora de Cocinetas a Inducción Magnética”. [Online]. Disponible en: http://www.cib.espol.edu.ec/Digipath/D_Tesis_PDF/D-94194.pdf
- [7] TDK EPCOS. “Components for induction in the cookers”. [Online]. Disponible en: <http://www.epcos.com/epcos-en/373562/tech-library/articles/applications---cases/applications---cases/energy-efficiency-in-the-kitchen-/171866>
- [8] No se reconoce el autor. “Filtros EMI-EMC”. [Online]. Disponible en: <http://www.wavecontrol-emc.com/es/136132/-/Filtros-EMI-EMC.htm>
- [9] No se reconoce el autor. “Ecuador Cambia”. [Online]. Disponible en: <http://www.ecuadorcambia.com/>
- [10] MIPRO, MEER. “Convocatoria para la presentación de expresiones de interés y calificación de proveedores de cocinas de inducción para el programa cocción eficiente”. [Online]. Disponible en: <http://www.industrias.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2014/04/PCE-Concurso-cocinas.pdf>
- [11] Cushicóndor Collaguazo, E. Tito Saráuz, D, “DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN PROTOTIPO DE UNA COCINA DE INDUCCIÓN ELECTROMAGNÉTICA”. [Online]. Disponible en: <http://bibdigital.epn.edu.ec/bitstream/15000/11113/1/CD-2596.pdf>
- [12] No se reconoce el autor. “Conmutación Suave”. [Online]. Disponible en: http://catarina.udlap.mx/u_dl_a/tales/documentos/lem/juarez_h_ii/capitulo5.pdf

- [13] Aragonés Boix, O. "Estudio y modelización en régimen permanente de cargas no lineales para el análisis armónico de redes eléctricas". [Online]. Disponible en: <http://www.tdx.cat/bitstream/handle/10803/6291/01Oba01de10.pdf?sequence=1>
- [14] Noroña Lucero, N. "DIAGNOSTICO DE PERTURBACIONES ARMÓNICAS EN EL SISTEMA NACIONAL INTERCONECTADO". [Online]. Disponible en: <http://bibdigital.epn.edu.ec/bitstream/15000/3791/1/CD-3509.pdf>
- [15] INDURAMA. Especificaciones Técnicas Cocina de Inducción, "PRAGA". [Online]. Disponible en: http://www.indurama.com/Portals/_default/Resources/Products/134/InfoMail/InfoMail.pdf
- [16] S. Bhattacharyya, J.F.G Cobben, and W.L. Kling. "Harmonic Current Pollution in a Low Voltage Network". [Online]. Disponible en: <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?arnumber=5588139>
- [17] Bueno Muñoz, H. Fajardo Muzo, M. "DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN FILTRO ACTIVO PARA LA ELIMINACIÓN DE ARMÓNICOS EN UNA RED BIFÁSICA RESIDENCIAL". [Online]. Disponible en: <http://dspace.ups.edu.ec/handle/123456789/5145>
- [18] Iagar, A. Nicolae Popa, G. Dinis C. "The influence of home nonlinear electric equipment operating modes on power quality" Online. Disponible en: <http://www.wseas.org/multimedia/journals/systems/2014/c085702-389.pdf>
- [19] Asqui Santillán, G. Velasco Molina, L. "ANÁLISIS RESIDENCIAL DE ARMÓNICOS PARA USUARIOS TIPO A (PLAN PILOTO) DE LA CIUDAD DE LATACUNGA Y DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE FILTROS ATENUADORES". [Online]. Disponible en: <http://repositorio.espe.edu.ec/bitstream/21000/4996/1/T-ESPEL-%200745.pdf>
- [20] Mora Barajas, M. Bañuelos Sánchez P. "Contaminación armónica producida por cargas no lineales de baja potencia: modelo matemático y casos prácticos". [Online]. Disponible en: <http://www.ejournal.unam.mx/ict/vol1102/ICT001100206.pdf>
- [21] Sharmistha Bhattacharyya, J. Wil Kling. Sjef Cobben and Jasper van Casteren "Harmonic Current Interaction at a Low Voltage Customer's Installation" [Online]. Disponible en: <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=5318859>
- [22] Ministerio de Electricidad y Energía Renovable. "Programa de eficiencia energética para cocción por inducción y calentamiento de agua con electricidad en sustitución del gas licuado de petróleo (GLP) en el sector residencial" [Online]. Disponible en: <http://www.energia.gob.ec/programa-de-eficiencia-energetica->

- para-coccion-por-induccion-y-calentamiento-de-agua-con-electricidad-en-sustitucion-del-gas-licuado-de-petroleo-glp-en-el-sector-reside/
- [23] Téllez Ramírez, E. “DISTORSION ARMONICA”. [Online]. Disponible en: <http://waterygymex.org/contenidos/rtecnicos/Optimizando%20la%20Operacion%20y%20el%20Mantenimiento/Distorsion%20Armonica.pdf>
- [24] Sagredo Gonzáles, J. Abad San Martin. Gonzalez de la Viuda Javier. “Influencia de armónicos en el factor de potencia de una instalación eléctrica y en su compensación”. [Online]. Disponible en: <https://es.scribd.com/doc/212714021/Influencia-De-Armonicos-En-El-Factor-De-Potencia-De-Una-Instalacion-Elctrica-Y-En-Su-Compensacio>
- [25] Román Lumbreras, M. “FILTROS ACTIVOS DE POTENCIA PARA LA COMPENSACIÓN INSTANTANEA DE ARMÓNICOS Y ENERGÍA REACTIVA”. [Online]. Disponible en: <http://www.tdx.cat/bitstream/handle/10803/6306/01MrI01de01.pdf?sequence=1>
- [26] Ahmed Memon, Z. Aslam Uquaili, M. Ali Unar, M. “Harmonics Mitigation of Industrial Power System Using Passive Filters”. [Online]. Disponible en: https://www.google.com.ec/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=1&cad=rja&uact=8&ved=0CCIQFjAA&url=http%3A%2F%2Fwww.researchgate.net%2Fprofile%2FMukhtiar_Unar%2Fpublication%2F259483983_Harmonics_Mitigation_of_Industrial_Power_System_Using_Passive_Filters%2Flinks%2F02e7e53c586161200c000000&ei=8U9-VOPxFoSoNvzXgvAF&usg=AFQjCNHyZ6_IgIIm6UwXz1UbPDwXFiPtZg&bvm=bv.80642063,d.eXY
- [27] Electrical Construction & Maintenance. “FACTOR DE POTENCIA”. [Online]. Disponible en: <http://www.ruelsa.com/notas/factor/fp20.html>
- [28] Campos, Juan. Figueroa, Edgar. Stand, Lourdes. Ospino, Iván. Gómez, Alfredo. Quispe, Enrique. Vidal, Juan. Castrillón, Yuri. Mendoza, Rosaura. “CORRECCIÓN DEL FACTOR DE POTENCIA Y CONTROL DE LA DEMANDA”. [Online]. Disponible en: <http://www.si3ea.gov.co/Portals/0/Gie/Tecnologias/factor.pdf>
- [29] Boylestad, Robert L. “Introducción al análisis de circuitos”, Décima Edición, PEARSON EDUCATION, México, 2004.
- [30] Cushicóndor Collaguazo, E. Tito Saráuz, D, “DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN PROTOTIPO DE UNA COCINA DE INDUCCIÓN ELECTROMAGNÉTICA”. [Online]. Disponible en: <http://bibdigital.epn.edu.ec/bitstream/15000/11113/1/CD-2596.pdf>

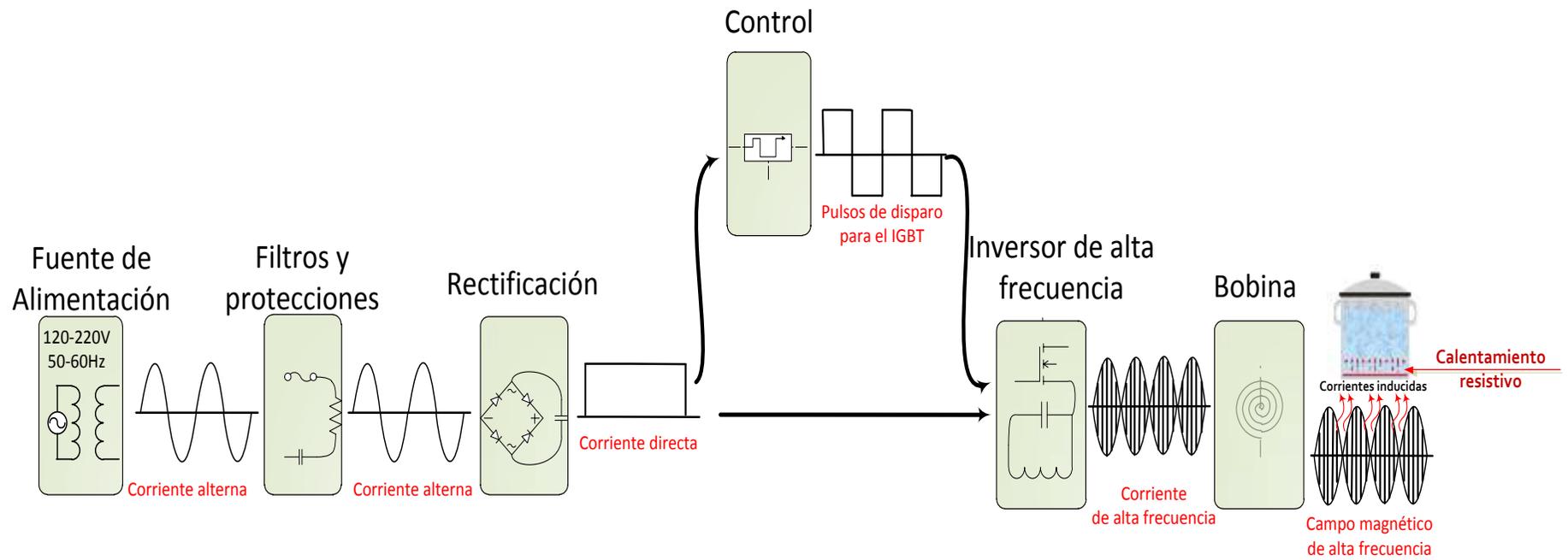
- [31] SIMULINK. "Simulation and Model-Based Design". [Online]. Disponible en: <http://www.mathworks.com/products/simulink/>
- [32] MATLAB. "The Language of Technical Computing". [Online]. Disponible en: <http://www.mathworks.com/products/matlab/>
- [33] MINISTERIO DE ELECTRICIDAD Y ENERGÍA RENOVABLE. Informe de resultados de la implementación del "Plan Fronteras para Sustitución de Cocinas de Inducción en el Carchi". [Online]. Disponible en: <http://idbdocs.iadb.org/wsdocs/getdocument.aspx?docnum=38699214>
- [34] Tapia Arias, A. Vilcacundo Banda, M. "ESTUDIO DE LA PROYECCIÓN Y DETERMINACIÓN DEL CRECIMIENTO DE LA DEMANDA POR TIPO DE USUARIO, CON LA INCLUSIÓN DE LA COCINA DE INDUCCIÓN, EN EL ALIMENTADOR PICAIHUAA 13,8 KV DE LA SUBESTACIÓN ORIENTE, PERTENECIENTE A LA EMPRESA ELÉCTRICA AMBATO REGIONAL CENTRO NORTE S.A.". [Online]. Disponible en: <http://repositorio.utc.edu.ec/bitstream/27000/1890/1/T-UTC-1780.pdf>
- [35] Hernández Tolentino, F. "Impacto de las armónicas en los sistemas eléctricos de potencia". [Online]. Disponible en: <http://cdigital.uv.mx/bitstream/123456789/31227/1/felixjavierhernandeztolentino.pdf>
- [36] CICUTOR. "Filtros de armónicos y EMI". [Online]. Disponible en: http://cicutor.com/docs/CA_R7_SP.pdf
- [37] González Hidalgo W. Impacto de la implementación del sistema de cocción inducción electromagnética en las redes de distribución de la empresa Eléctrica Regional del Sur. [Online]. Disponible en: <http://dspace.ucuenca.edu.ec/bitstream/123456789/19841/1/TESIS.pdf>
- [38] Pérez Abril, I. Cálculo de parámetros de filtros pasivos de armónicos. [Online]. Disponible en: http://scielo.sld.cu/scielo.php?pid=S1815-59012012000200006&script=sci_arttext

ANEXOS

ANEXO 1. Diagrama de bloques de una cocina de inducción y formas de onda a la salida de cada bloque.

ANEXO 2. PAPER: Sobre la compensación de armónicos y energía reactiva en cocinas de inducción.

ANEXO 1



Sobre la compensación de armónicos y energía reactiva en cocinas de inducción

Milner Estalin Cumbicus^{#1}, Jorge Luis Jaramillo^{#2}

^{#1}Profesional en formación TET, Universidad Técnica Particular de Loja

^{#2}Docente investigador de la SEE del DCCE, Universidad Técnica Particular de Loja

Loja, Ecuador 2015

[1mecumbicus@utpl.edu.ec](mailto:mecumbicus@utpl.edu.ec), [2jorgeluis@utpl.edu.ec](mailto:jorgeluis@utpl.edu.ec)

Resumen— En este trabajo se explica los fundamentos de la cocción de alimentos por inducción, se describe el estado del arte en la compensación de armónicos y energía reactiva (factor de potencia) en cocinas de inducción, y, se analiza el desempeño de filtros pasivos en redes monofásicas, y de filtros pasivos y activos conectados a redes trifásicas, para compensar los problemas generador por el funcionamiento de cocinas de inducción.

Palabras claves— cocinas de inducción magnética, operación de las cocinas de inducción magnética, compensación de armónicos, compensación de energía reactiva, filtros activos y pasivos.

I. INTRODUCCIÓN

La tecnología de cocción por inducción no solo presenta una mejor eficiencia energética, sino que también registra una mayor rapidez de cocción, a tal punto que esta tecnología está reemplazando a los sistemas tradicionales de cocción (leña, gas, y, resistencia eléctrica) [1], [2].

Ya que las políticas nacionales han marcado un gran interés de la cocción por inducción, desde la Sección de Electrónica y Telecomunicaciones del Departamento de Ciencias de la Computación y Electrónica de la UTPL, se planteó la iniciativa de iniciar una serie de acciones que permitan conocer los principios de operación de las cocinas de inducción (CI), identificar su impacto en las redes eléctricas, y, difundir los resultados entre los interesados.

En este contexto, y, considerando el tratamiento que se ha dado en el país a la introducción de las CI, el profundizar en torno a la compensación de armónicos y de energía reactiva (factor de potencia) en CI es relevante. Establecido el principio de funcionamiento de una CI, y el estado del arte en la compensación de armónicos y factor de potencia en CI, el equipo de

trabajo decidió investigar el comportamiento de filtros pasivos conectados a CI, y, el desempeño de filtros pasivos y activos conectados en uno de los alimentadores trifásicos que proveen de energía eléctrica a un grupo de CI. El desempeño de los filtros en cada uno de los escenarios se analizó utilizando modelos matemáticos desarrollados en el aplicativo Simulink [3], perteneciente a la plataforma MATLAB [4].

En este documento, se describe los resultados obtenidos.

II. FUNDAMENTOS DE LA COCCIÓN POR INDUCCIÓN, Y DE LAS COCINAS DE INDUCCIÓN MAGNÉTICA

A. Fundamentos del calentamiento por inducción

El funcionamiento de una CI puede explicarse a través de la operación de un transformador (ver Fig. 1) [5]. La bobina de la CI tiene que maximizar la energía calorífica generada en el recipiente, construido con materiales de baja resistencia y alta permeabilidad magnética [6]. Entonces, el calentamiento por inducción se compone de tres factores básicos: la inducción electromagnética, el efecto piel, y la transferencia de calor.

Inducción electromagnética

El calentamiento por inducción se basa en las leyes de la inducción magnética (Ley de Faraday y Ampere) y del efecto Joule [7].

De acuerdo a la Ley de Ampere, cuando una corriente alterna fluye por una bobina, un campo magnético es formado alrededor de la misma (ver expresión (1)).

$$NI = HI \quad (1)$$

En dónde,

N, es el número de espiras en el conductor
 I, es la corriente que lo atraviesa, A
 H, es la intensidad del campo magnético, A/m
 l, es la longitud del circuito, m

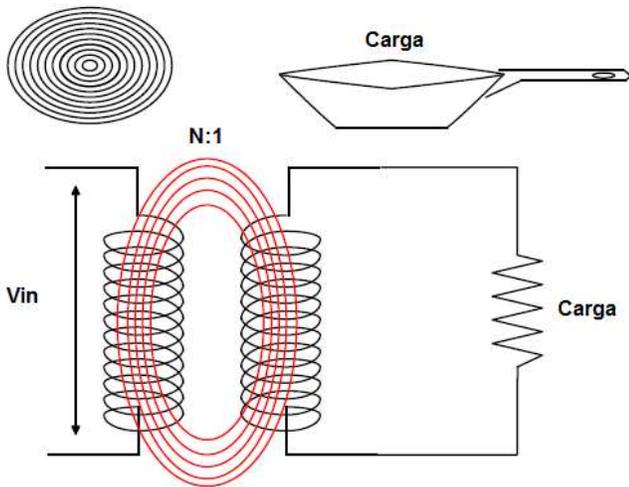


Fig.1. Equivalencia de la operación de un transformador y de una CI (esquema bobina - carga) [4]

Si la corriente que pasa por el inductor es variante en el tiempo, el campo magnético producido también lo será, con lo cual se obtendrá un flujo magnético alterno.

Según la ley de Faraday, en toda sustancia conductora que se encuentra dentro de un campo magnético variable, se producirá una fuerza electromotriz cuyo valor se determina a través de la expresión (2) [8].

$$\varepsilon = -N \frac{d\phi_m}{dt} \quad (2)$$

En dónde,

ε , es el voltaje inducido (fem), V
 N, es el número de espiras en el conductor
 ϕ_m , es el flujo del campo magnético, Wb

Finalmente, el calentamiento del recipiente se produce al generarse dentro de éste, corrientes inducidas de Foucault o de Eddy, las cuales disipan energía en forma de calor, según lo establece la ley de Joule tal como lo muestra la ecuación (3) [1].

$$P = \frac{E^2}{R} \quad (3)$$

En dónde,

P, es la potencia disipada en el recipiente, W
 E, es el voltaje inducido, V
 R, es la resistencia determinada por la resistividad ρ y la permeabilidad μ del objeto conductivo, Ω

Efecto piel

Cuando una corriente alterna fluye en un conductor, se presenta la tendencia a que la corriente fluya principalmente por su superficie, con lo que la distribución no es uniforme, dependiendo de la profundidad y de la frecuencia de la corriente (ver ecuaciones (4) y (5)) [6]. La densidad de la corriente disminuye exponencialmente a la profundidad de la superficie, tal como lo muestra la Fig.2.

$$J = J_s e^{-d/\delta} \quad (4)$$

En dónde,

J, es la densidad de corriente, A/m²
 J_s , es la densidad de corriente en la superficie del conductor, A/m²
 d, es la profundidad del conductor, mm
 δ , es la profundidad de penetración, mm

$$\delta = \sqrt{\frac{\rho}{\pi f \mu}} \quad (5)$$

En dónde,

ρ , es la resistividad del conductor, Ωm
 f, es la frecuencia de operación, Hz
 μ , es la permeabilidad magnética, H/m

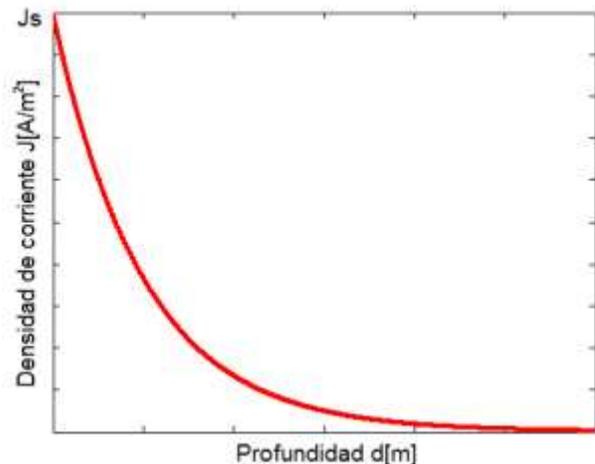


Fig.2. Distribución de la corriente en función de la profundidad del conductor. Diseño de los autores.

La Fig. 3 muestra curvas de la profundidad de penetración, en función de la frecuencia de la corriente, para algunos materiales.

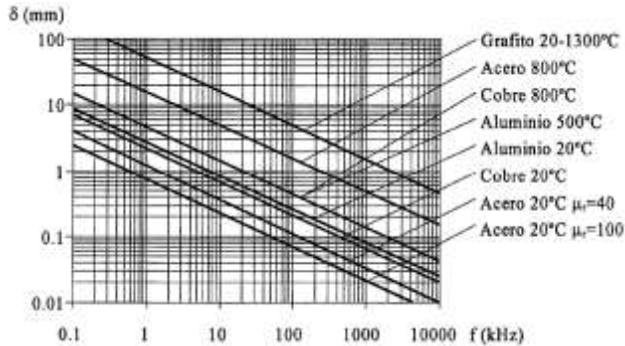


Fig.3. Curva de la profundidad de penetración en función de la frecuencia para diversos materiales [1].

Transferencia de calor

En una CI se registra el apareamiento de corrientes de Eddy (ver Fig.4) que generan calor. La cantidad de calor generado se relaciona al efecto Joule o calentamiento óhmico, que explica que la energía portada por la corriente eléctrica a través de un conductor, se disipa como calor (ver ecuación (6)) [4].

$$P = VI \quad (6)$$

En dónde,

- P, es la potencia convertida de energía eléctrica a energía térmica, W
- I, es la corriente que fluye por el conductor (corrientes inducidas), A
- V, es el voltaje aplicado al recipiente, V

B. Cocinas de inducción

Generalidades

En una CI de mercado, una corriente eléctrica de alta frecuencia (entre 20 y 100 KHz) fluya a través de una bobina plana de cobre en forma de espiral, produciendo un campo electromagnético oscilante. Este campo induce en un recipiente (olla, sartén, cacerola, etc.) una corriente eléctrica, que al fluir por el recipiente produce calentamiento resistivo generando calor que se transfiere a los alimentos (ver Fig.4).

En una CI, el valor de la corriente es grande mientras que el voltaje se mantiene bajo [6]. La potencia disipada es proporcionada por un circuito resonante tipo RLC, en serie o en paralelo, cuyos elementos se escogen de forma tal que el circuito se comporta como uno resistivo puro, eliminando los efectos de reactancia y mejorando el factor de potencia.

Funcionalmente, una CI está formada por seis bloques: fuente de alimentación, filtros y protecciones, rectificación, control, inversor de alta frecuencia, y, la bobina que induce el campo magnético en el recipiente (ver Fig.5).

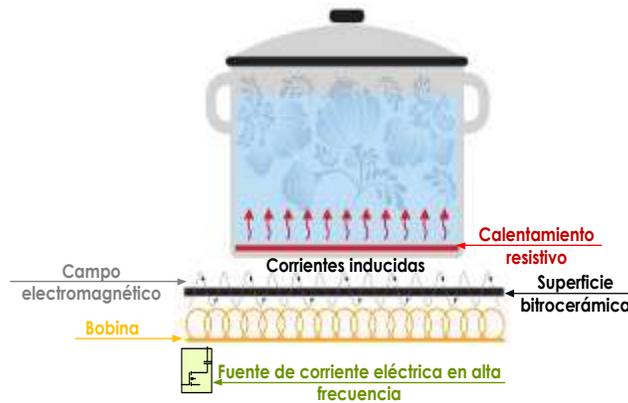


Fig.4. Operación de una cocina de inducción [11]

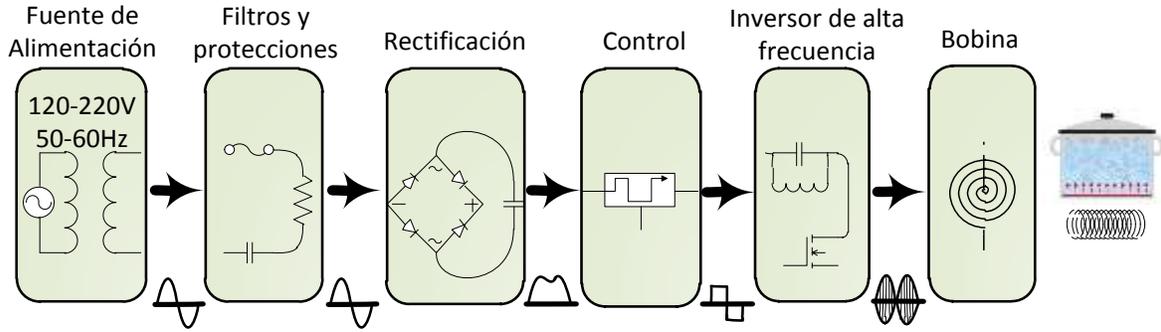


Fig.5. Diagrama de bloques de una cocina de inducción. Diseño de los autores.

Fuente de alimentación

La fuente de alimentación se conecta directamente a la red eléctrica de baja tensión, siempre que se cumpla con la tensión y frecuencia especificadas por el fabricante.

Filtros y protecciones

Los filtros de interferencia electromagnética (EMI) o filtros de compatibilidad electromagnética (EMC), restringen el ingreso a la red eléctrica, de la energía electromagnética potencialmente generada en el circuito de potencia del inversor, ante las altas frecuencias de la señal [9]. En algunos diseños de CI de baja gama, se obvia esta protección.

Rectificación

El bloque de rectificación proporciona voltaje y corriente DC, a los elementos activos y pasivos de los bloques siguientes.

Control

El bloque de control permite al usuario regular la potencia o los tiempos de cocción, a través de una pantalla digital con escalas numéricas [12]. Adicionalmente, el bloque de control se encarga de gestionar la operación de los actuadores.

Inversor de alta frecuencia

El inversor de alta frecuencia genera una onda de voltaje o corriente alterna, de determinada magnitud y frecuencia, a partir de una fuente de energía continua. Su funcionamiento se basa en la conversión CD a CA, utilizando conmutadores rápidos como los denominados IGBT's (Insulated Gate Bipolar Transistor) [13]. Un IGBT es un conmutador electrónico que puede manejar altas potencias a altas frecuencias de conmutación,

mediante una señal de CD aplicada a la terminal de su compuerta le permite conducir entre sus terminales emisor-colector (ver Fig.6).

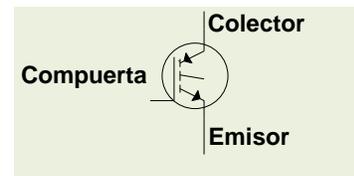


Fig.6. Estructura de un IGBT. Diseño de autores

Generalmente se emplean inversores resonantes conformados por un resistor, un capacitor, y un inductor, conectados en serie o en paralelo (ver Fig.7). En estos esquemas, la frecuencia de resonancia responde a la velocidad de transferencia de energía entre los elementos, y se determina a través de la ecuación (7) [5].

$$f_{res} = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (7)$$

En dónde,

- f_{res} , es la frecuencia de resonancia del circuito, Hz
- L , es la inductancia en el inductor, H
- C , es la capacitancia en el capacitor, F

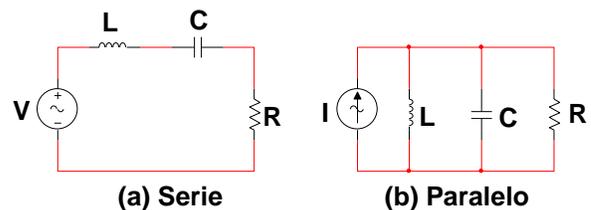


Fig.7. Esquemas inversores resonantes utilizados en las CI. Diseño de los autores.

Las reactancias inductiva y capacitiva se calculan mediante las ecuaciones (8) y (9) respectivamente, mientras que el valor de la impedancia de un resonador en serie, se determina por la ecuación (10).

$$X_L = j2\pi fL \quad (8)$$

$$X_C = \frac{1}{j2\pi fC} \quad (9)$$

$$|Z| = \sqrt{R^2 + \left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)^2} \quad (10)$$

En dónde,

- X_L , es la reactancia inductiva, Ω
- j , es el operador del fasor
- f , es la frecuencia de trabajo del circuito, Hz
- L , es la inductancia en el inductor, H
- X_C , es la reactancia capacitiva, Ω
- C , es la capacitancia en el capacitor, F
- $|Z|$, es la impedancia del resonador en serie, Ω
- R , es la resistencia del resistor, Ω

Bobina

Generalmente se emplea bobinas planas en forma de espiral. Estas bobinas se encargan de producir un campo electromagnético cerca al recipiente, campo que luego se transformará en calentamiento resistivo para la cocción de los alimentos.

C. Inversores resonantes

Los inversores resonantes (IR) son el bloque fundamental de una CI.

Un IR incorpora un circuito tanque para crear las oscilaciones (usualmente sinusoidales), y, trabaja a muy altas frecuencias de conmutación con pocas pérdidas de potencia, utilizando técnicas de control como PWM [12]. El trabajo con frecuencias de conmutación en el orden de los kHz, permite que los inductores y capacitores sean de menor tamaño y precio.

En las CI se utilizan principalmente 2 topologías para los IR: el IR de medio puente, y, el inversor cuasi-resonante [5], [6].

Inversor resonante de medio puente.

El IR en serie de medio puente consta de 2 capacitores de igual valor, conectados en serie a través de la señal de entrada CD, de tal forma que cada capacitor se carga a la

mitad del voltaje de entrada ($V_o/2$).

Este tipo de IR es más utilizado en las CI de múltiples hornillas o focos. El circuito equivalente de la carga es un circuito resonante tanque, conformado por una bobina inductiva, un capacitor resonante, y, la resistencia equivalente del recipiente [6].

En este IR, la etapa de potencia se compone de dos interruptores IGBT con diodos antiparalelos, dos condensadores, y, una bobina (ver Fig.8). En relación a la expresión (7), este circuito tiene tres modos de operación: para $f < f_{res}$ se comporta como un circuito capacitivo, para $f > f_{res}$ se comporta como un circuito inductivo, y, para $f = f_{res}$ se comporta como circuito resistivo.

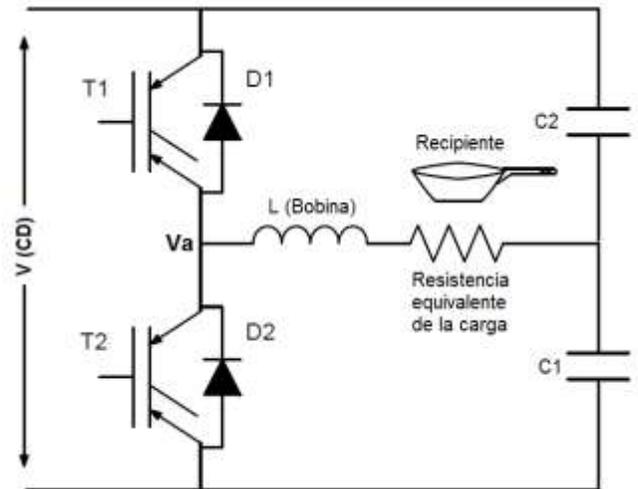


Fig.8. Esquema de un inversor resonante de medio puente [4].

El principio de operación del circuito de potencia del IR se muestra en la Fig.9. $V_{Compuerta T1}$ y $V_{Compuerta T2}$ son las señales de disparo de los IGBT. El voltaje de salida V_a se amortigua mediante el capacitor (señal senoidal de color rojo). El semiciclo positivo de t_{0-2} es controlado por $V_{Compuerta T1}$ y el negativo t_{2-4} por $V_{Compuerta T2}$.

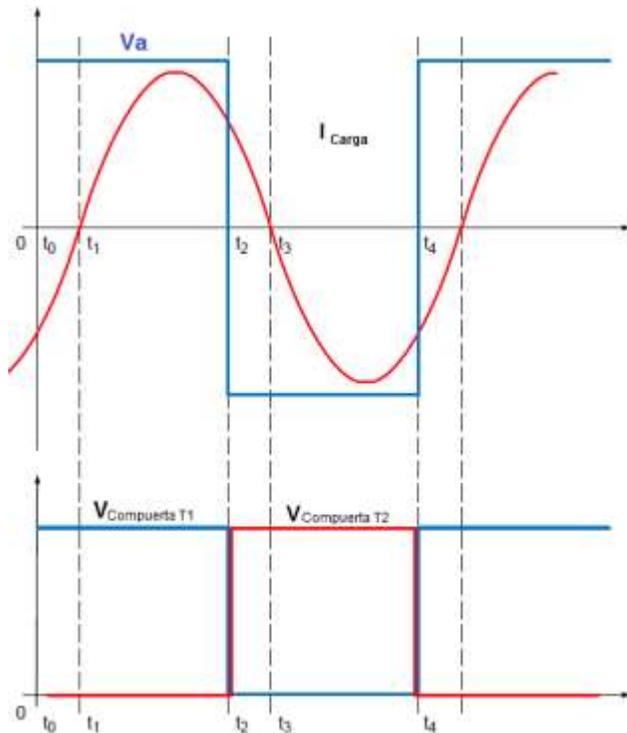


Fig.9. Formas de onda de disparo de los IGBT y señales de salida de un IR de medio puente [4].

Inversor cuasi-resonante

Este tipo de inversor es el más utilizado en las CI, inversores de microondas, aplicaciones de calentamiento por inducción, y otras aplicaciones. La operación de un inversor cuasi-resonante es similar a la de un IR de medio puente (ver Fig.9), pero difieren en los métodos de control de disparo, ya que solo utiliza un solo IGBT, el diodo antiparalelo, un capacitor y el inductor [12].

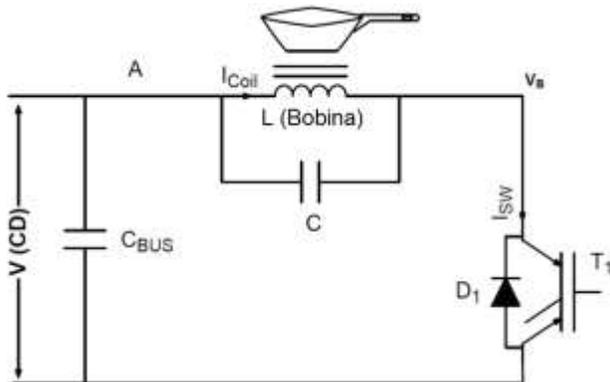


Fig.10. Esquema de un inversor cuasi-resonante. [6]

Las señales de este inversor se muestran en la Fig.11.

$V_{\text{Compuerta T1}}$ controla el disparo del IGBT, V_a es la señal de salida, I_{Load} es determinada por el circuito tanque y será entregada al recipiente. Desde t_{0-1} el IGBT se activa y carga el capacitor, desde t_{1-3} el capacitor se descarga entregando su energía a la carga.

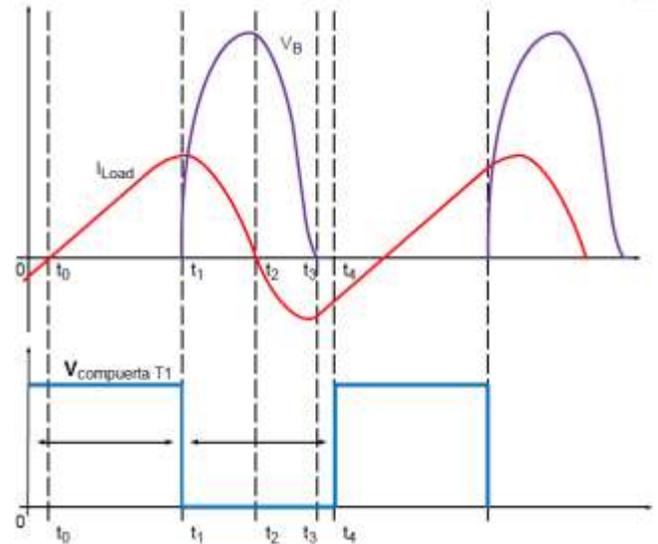


Fig.11. Formas de onda de disparo del IGBT y señal de salida de un inversor cuasi-resonante [4].

A manera de conclusión

Las 2 topologías de IR tienen ventajas y desventajas. Los IR de medio puente, tienen conmutación estable, son de bajo costo y de fácil diseño; mientras que su principal desventaja radica en la necesidad de 2 circuitos de switcheo. Los inversores cuasi-resonantes necesitan de un único circuito de switcheo, por lo que el circuito impreso es más pequeño, y se reducen los costos de producción en masa; mientras que su principal desventaja es su conmutación inestable.

Las CI se comportan como una carga no lineal [15], [16]. Algunos modelos tienen potencias máximas de trabajo de cerca de 4000W [17], por lo que es muy probable que su bloque de rectificación y su inversor de alta frecuencia inyecten armónicos en la red eléctrica, afectando la calidad de energía eléctrica (CEL). Por esta razón será necesario a futuro, determinar el efecto de las CI en la CEL en la red de distribución, e, identificar algunos métodos para minimizar los posibles efectos.

III. ESTADO DEL ARTE EN LA COMPENSACIÓN DE ARMÓNICOS EN COCINAS DE INDUCCIÓN

A. Generalidades de la generación de armónicos y su compensación

Una breve referencia sobre la calidad de la energía eléctrica

En términos generales, el concepto de calidad en la provisión de energía eléctrica (CEL) incluye 2 dimensiones: confiabilidad y disponibilidad, y, calidad de potencia eléctrica [18].

La provisión de energía eléctrica se considera confiable y disponible, si se puede contar con el servicio donde y cuando se necesite, sin fallas ni cortes. La calidad de potencia eléctrica se relaciona si la tensión, frecuencia, y, forma de onda son las adecuadas.

La CEL puede ser analizada desde 3 tres perspectivas: la del consumidor, la del fabricante de equipos, y, la del proveedor de energía. Para el consumidor es relevante la afectación que las variaciones de tensión provocan en los equipos. Para el fabricante de equipos, prima el garantizar la tolerancia suficiente que permita evitar daños en los mismos. Para el proveedor, son importantes las características de las corrientes consumidas por sus clientes, y, las posibles afectaciones a la red en función de la calidad de consumo [19].

Un aspecto influyente en la calidad de energía es la distorsión armónica. Un usuario puede agregar inconscientemente distorsión a la red, al conectar cargas no lineales.

En nuestro país, el ente regulador de los parámetros de la energía eléctrica y de la calidad del servicio eléctrico de distribución, es el Consejo Nacional de Electricidad (CONELEC).

Armónicos

Los armónicos son señales senoidales o cosenoidales, cuyas frecuencias son múltiplos enteros de la frecuencia fundamental de la alimentación [20].

Los armónicos son generados por cargas no lineales que, conectadas a la red eléctrica alterna y senoidal, absorben corrientes no lineales, cuya amplitud y frecuencia dependen de la deformación de la onda de corriente [21] (ver Fig.12). Generalmente, los armónicos de tercer, quinto y séptimo orden agregan el mayor nivel de distorsión armónica, independientemente del tipo de carga [22], [21].

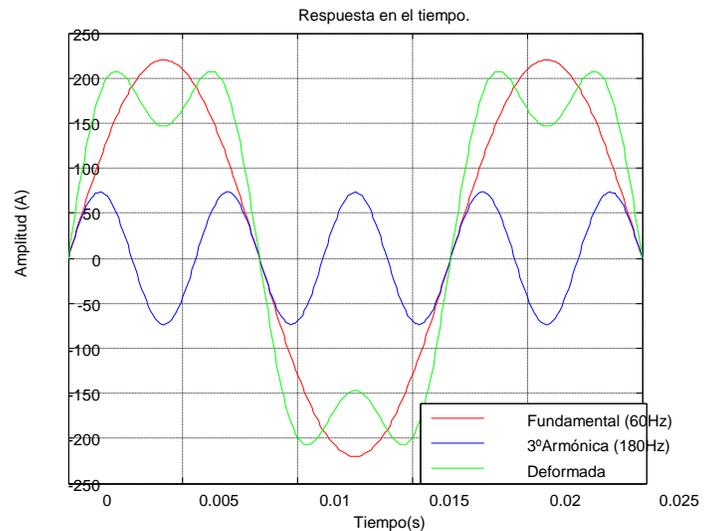


Fig.12. Influencia de los armónicos en la deformación de la señal senoidal fundamental. Diseño de los autores.

La presencia de armónicos en la red disminuye el factor de potencia al aumentar la potencia a transportar, dispara interruptores de forma repentina, incrementa el calentamiento de transformadores, produce vibraciones y sobrecargas en las máquinas, entre otros.

Por otra parte, el perjuicio económico de la presencia de armónicos se refiere a costos visibles y costos ocultos. Como visible se identifica el mayor consumo eléctrico relacionado con la existencia de energía reactiva. En el grupo de costos ocultos se incluye las pérdidas en distribución, las pérdidas de potencia y energía, la inversión en la ampliación de instalaciones, y, los costos relacionados al paro de procesos productivos.

Algunos equipos eléctricos y electrónicos inducen armónicos en la red eléctrica de distribución. Entre estos se nombra a los equipos electrónicos conectados a la red monofásica, a los equipos de calentamiento por inducción magnética, a los equipos de soldadura eléctrica, a los arrancadores electrónicos, a los variadores de velocidad, entre otros. En este contexto, y, debido a que como política de gobierno se prevé sustituir el uso de gas licuado de petróleo por electricidad para uso doméstico en cocción de alimentos y calentamiento de agua [23], existe preocupación en torno a que el ingreso de la nueva carga en la red, podría afectar la CEL.

Clasificación de los armónicos

Los armónicos se clasifican de acuerdo a tres parámetros: orden, frecuencia, y, secuencia.

Considerando que la frecuencia fundamental en la red eléctrica ecuatoriana es de 60 Hz, el **número de orden** se define como la relación entre la frecuencia del armónico y la frecuencia fundamental (ver ecuación (11)).

$$n = \frac{f_n}{f_{60}} \quad (11)$$

En dónde,

- n , es el número de armónico
- f_n , es la frecuencia del armónico, Hz
- f_{60} , es la frecuencia fundamental, Hz

Se conoce como **frecuencia del armónico** al resultado de multiplicar el número del orden del armónico por la frecuencia fundamental.

La **secuencia del armónico** responde al giro del armónico con respecto a la fundamental. De acuerdo a la secuencia, los armónicos son (+), (-), y, (0) [19]. Los armónicos de secuencia (+) tienen rotación directa, y, producen calentamiento de conductores, rotura de circuitos, etc. Los armónicos de secuencia (-) tienen rotación inversa, y, producen un efecto de freno además de calentamiento de conductores. Los armónicos de secuencia (0) o “triplens”, no tienen sentido de rotación, pero pueden causar calentamiento.

Las ondas simétricas contienen únicamente armónicas impares, mientras que las ondas asimétricas tienen tanto armónicas pares como impares [24]. La Tabla 1 muestra los parámetros de los armónicos más usuales.

Tabla 1

Parámetros de los armónicos más usuales. Elaborada por los autores.

Orden	Frecuencia (Hz)	Secuencia
1 (fundamental)	60	+
2	120	-
3	180	0
4	240	+
5	300	-
6	360	0
7	420	+
8	480	-
9	540	+
---	---	---
n	60*n	---

Espectro armónico y distorsión armónica total

Utilizando la transformada rápida de Fourier, cualquier señal puede ser descompuesta en sus armónicos, en el dominio de la frecuencia (ver Fig.13).

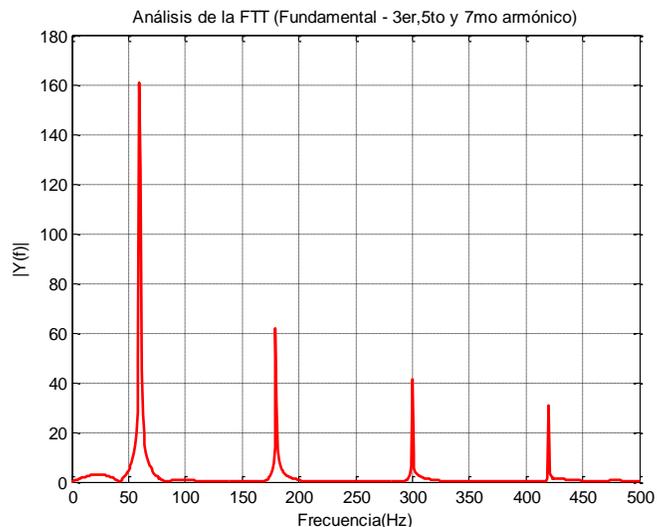


Fig.13. Espectro armónico de una señal. En la gráfica se observan la señal fundamental, y, el 3er, 5to, y, 7mo armónico. Diseño de los autores

Se conoce como distorsión armónica total (THD) a la relación entre el contenido armónico de la señal, y la primera armónica o fundamental. La THD tiene un valor comprendido entre 0% e infinito [25], y, se define a través de la ecuación (12). La distorsión se mide por separado para corriente y para voltaje.

$$THD = \frac{\sqrt{\sum_{a=2}^n I h_a^2}}{I h_1} 100\% \quad (12)$$

En dónde,

- THD , es la distorsión armónica total, %
- a , es el número de orden del armónico
- $I h_a$, es la corriente del armónico a, A
- $I h_1$, es la corriente de la fundamental, A

Armónicos y transferencia de potencia

Al aumentar la distorsión armónica, la forma de onda se asemeja a pulsos con grandes picos de corriente. El valor eficaz de la corriente aumenta, lo que provoca una potencia aparente mayor, mientras que la potencia activa y el factor de potencia se mantienen sin cambio (puesto que dependen de la frecuencia fundamental).

En esta situación, los equipos eléctricos se sobrecalientan, y, los vatímetros de discos de inducción operan incorrectamente, ya que están diseñados para funcionar con ondas no distorsionadas y a la frecuencia fundamental [25].

B. Métodos para la reducción de armónicos

Para reducir armónicos se emplea una gama de métodos, entre los que se menciona la adecuación de instalaciones, la incorporación de transformadores de aislamiento, la incorporación de inductancias antiarmónicas; el redimensionando del neutro; y, la instalación de filtros pasivos y activos. En el marco de este proyecto, se decidió prestar especial interés al funcionamiento de los filtros.

Filtrado pasivo de armónicos

En el filtrado pasivo, se utiliza resistencias, inductancias y capacitancias para la cancelación de la energía reactiva y de los armónicos [26].

En este filtrado se utilizan filtros de sintonizado simple, pasa bajas, pasa altas, pasa banda, o, rechaza banda. Los filtros tienen un orden determinado por el número de elementos reactivos que lo componen [22]. La Fig. 14 muestra los filtros pasivos de mayor uso. El filtro pasivo más común es el de sintonía simple, debido a su diseño sencillo y a su bajo costo [27].

La fuente de alimentación, la carga y el filtro, se conectan en paralelo, lo que proporciona una menor impedancia a la corriente armónica en la frecuencia de sintonía, de tal forma que las corrientes armónicas se desvíen por la ruta de menor impedancia a través del filtro [27].

El *diseño de un filtro de sintonía simple*, la selección adecuada del tamaño del condensador es muy importante desde el punto de vista del factor de potencia. La relación entre la reactancia capacitiva y la potencia reactiva, se expresa a través de la ecuación (13).

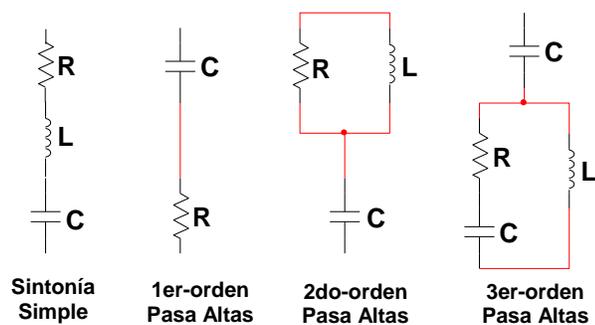


Fig.14. Configuración de filtros pasivos. Diseño de los autores.

$$Q_{\text{filtro}} = \frac{V_{\text{cap}}^2}{X_c} \quad (13)$$

En dónde,

Q_{filtro} , es la potencia reactiva, KVAR

V_{cap} , es el voltaje de línea en el capacitor, V
 X_c , es la reactancia capacitiva, Ω

Por su parte, el valor de la reactancia capacitiva está dado por la ecuación (14).

$$X_c = \frac{1}{2\pi f C} \quad (14)$$

En dónde,

f , es la frecuencia de trabajo, Hz
 C , es la capacitancia del capacitor, F

De la ecuación (14) el valor de la capacitancia en faradios se calcula como lo muestra la ecuación (15).

$$C = \frac{1}{2\pi f X_c} \quad (15)$$

Para las condiciones de resonancia deberían ocurrir cuando la reactancia capacitiva sea igual a la reactancia inductiva (ver ecuaciones (16) y (17)).

$$X_c = X_L \quad (16)$$

$$\frac{1}{2\pi f C} = 2\pi f L \quad (17)$$

En dónde,

X_c , es la reactancia capacitiva del capacitor, Ω
 X_L , es la reactancia inductiva del inductor, Ω
 C , es la capacitancia en el capacitor, F
 L , es la inductancia en el inductor, H

De forma que, el valor de la inductancia puede ser obtenido a través de la expresión (18).

$$L = \frac{1}{(2\pi f)^2 C} \quad (18)$$

Finalmente, la resistencia del filtro dependerá del factor de calidad (Q) que nos indica la pureza de sintonización, definido por la expresión (19) [27].

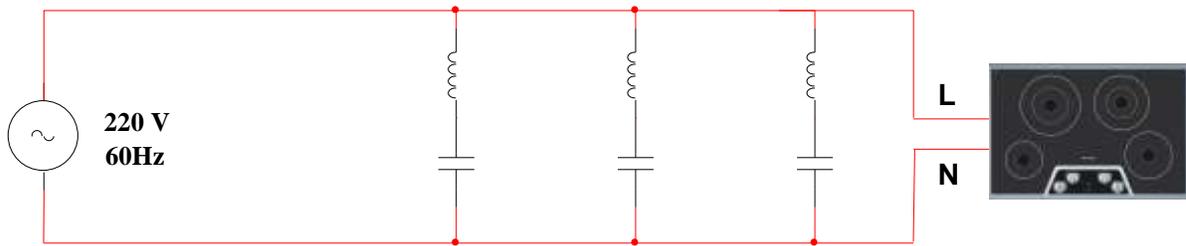
$$Q = \frac{\sqrt{L}}{R} \quad (19)$$

El valor de resistencia del filtro puede ser obtenido por la selección del factor de calidad de un rango entre $20 < Q < 100$ [27].

El *diseño de un filtro de segundo orden pasa altas* es similar al de un filtro de sintonía simple de segundo orden,

en el que un inductor y un resistor son conectados en paralelo, tal como lo muestra la Fig.3. Este tipo de filtro proporciona un buen rendimiento de filtrado, y disminuye las pérdidas de energía en la frecuencia fundamental [27]. La impedancia de este filtro está dada por la ecuación (11). Mientras que la frecuencia de corte se puede determinar mediante la ecuación (20). El factor de calidad típico para este filtro está entre 0,5 y 5 [27].

$$Z = \frac{1}{j\omega C} + \frac{1}{\left(\frac{1}{R} + \frac{1}{j\omega L}\right)} \quad (20)$$



Filtros de armónicos

Fig.15. Esquema general para filtrado pasivo de armónicos en una red bifásica de alimentación a CI. Diseño de los Autores.

Filtrado activo de armónicos

Los filtros activos contienen dispositivos tipo IGBT y circuitos electrónicos para su control. Los filtros activos minimizan los problemas de los filtros pasivos, ya que utilizan sistemas de compensación (o filtros activos de potencia FAP) para adaptarse a los cambios en la red eléctrica, el uso de componentes electrónicos hace que su implementación sea costosa y su diseño más complicado pero se ve reflejado en el desempeño en comparación con el filtrado pasivo.

Un FAP está conformado por convertidores estáticos de potencia conectados a un elemento de almacenamiento de energía en continua, y, por una etapa de control [29].

Los FAP se conectan en serie o paralelo con la carga no lineal (ver Fig.16). La configuración del convertidor del filtro activo depende del sistema en el cual está siendo empleado, y, se diferencian esquemas monofásico de una rama o medio puente, monofásico de dos ramas o de puente completo, trifásico de tres ramas, y, trifásico de cuatro ramas con conexión a neutro.

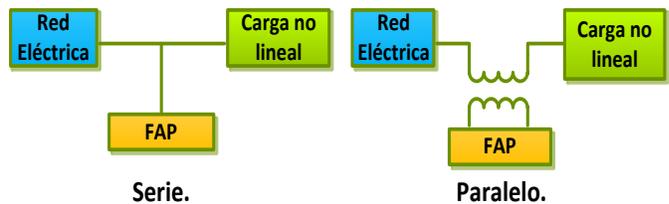


Fig.16. Conexión de un sistema de compensación tipo FAP con la red eléctrica, y con la carga no lineal. Diseño de los autores.

Mediante los algoritmos de control apropiados, los FAP actúan como fuentes de corriente o tensión, cancelan de forma instantánea los armónicos de ambos tipos, y, se autoadaptan a la variación de los mismos [24]. También pueden ser utilizados para la compensación total o parcial de energía reactiva, el equilibrado de corrientes de fase, y, la cancelación de la corriente de neutro [26].

El *filtrado activo paralelo* se utiliza para eliminar corriente armónica, compensar potencia reactiva; y, equilibrar corrientes desbalanceadas, inyectando corrientes de compensación [19].

El *filtrado activo serie* se utiliza para eliminar voltaje armónico, y, balancear y regular el voltaje en terminales de la línea.

Adicionalmente, se utilizan combinaciones de filtros activos serie y paralelo, conocidos como **filtros híbridos** [19].

IV. ESTADO DEL ARTE EN LA COMPENSACIÓN DE ENERGÍA REACTIVA EN COCINAS DE INDUCCIÓN

A. Respuesta en corriente alterna de los elementos básicos de un circuito eléctrico: resistor, inductor y capacitor

Respuesta en corriente alterna de un resistor

En un resistor, la frecuencia de la señal senoidal de voltaje o corriente, no afecta el valor de la resistencia. En un resistor trabajando en CA se cumple la Ley de Ohm [30] (ver ecuación 21).

$$i = \frac{v}{R} \quad (21)$$

En dónde,

- i , es la corriente que atraviesa el resistor, A
- v , es el voltaje aplicado, V
- R , es la resistencia en el resistor, Ω

En un elemento puramente resistivo, el voltaje y la corriente se encuentran en fase, es decir, sus valores pico máximos y mínimos coinciden en cualquier instante de tiempo (ver Fig.17).

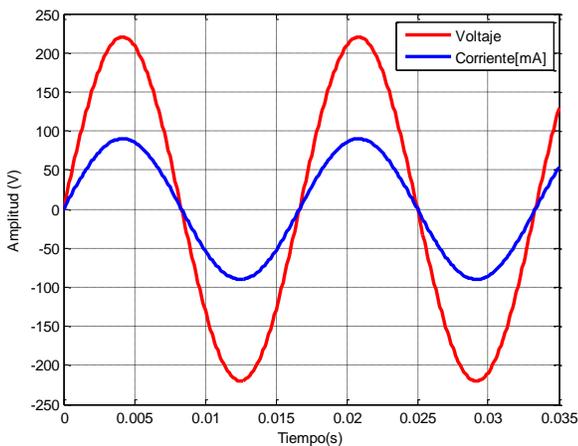


Fig.17. Señales de voltaje y corriente en un elemento puramente resistivo de un circuito de CA. Fuente: Autores.

Respuesta en corriente alterna de un inductor

Para una configuración en serie, entre una fuente de CA y un inductor (ver Fig.18), la caída de tensión en el elemento

($V_{elemento}$) se opone a la fuerza electromotriz de la fuente e . Por lo tanto, se reduce la magnitud de la corriente i . La oposición del elemento al flujo de carga (corriente i) determina la magnitud de caída de tensión a través del elemento.

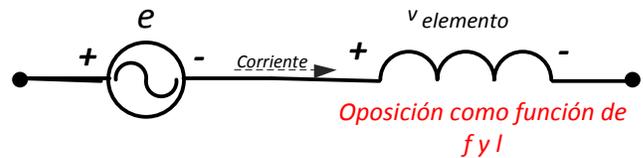


Fig.18. Parámetros que determinan la oposición de un elemento inductivo al flujo de carga. Fuente: Autores.

La caída de tensión en un inductor, es directamente proporcional a la velocidad de cambio de la corriente en la bobina (ver Fig.19). En consecuencia, entre más alta es la frecuencia, mayor será la velocidad de cambio de la corriente, y, mayor será la magnitud de la caída de tensión (ver ecuación 22).

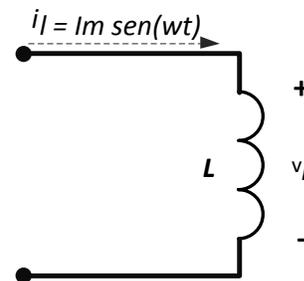


Fig.19. Respuesta senoidal de un elemento inductivo. Fuente: Autores

$$v_L = L \frac{di_L}{dt} \quad (22)$$

En dónde,

- v_L , es la caída de tensión en el inductor, V
- L , es la inductancia del inductor, H
- $\frac{di}{dt}$, es la velocidad de cambio de la carga y descarga en el inductor.

La Fig.20 muestra la forma de las ondas de voltaje y corriente para un elemento puramente inductivo, en el que el v_L se adelanta a i_L por 90° , o lo que es lo mismo, i_L se atrasa de v_L por 90° (ver ecuación 23).

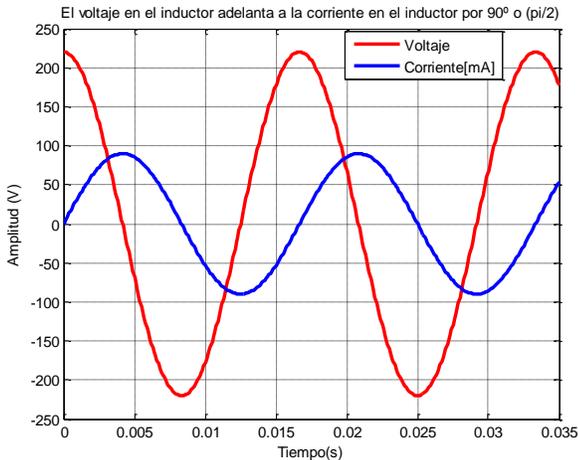


Fig.20. Señales de voltaje y corriente en un elemento puramente inductivo. Fuente: Autores

$$v_L = V_p \text{sen}(\omega t + 90^\circ) \quad (23)$$

En dónde,

- V_p , es el voltaje pico en el inductor, V
- ω , es la frecuencia angular, $\frac{\text{rad}}{\text{seg}}$
- t , es el periodo, s

La magnitud ωL , denominada como **reactancia de un inductor**, se representa simbólicamente como X_L , y se mide en Ohms. La reactancia inductiva es la oposición al flujo de corriente, la cual produce un intercambio continuo de energía entre la fuente y el campo magnético del inductor. En otras palabras la reactancia inductiva, a diferencia de la resistencia (la cual disipa energía en forma de calor), no disipa energía eléctrica (ignorando los efectos de la resistencia interna del inductor) [31].

A través de la Ley de Ohm, la reactancia inductiva se puede expresar como se muestra en la ecuación (24).

$$X_L = \frac{V_p}{I_p} \quad (24)$$

En dónde,

- X_L , es la reactancia del inductor, Ω
- V_p , es el voltaje pico en el inductor, V
- I_p , es la corriente pico en el inductor, A

Respuesta en corriente alterna de un capacitor

En una red capacitiva, el voltaje que atraviesa el capacitor está limitado por la velocidad a la que se deposita la carga (o se libera) en las placas del capacitor, durante las fases de carga y descarga respectivamente. En otras palabras, un cambio instantáneo en el voltaje a través del capacitor, se opone por el hecho de que hay un elemento de tiempo

requerido para depositar una carga (o liberarla) en las placas del capacitor (ver Fig.21).

Puesto que, la capacitancia es una medida de la velocidad a la que un capacitor almacenará una carga en sus placas, para un cambio particular en el voltaje a través del capacitor, entre más alto sea el valor de la capacitancia, mayor será la corriente capacitiva resultante. Además, entre más alta sea la velocidad de cambio del voltaje a través del capacitor, mayor será la corriente capacitiva [31] (ver ecuación 25).

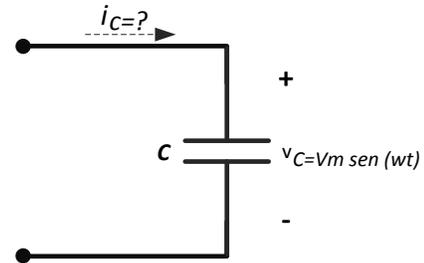


Fig.21. Respuesta senoidal de un elemento capacitivo. Fuente: Autores

$$i_C = C \frac{dv_C}{dt} \quad (25)$$

En dónde:

- i_C , es la corriente en el capacitor, A
- C , es la capacitancia del capacitor, F
- $\frac{dv}{dt}$, es la velocidad de cambio en la carga y descarga del capacitor.

La Fig.22 muestra la forma de las ondas de voltaje y corriente para un elemento puramente capacitivo, en dónde la i_C se adelanta a v_C por 90° , o v_C se atrasa de i_C por 90° , (ver ecuación 26).

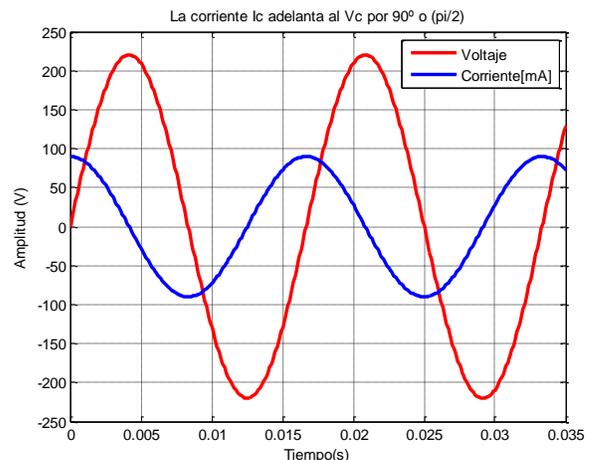


Fig.22. Señales de voltaje y corriente en un elemento puramente capacitivo. Fuente: Autores

$$i_C = I_p \sin(\omega t + 90^\circ) \quad (26)$$

En dónde,

I_p , es la corriente pico en el capacitor, A

La magnitud $1/\omega C$, se denomina **reactancia de un capacitor**, se representa simbólicamente mediante X_C , y, se mide en Ohms,

A través de la Ley de Ohm, la reactancia capacitiva se puede expresar como se muestra en la ecuación (27).

$$X_C = \frac{V_p}{I_p} \quad (27)$$

En dónde,

X_C , es la reactancia del capacitor, Ω

V_p , es el voltaje pico en el capacitor, V

I_p , es la corriente pico en el capacitor, A

Respuesta en corriente alterna de una red mixta

Si la corriente se retrasa al voltaje aplicado, la red es predominante inductiva. Si la corriente se adelanta al voltaje aplicado, la red es predominante capacitiva. Si la corriente y el voltaje están en fase, la red es puramente resistiva.

Triángulo de potencias

Para cualquier sistema, como el que se muestra en la Fig.23, la potencia proporcionada a una carga, en cualquier instante, se define como el producto del voltaje aplicado y la corriente resultante (ver ecuación 28).

$$p = vi \quad (28)$$

En dónde:

p , es la potencia disipada en el elemento, W

v , es el voltaje en el elemento, V

i , es la corriente en el elemento, A

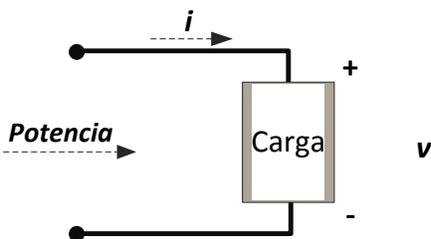


Fig.23. Representación de la potencia entregada a una carga. Fuente: Autores

En el caso de sistemas eléctricos de corriente alterna, se habla de 3 formas de potencia: activa, reactiva, y, aparente o total.

La **potencia activa (P)** en el circuito, se transforma en otras formas de energía como lumínica, térmica, mecánica, etc. La potencia activa entrega al circuito energía que se transforma en trabajo útil.

La **potencia reactiva (Q)** se disipa en las cargas no lineales inductivas o capacitivas. Esta potencia fluctúa por la red, entre el generador y la carga, pero no se transforma en trabajo útil, aunque es necesaria para el funcionamiento de los sistemas.

En el sentido vectorial, en un sistema de coordenadas, la potencia activa se puede representar sobre el eje x, mientras que la reactiva se imputa al eje y; como resultado, se forma un triángulo rectángulo. La magnitud de la hipotenusa del triángulo resultante se denomina **potencia aparente (S)** (ver ecuación 29).

$$S = P + Q \quad (29)$$

En dónde,

S , es la potencia aparente, VA

P , es la potencia activa, W

Q , es la potencia reactiva, VAR

Para una carga inductiva, el fasor de potencia S se define mediante la ecuación (30), y, se presenta tal como lo muestra la Fig.24.

$$S = P + jQ_L \quad (30)$$

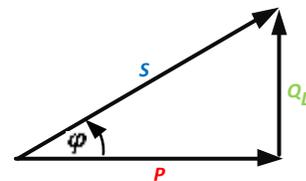


Fig.24. Diagrama de potencias para las cargas inductivas. Fuente: Autores

En dónde,

P , es la potencia activa en el inductor, W

Q_L , es la potencia reactiva en el inductor, VAR

Para una carga capacitiva, el fasor de potencia S se define mediante la ecuación (31), y se presenta tal como lo muestra la Fig.25.

$$S = P - jQ_C \quad (31)$$

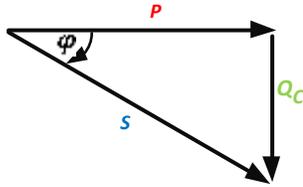


Fig.25. Diagrama de potencias para las cargas capacitivas.
Fuente: Autores

Si una red tiene elementos tanto inductivos como capacitivos, el componente reactivo del triángulo de potencia se determinará mediante la diferencia entre la potencia reactiva proporcional a cada uno.

Potencia en una carga resistiva

Para una red de CA, el voltaje y la corriente se expresan como lo muestran las ecuaciones (32) y (33), respectivamente. Consecuentemente, la potencia instantánea se define a través de la expresión (34).

$$v = V_p \text{sen}(\omega t + \theta) \quad (32)$$

$$i = I_p \text{sen}(\omega t + \theta) \quad (33)$$

$$p = V_p I_p \text{sen}(\omega t) \text{sen}(\omega t + \varphi) \quad (34)$$

Aplicando algunas identidades trigonométrica [31], la potencia instantánea puede expresarse como lo muestra la ecuación (35).

$$p = V_p I_p \cos\varphi (1 - \cos 2\omega t) + V_p I_p \text{sen}\varphi (\text{sen} 2\omega t) \quad (35)$$

Para un circuito puramente resistivo, v e i están en fase, y φ es igual a 0. Entonces, la potencia puede expresarse como lo muestra las ecuaciones (36) y (37).

$$P_R = V_p I_p (1 - \cos 2\omega t) + 0 \quad (36)$$

$$P_R = V_p I_p - V_p I_p \cos 2\omega t \quad (37)$$

En dónde, $V_p I_p$ es el promedio o el término de CD, mientras que $V_p I_p \cos 2\omega t$ corresponde a una onda coseno negativa, con el doble de frecuencia que la señal de entrada, y, un valor pico de $V_p I_p$ [3]. La Fig.26 muestra la gráfica de la señal de potencia, en la que se aprecia que los valores pico y promedio de la curva están siempre sobre el eje horizontal. Esto indica que la potencia total proporcionada a un resistor se disipará en forma de calor.

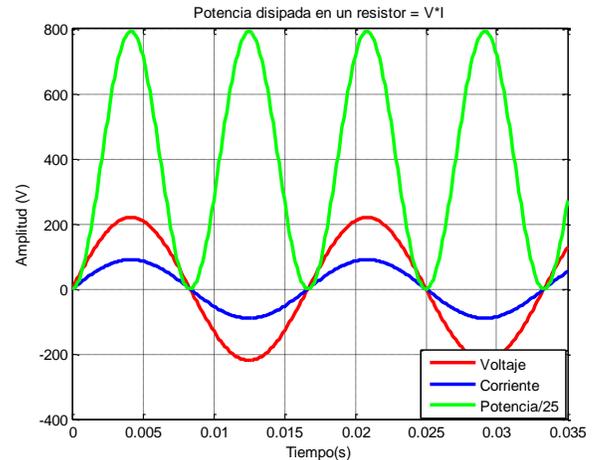


Fig.26. Señal de potencia en una carga puramente resistiva de un circuito CA. Fuente: Autores.

Potencia en una carga inductiva

En un circuito puramente inductivo, el voltaje adelanta a la corriente (ver Fig.11), con un ángulo φ de 90° . Entonces, la potencia puede expresarse como lo muestra la ecuación (38).

$$P_L = 0 + V_p I_p \text{sen} 2\omega t \quad (38)$$

La potencia en el inductor corresponde a una onda senoidal, cuya frecuencia es el doble de la señal de entrada, y, con un valor pico de $V_p I_p$ [32]. La Fig.27 muestra la forma de esta señal. Durante un ciclo completo, la potencia entregada por la fuente al inductor (ciclo positivo) es igual a la devuelta a la fuente por el inductor (ciclo negativo). El generador se obligado a “prestar” cierta cantidad de energía al circuito inductivo, consciente de que esta no será aprovechada, produciendo más energía para suplir la demanda.

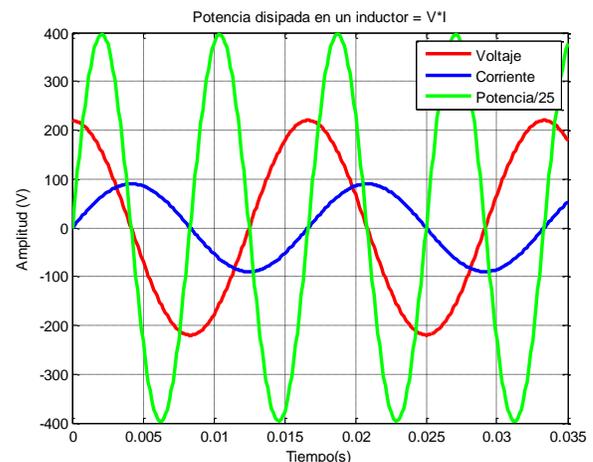


Fig.27. Señal de potencia en una carga puramente inductiva de un circuito de CA. Fuente: Autores.

$$Q = V_p I_p \quad (42)$$

Desde la perspectiva del triángulo de potencias, la potencia en el inductor es reactiva (ver ecuaciones 39 y 40).

$$Q = V_p I_p \text{sen}\varphi \quad (39)$$

En dónde,

Q , es la potencia reactiva, VAR
 V_p , es el voltaje pico, V
 I_p , es la corriente pico, A
 φ , es el ángulo de fase entre el voltaje y la intensidad.

$$Q_L = I_p^2 X_L \quad (40)$$

En dónde,

Q_L , es la potencia reactiva, VAR
 I_p^2 , es la corriente pico, A

Potencia en una carga capacitiva

En un circuito puramente capacitivo, la corriente se adelanta al voltaje en 90° (ver Fig.12), por lo que la potencia puede ser expresada como lo muestra la ecuación (41).

$$P_C = 0 - V_p I_p \text{sen}2\omega t \quad (41)$$

En la Fig.28 se muestra que la potencia entregada por la fuente al capacitor, es exactamente igual a la que el capacitor devuelve a la fuente durante un ciclo completo.

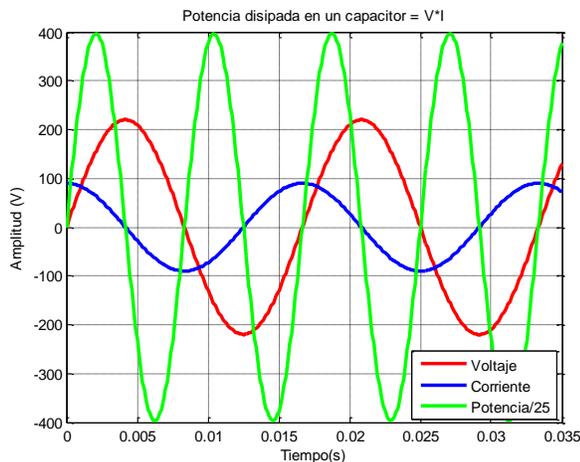


Fig.28. Señal de potencia en una carga puramente capacitiva de un circuito de CA. Fuente: Autores.

La potencia reactiva asociada con el capacitor se puede expresar a través de las ecuaciones (42) y (43).

En dónde,

Q , es la potencia reactiva, VAR
 V_p , es el voltaje pico, V
 I_p , es la corriente pico, A

$$Q_C = I_p^2 X_C \quad (43)$$

En dónde,

Q_C , es la potencia reactiva en el capacitor, VAR
 I_p^2 , es la corriente pico, A

B. Corrección del factor de potencia en cocinas de inducción

Generalidades de la corrección del factor de potencia

El diseño de cualquier sistema de transmisión de potencia es sensible a la magnitud de la corriente en las líneas. Las corrientes incrementadas producen mayores pérdidas de potencia, por un factor al cuadrado (ver ecuación 44). Por otra parte, para una mayor corriente se requiere de cables de mayor diámetro, lo que impacta en el costo de implementación del sistema.

$$P = I_p^2 R \quad (44)$$

La corriente de suministro es mínima, cuando la potencia activa es igual a la potencia aparente, y, por lo tanto la potencia reactiva es igual a cero. En este caso, $\cos\varphi$ se aproxima a la unidad, y, la red se comporta como una red resistiva.

El proceso de introducir en el circuito, elementos reactivos para acercar el factor de potencia a la unidad, se denomina **corrección del factor de potencia**. Debido a que, la mayoría de las cargas son inductivas, el proceso normalmente implica introducir elementos con características capacitivas.

Durante la compensación, se puede originar sobrecompensaciones o subcompensaciones.

La potencia reactiva de las cargas inductivas se compensa con la conexión, en paralelo, de capacitancias. Existen dos tipos de compensación: fija y dinámica.

En la **compensación fija**, se suministra al sistema, de manera constante, la misma potencia reactiva. En la **compensación dinámica** se suministra la potencia reactiva requerida según la demanda.

Por otra parte, la compensación puede ser individual, en grupo, o centralizada.

En la **compensación individual** a cada consumidor inductivo se le asigna el condensador necesario. Esta compensación se utiliza en grandes consumidores de trabajo continuo (ver Fig.29) [32].

En la **compensación en grupos**, se agrupa a consumidores de igual potencia y régimen temporal de trabajo, compensando la energía reactiva por medio de un único condensador común. Este tipo de compensación se utiliza, por ejemplo, para compensar un grupo de lámparas fluorescentes (ver Fig.29) [32].

En la **compensación central**, la potencia reactiva de varios consumidores, de diferentes potencias y regímenes temporales de trabajo, se compensa por medio de un banco de condensadores (ver Fig.29) [32].

La potencia requerida en el banco de condensadores, se puede encontrar mediante las ecuaciones (45), y (46).

$$Q_C = P * (\tan(\cos^{-1}\varphi_1) - \tan(\cos^{-1}\varphi_2)) \quad (45)$$

$$Q_C = P * K \quad (46)$$

En dónde,

- Q_C , es la potencia reactiva requerida en el banco, VAR
- P , es la potencia activa en el sistema, W
- φ_1 , es el valor de phi antes de la corrección
- φ_2 , es el valor de phi deseado
- K , es el factor K de compensación

El factor K de compensación se obtiene a partir del $\cos\varphi$ actual y deseado en el sistema, utilizando tablas como las que se muestra en la Tabla 2 [32].

Compensación de armónicos y circuito expreso de cocinas de inducción

En un trabajo anterior se explicó que las CI utilizan principalmente 2 topologías de inversores resonantes (IR): el IR de medio puente, y, el inversor cuasi-resonante. Los IR forman parte de la etapa de potencia, y se encargan de generar oscilaciones de alta frecuencia. Los IR están conformados por una bobina inductiva, un capacitor resonante, y, una resistencia

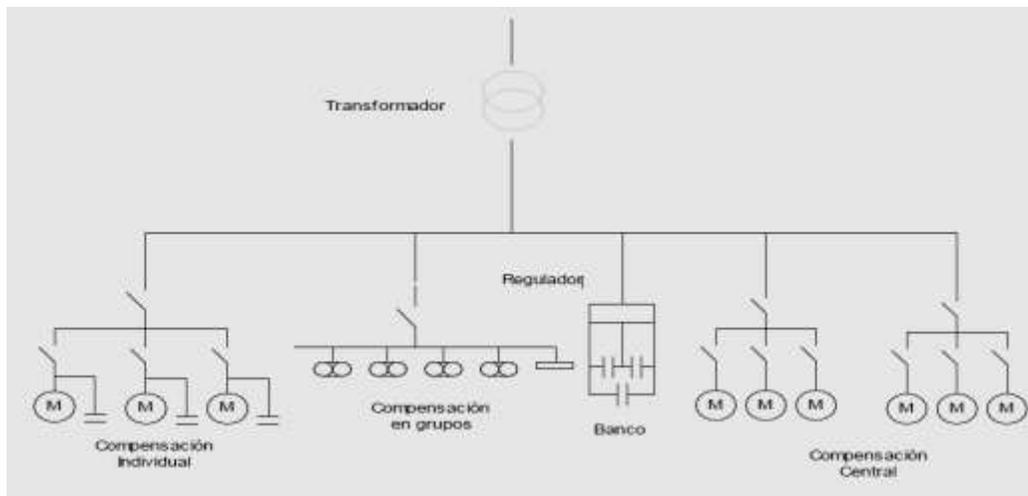


Fig.29. Compensación de energía reactiva de acuerdo al tipo de conexión. [32]

Tabla 2
Valores del factor "K" más usuales [33]

FP antes de compensar		Factor de potencia después de compensar											
		$\cos\varphi$	0,8	0,84	0,88	0,9	0,92	0,95	0,96	0,97	0,98	0,99	1
$\cos\varphi$	$\text{tg}\varphi$	$\text{tg}\varphi$	0,75	0,646	0,54	0,484	0,43	0,329	0,292	0,251	0,203	0,142	0
0,400	2,291		1,541	1,645	1,752	1,807	1,865	1,963	2	2,041	2,088	2,149	2,291
0,430	2,100		1,35	1,454	1,56	1,615	1,674	1,771	1,808	1,849	1,897	1,957	2,1
0,460	1,930		1,18	1,284	1,391	1,446	1,504	1,602	1,639	1,68	1,727	1,788	1,93
0,490	1,779		1,029	1,133	1,239	1,295	1,353	1,45	1,487	1,528	1,576	1,637	1,779
0,520	1,643		0,893	0,997	1,103	1,158	1,217	1,314	1,351	1,392	1,44	1,5	1,643
0,550	1,518		0,768	0,873	0,979	1,034	1,092	1,19	1,227	1,268	1,315	1,376	1,518
0,580	1,405		0,655	0,759	0,865	0,92	0,979	1,076	1,113	1,154	1,201	1,262	1,405
0,610	1,299		0,549	0,653	0,759	0,815	0,873	0,97	1,007	1,048	1,096	1,157	1,299
0,640	1,201		0,451	0,555	0,661	0,716	0,775	0,872	0,909	0,95	0,998	1,058	1,201
0,670	1,108		0,358	0,462	0,568	0,624	0,682	0,779	0,816	0,857	0,905	0,966	1,108
0,700	1,020		0,27	0,374	0,48	0,536	0,594	0,692	0,729	0,77	0,817	0,878	1,02
0,730	0,936		0,186	0,29	0,396	0,452	0,51	0,608	0,645	0,686	0,733	0,794	0,936
0,760	0,855		0,105	0,209	0,315	0,371	0,429	0,526	0,563	0,605	0,652	0,713	0,855
0,790	0,776		0,026	0,13	0,236	0,292	0,35	0,447	0,484	0,525	0,573	0,634	0,776
0,800	0,750		-	0,104	0,21	0,266	0,324	0,421	0,458	0,499	0,547	0,608	0,75
0,810	0,724		-	0,078	0,184	0,24	0,298	0,395	0,432	0,473	0,521	0,581	0,724
0,820	0,698		-	0,052	0,158	0,214	0,272	0,369	0,406	0,447	0,495	0,556	0,698
0,830	0,672		-	0,026	0,132	0,188	0,246	0,343	0,38	0,421	0,469	0,53	0,672
0,840	0,646		-	-	0,106	0,162	0,22	0,317	0,354	0,395	0,443	0,503	0,646
0,850	0,620		-	-	0,08	0,135	0,194	0,291	0,328	0,369	0,417	0,477	0,62
0,860	0,593		-	-	0,054	0,109	0,167	0,265	0,302	0,343	0,39	0,451	0,593
0,870	0,567		-	-	0,027	0,082	0,141	0,238	0,275	0,316	0,364	0,424	0,567
0,880	0,540		-	-	-	0,055	0,114	0,211	0,248	0,289	0,337	0,397	0,54
0,890	0,512		-	-	-	0,028	0,086	0,184	0,221	0,262	0,309	0,37	0,512
0,900	0,484		-	-	-	-	0,058	0,156	0,193	0,234	0,281	0,342	0,484
0,910	0,456		-	-	-	-	0,03	0,127	0,164	0,205	0,253	0,313	0,456
0,920	0,426		-	-	-	-	-	0,097	0,134	0,175	0,223	0,284	0,426
0,930	0,395		-	-	-	-	-	0,067	0,104	0,145	0,192	0,253	0,395
0,940	0,363		-	-	-	-	-	0,034	0,071	0,112	0,16	0,22	0,363
0,950	0,329		-	-	-	-	-	-	0,037	0,078	0,126	0,186	0,329
0,960	0,292		-	-	-	-	-	-	-	0,041	0,089	0,149	0,292
0,970	0,251		-	-	-	-	-	-	-	-	0,048	0,108	0,251
0,980	0,203		-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,061	0,203
0,990	0,142		-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,142

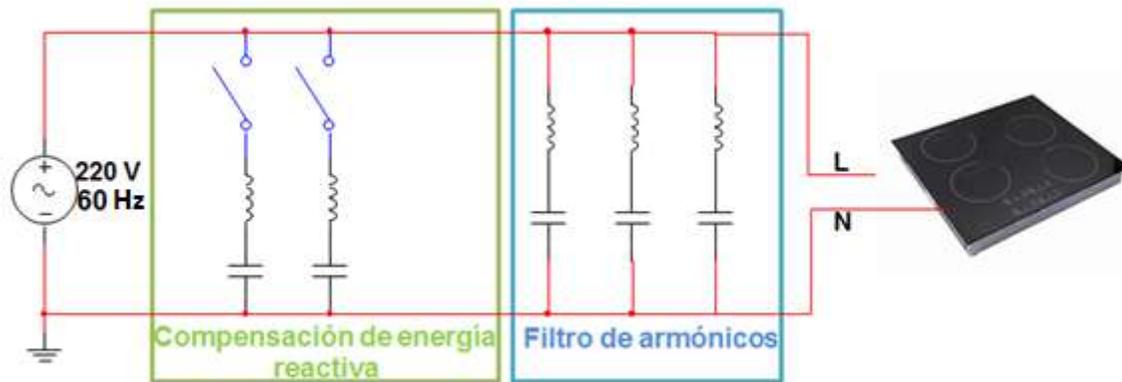


Fig.30. Esquema general de compensación pasiva de energía reactiva y de armónicos en una red bifásica de alimentación a CI. Diseño de los Autores.

Si la carga del IR es resistiva pura, la tensión y la corriente serán señales cuadradas, y, el factor de potencia de salida será igual a 1. Cuando a la carga se añade una componente inductiva (carga serie RL), se afecta el factor de potencia, y, para compensarlo se requiere la conexión de un componente reactivo adecuado [34], generalmente un condensador conectado en serie (circuito resonante serie RLC).

En resumen, las cocinas de inducción, para la compensación de energía eléctrica reactiva, y, la eliminación de armónicos, utilizan arreglos de bancos de condensadores, con inductores en serie de protección, y, filtros L-C de armónicos en conexión fija a la red (ver Fig.30).

La compensación del factor de potencia se realiza para cada fase, en función de la metodología explicada en el apartado anterior.

V. COMPENSACIÓN DE ARMÓNICOS Y ENERGÍA REACTIVA EN COCINAS DE INDUCCIÓN Y ALIMENTADORES, UTILIZANDO FILTROS ACTIVOS Y PASIVOS

A. Planeación de la evaluación de desempeño de los filtros en la compensación de armónicos y de energía reactiva en ci y alimentadores

Consideraciones generales

En el informe presentado por el Ministerio de Electricidad y Energía Renovable (MEER) del Ecuador, en relación a la sustitución de las cocinas de gas licuado de petróleo por CI [35], se señala que los principales armónicos generados por las CI, a nivel de transformador, son los impares, siendo los más representativos el 3^{ro}, 5^{to}, 7^{mo}, 9^{no}, y, 11^{ro}. También se explica que en ningún caso se supera el 10% de distorsión de voltaje, cumpliendo con las normas técnicas emitidas por el Consejo Nacional de Electricidad (CONELEC).

En [36], se indica que la distorsión armónica total (total harmonic distortion-THD) de corriente en una CI, es mayor que la THD de voltaje. En [37] se afirma que, los armónicos en la onda de corriente que más afectan, son el 3^{ro} y el 5^{to}, mientras que el resto de armónicos disminuyen de magnitud al aumentar su orden. La Tabla 3 muestra la frecuencia del armónico, su orden, y la magnitud máxima que puede alcanzar con respecto a la fundamental [38].

Tabla 3
Frecuencia del armónico, orden y magnitud [6].

Frecuencia	Orden del armónico	Magnitud
60	Fundamental	1.000
180	3	0.333
300	5	0.200
420	7	0.143
660	11	0.091
780	13	0.077

En este contexto, se requiere identificar un esquema de filtro pasivo y/o activo que permita reducir los armónicos de mayor magnitud en la onda de corriente, provocados por las CI. Para cumplir con el objetivo propuesto, se plantea desarrollar modelos matemáticos del funcionamiento de filtros pasivos y/o activos conectados a cargas no lineales, generadoras de armónicos 3^{ro}, 5^{to} y 7^{mo}, con una determinada potencia reactiva (fenómeno típico de una carga no lineal).

Identificación de escenarios de compensación

Usualmente, el problema de armónicos se trata desde los síntomas y no desde el origen, por lo que se adopta una serie de medidas que aumentan la tolerancia del sistema a los armónicos; o, se modifica circuitos y sistemas para reducir el impacto, atrapar, o bloquear los armónicos con filtros [38].

La utilización de filtros pasivos para armónicos en sistemas de potencia, tienen dos objetivos: servir de sumidero para las corrientes y tensiones armónicas, y/o proveer al sistema de toda o parte de la potencia reactiva que se necesita. Sin embargo, la mala ubicación y un diseño no adecuado de filtros puede empeorar la situación [38].

En la bibliografía [38] se identifica dos escenarios para ubicar un filtro pasivo para armónicos (ver Fig. 31): cerca de la carga no lineal en circuitos de baja tensión (para evitar la inyección de armónicos de corriente al sistema por parte de la carga), y, en el alimentador de media tensión (para disminuir las pérdidas del sistema).

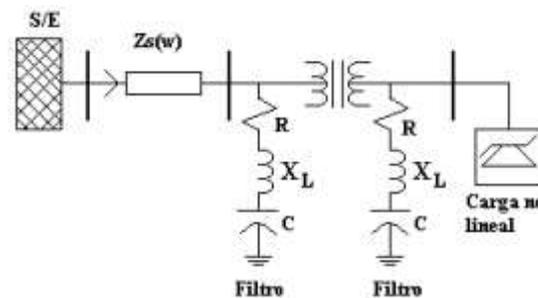


Fig. 31. Escenarios de ubicación de filtros pasivos para armónicos [38]

Con un filtrado pasivo se puede compensar total o parcialmente la energía reactiva en el sistema, a través de las capacitancias del filtro. Sin embargo es necesario considerar los riesgos de sobrecompensación o

subcompensación descritos en trabajos anteriores. Por otra parte, la resonancia en paralelo con capacitores y reactores para compensación del factor de potencia, puede originar resonancias que producen corrientes o voltajes excesivos, que afectan al sistema [38].

En este contexto, el equipo de trabajo decidió explorar la compensación con filtros pasivos en 2 escenarios de ubicación: en paralelo cerca de la carga no lineal que representa una CI (para compensar armónicos de la onda de corriente), y, en paralelo a un alimentador de media tensión. Adicionalmente, considerando que de acuerdo a la bibliografía [39] los filtros activos son óptimos para aplicaciones con gran variación de carga o un amplio espectro de armónicos a compensar, para efectos comparativos se decidió indagar el desempeño de un filtro activo en un alimentador de media tensión.

B. Evaluación de desempeño de los filtros en la compensación de armónicos y de energía reactiva en ci y alimentadores

Evaluación del desempeño de un filtro pasivo conectado en paralelo cerca de una carga no lineal como la CI

La Tabla 4 resume las variables a considerar en la construcción del modelo matemático en este escenario. La generación de los armónicos 3^{ro}, 5^{to} y 7^{mo}, se hará a la mitad de su máxima magnitud.

Tabla 4

Variables a considerar para la evaluación del desempeño de un filtro pasivo conectado en paralelo cerca de una carga no lineal como la CI. [Diseño de autores]

V, voltaje de la red, Vrms	220
F, frecuencia de la red, Hz	60
P, potencia activa de la carga, W	7200
Q, demanda de potencia reactiva inductiva, VAR	1720
L _{LF} , inductancia de la línea fuente, H	0,0013

El voltaje y la frecuencia corresponden a los de una red típica en Ecuador para instalación de CI. La potencia activa

se obtuvo del catálogo de una CI existente en el mercado local, identificada con el grupo de alta demanda de energía [40]. La potencia reactiva se calculó utilizando las expresiones (47), (48), (49). La inductancia de la línea fuente se calculó aplicando la expresión (50).

$$P_i = \frac{P_o}{\eta} \quad (47)$$

En dónde,

P_i, es la potencia de línea, W
P_o, es la potencia de la carga, W
η, es la eficiencia de la carga, 85 %

$$\varphi = \cos^{-1}F_p \quad (48)$$

En dónde,

φ, es el ángulo phi, °
F_p, es el factor de potencia de la carga, 0,98

$$Q_L = P_i \tan \varphi \quad (49)$$

En dónde,

Q_L, es la potencia reactiva inductiva, VAR
P_i, es la potencia de línea, W
φ, es el ángulo phi, °

$$L_{LF} = \frac{X_{LF}}{2\pi f} \quad (50)$$

En dónde,

L_{LF}, es la inductancia de la línea fuente, H
X_{LF}, es la impedancia de la línea, 0,50 Ω
f, es la frecuencia de la red, Hz

La Fig.32 muestra el modelo en Simulink para la evaluación del desempeño del filtro en este escenario. Se utilizará tres filtros de sintonía simple, resonando a la frecuencia de los armónicos a compensar. Para dimensionar los filtros de sintonía simple, se determina secuencialmente la capacitancia, la inductancia, y, finalmente la resistencia.

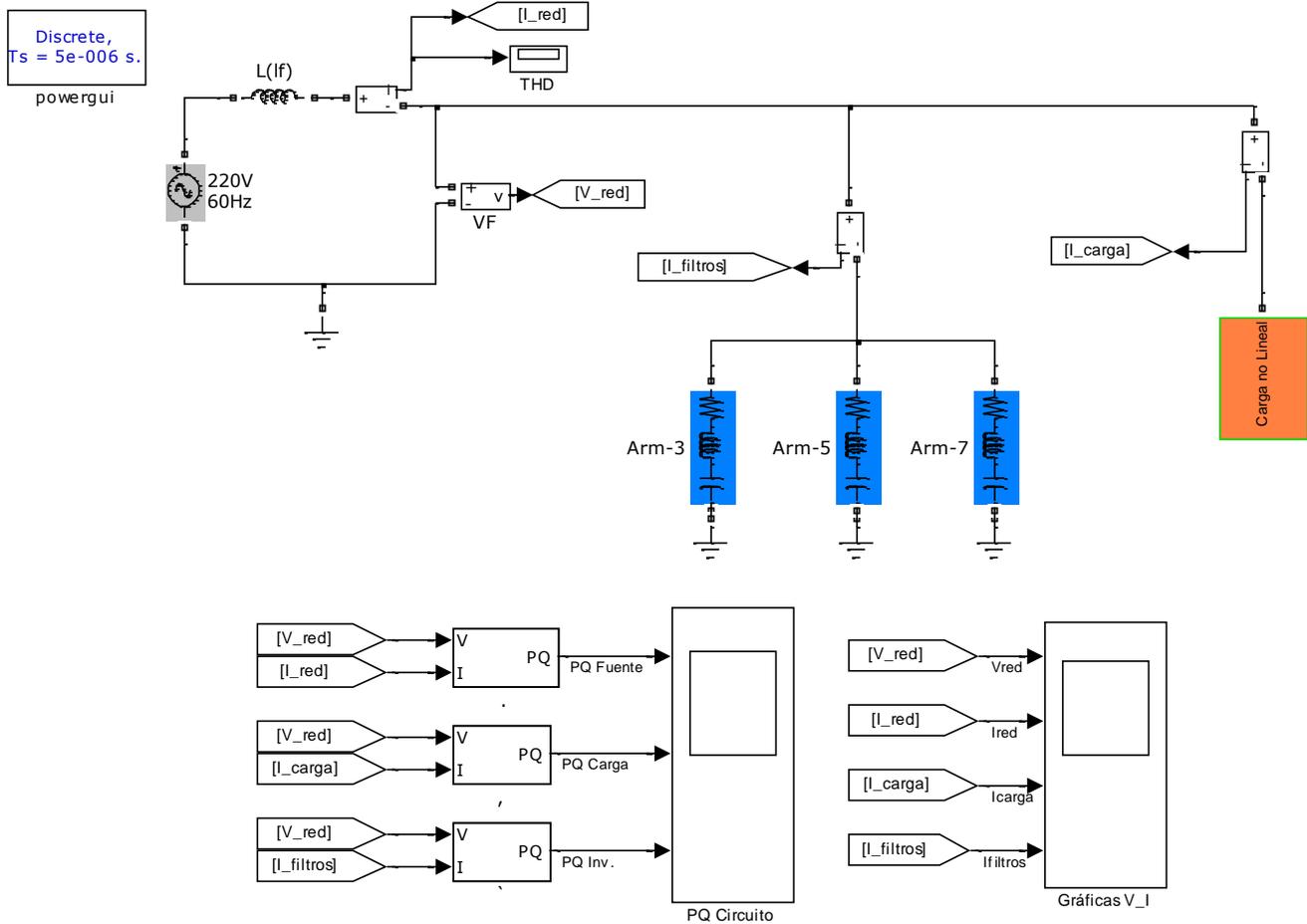


Fig. 32 Modelo en Simulink para evaluación del desempeño de un filtro pasivo monofásico (220V, 60Hz) conectado en paralelo a una CI. [Diseño de autores]

La capacitancia de los filtros se determina mediante la ecuación (51). La capacitancia calculada, se divide entre el número de filtros que se instalará en paralelo con la carga no lineal. La tabla 5 muestra los resultados obtenidos.

$$C = \frac{Q_{(kVAR)} * 1000}{2\pi f * V^2} \quad (51)$$

En dónde,

C, es la capacitancia de compensación, F
 $Q_{(kVAR)}$, es la potencia reactiva demanda por la carga, kVAR

f, es la frecuencia de la red, Hz
V, es el voltaje de la red, V

Tabla 5.

Valores de diseño del filtro pasivo monofásico. [Diseño de autores]

C, F	L, H	R, Ω
$C_{Arm3} = 31,43e - 6$	$L_{Arm3} = 24,87e - 3$	$R_{Arm3} = 0,28$

$C_{Arm5} = 31,43e - 6$	$L_{Arm5} = 8,95e - 3$	$R_{Arm5} = 0,17$
$C_{Arm7} = 31,43e - 6$	$L_{Arm7} = 4,57 - 3$	$R_{Arm7} = 0,12$

La inductancia en cada filtro de sintonía simple, se encuentra a través de la ecuación (52) (ver Tabla 3).

$$L_f = \frac{1}{(2\pi f_s)^2 C_f} \quad (52)$$

En dónde,

L_f , es la inductancia requerida en cada filtro, H
 f_s , es la frecuencia de sintonía del filtro, Hz
 C_f , es la capacitancia de cada filtro, F

La resistencia en cada filtro de sintonía simple se define por la expresión (53) (ver Tabla 3). Considerando que el factor de calidad del filtro (Q), determina la forma de la característica de impedancia, y hace que ésta sea más o menos estrecha o abrupta, se decidió utilizar un Q de 100 [38], que presenta una mejor pureza de sintonizado en los armónicos a eliminar.

$$R_f = \frac{\sqrt{L_f}}{C_f} \quad (53)$$

En dónde,

- R_f , es la resistencia requerida en cada filtro, Ω
- L_f , es la inductancia requerida en cada filtro, H
- C_f , es la capacitancia de cada filtro, F
- Q , es el índice para la pureza de sintonización, $20 \geq Q \leq 100$

Una vez construido el modelo, los resultados se obtuvieron empleando recursos de Simulink, como el análisis rápido de Fourier (FFT). Se determinó que la THD de corriente antes de instalar el filtro era del 19,49% (ver Fig. 33), y, que se redujo al 3,05% una vez que el filtro estuvo operativo (ver Fig. 34). Este valor corresponde a la norma IEEE (519) para el control de armónicos, que establece que el límite superior del THD de corriente es del 5% [41].

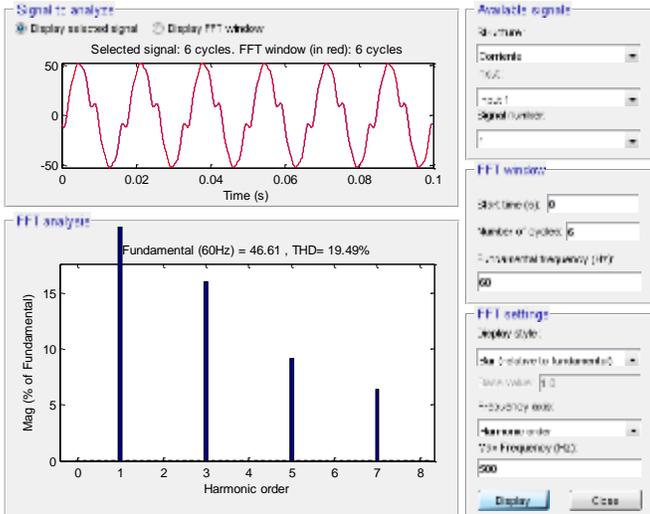


Fig. 33 Pantalla de Simulink que muestra la THD de corriente sin el filtro pasivo monofásico conectado a la CI. [Autores]

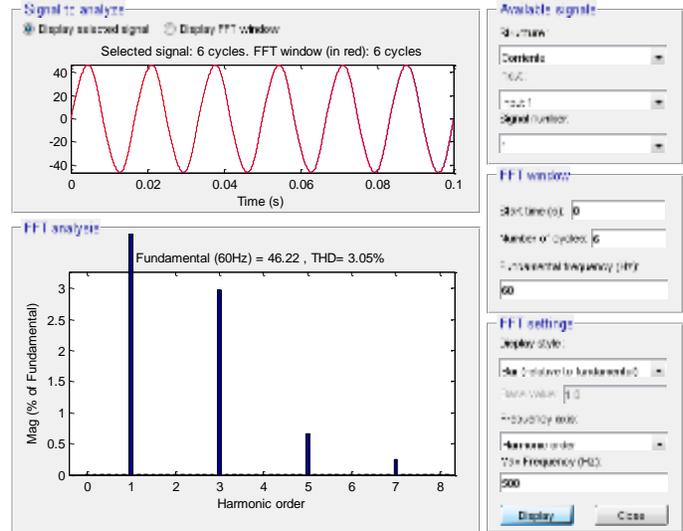


Fig.34 Pantalla de Simulink que muestra la THD de corriente con el filtro pasivo monofásico conectado a la CI. [Autores]

La Fig. 35 muestra las formas de onda de la potencia activa (rojo) y reactiva (azul) en la red (fuente), en la carga (CI), y la compensación de potencia reactiva desde los filtros. Se concluye que los filtros operan correctamente, puesto que la potencia reactiva en la red es prácticamente nula.

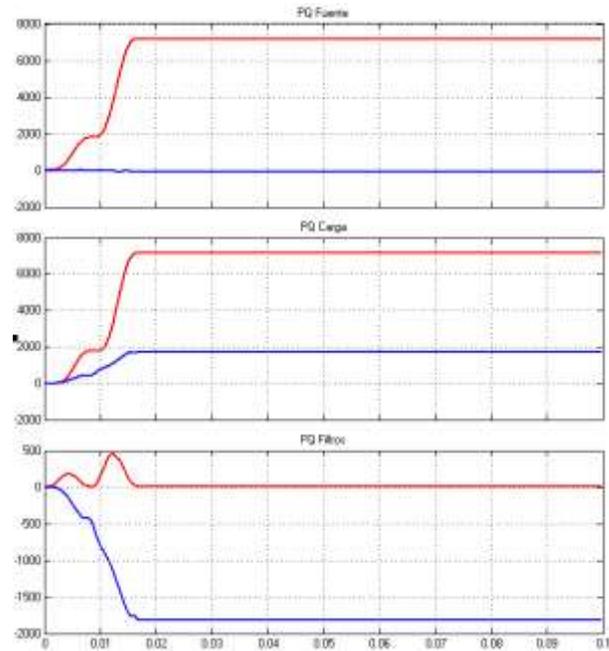


Fig. 35 Formas de onda de la potencia activa y reactiva en la red (Pq Fuente), en la carga (PQ Carga); y, compensación de potencia reactiva en los filtros (PQ Comp). [Autores]

La Fig. 36 muestra las formas de onda del voltaje y corriente en la red, la corriente en la carga, y, la corriente de compensación. Los resultados muestran que a pesar de que la corriente de la carga se distorsiona, el funcionamiento de

los filtros devuelve a la red una corriente libre de armónicos.

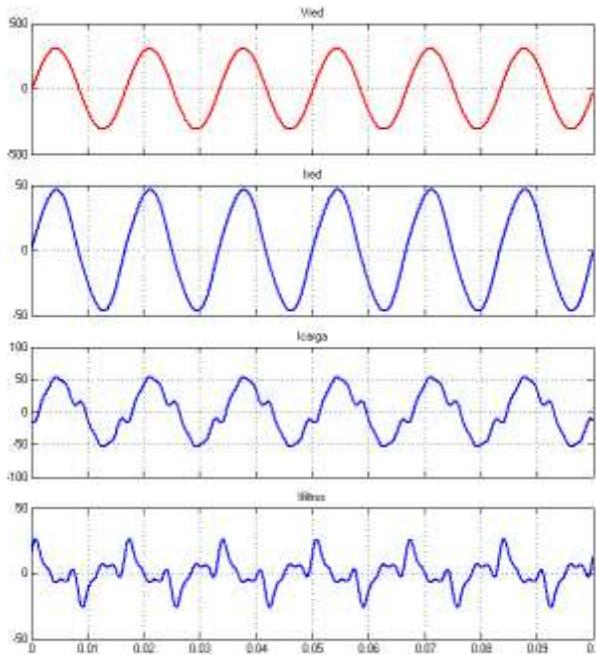


Fig. 36 Formas de onda del voltaje y corriente en la red, corriente en la carga, y, corriente de compensación del filtro. [Autores]

Evaluación del desempeño de un filtro pasivo trifásico en paralelo con un alimentador de media tensión

Las variables a considerar en la construcción del modelo matemático en este escenario, se muestran en la Tabla 6.

Tabla 6.

Variables a considerar para la evaluación del desempeño de un filtro pasivo trifásico conectado en paralelo con un alimentador de media tensión. [Diseño de autores]

V, voltaje de la red, kVrms	13,8
F, frecuencia de la red, Hz	60
P, potencia activa de la carga, MVA	6,41
Q, demanda de potencia reactiva inductiva, MVAR	1,8
L _{LF} , inductancia de la línea fuente, H	0,0013

El voltaje y la frecuencia corresponden al suministro de energía en la ciudad de Loja, desde la Subestación Eléctrica (S/E) Sur. La potencia activa corresponde a la proyección de demanda de energía por el uso masivo de CI y calefones eléctricos hasta el año 2016, justificada en la bibliografía [42]. La demanda de potencia reactiva inductiva se calculó aplicando la expresión (54).

$$Q_L = VI * \text{sen}\varphi \quad (54)$$

En dónde,

Q_L, es la potencia reactiva inductiva, VAR

V, es el voltaje en la red, Vrms
 I, es la corriente en la red, A
 φ, es el ángulo phi (16,26), °

La inductancia línea fuente se calculó aplicando la expresión (50), instalando un inductor por cada fase.

El diseño de filtros pasivos trifásicos es similar al diseño de filtros pasivos monofásicos, pero se diferencia en que en cada fase se instala un filtro. La Tabla 7 muestra los valores calculados para los elementos de los filtros pasivos a utilizar en este escenario.

El uso de transformadores trifásicos con conexión adecuada ayuda a reducir armónicos. Un transformador con conexión delta - estrella atrapa las armónicas múltiplos de 3 (3^{ro}, 6^{to}, 9^{no}, etc) [36]. En este contexto y, considerando la naturaleza de la carga a conectar en la red, se plantea compensar los armónicos 5^{to}, 7^{mo}, 11^{ro}, 13^{ro}, y, 17^{mo}, generados a un cuarto de su máxima magnitud. Para compensar los cuatro primeros armónicos, se utilizará filtros de sintonía simple. Para compensar el armónico 17^{mo} se empleará un filtro pasa altas de segundo orden, cuyo capacitor e inductor se calculan de la misma forma que en los filtros de sintonía simple, mientras que el valor de la resistencia se calcula mediante las expresiones (55) y (56). El índice de pureza de sintonización se eligió en 5 considerando las recomendaciones de la bibliografía [43].

Tabla 7.

Valores de diseño del filtro pasivo trifásico. [Diseño de autores]

C,F	L,H	R,Ω
C _{Arm5} = 5,01e - 6	L _{Arm5} = 56,18e - 3	R _{Arm5} = 1,06
C _{Arm7} = 5,01e - 6	L _{Arm7} = 28,66e - 3	R _{Arm7} = 0,76
C _{Arm11} = 5,01e - 6	L _{Arm11} = 11,61e - 3	R _{Arm11} = 0,48
C _{Arm13} = 5,01e - 6	L _{Arm13} = 8,31e - 3	R _{Arm13} = 0,41
C _{Arm17} = 5,01e - 6	L _{Arm17} = 4,86e - 3	R _{Arm17} = 155

$$X_C = \frac{1}{2\pi f_s C_f} \quad (55)$$

En dónde,

X_C, es la reactancia capacitiva, Ω
 f_s, es la frecuencia de sintonía del filtro, Hz
 C_f, es la capacitancia de cada filtro, F

$$R = X_C * Q \quad (56)$$

En dónde,

R, es la resistencia del filtros pasa altas de segundo orden, Ω
 X_C, es la reactancia capacitiva, Ω
 Q, es el índice para la pureza de sintonización, 2 ≥ Q ≤ 5

En la Fig. 37 se muestra el modelo en Simulink para la evaluación del filtro en este escenario.

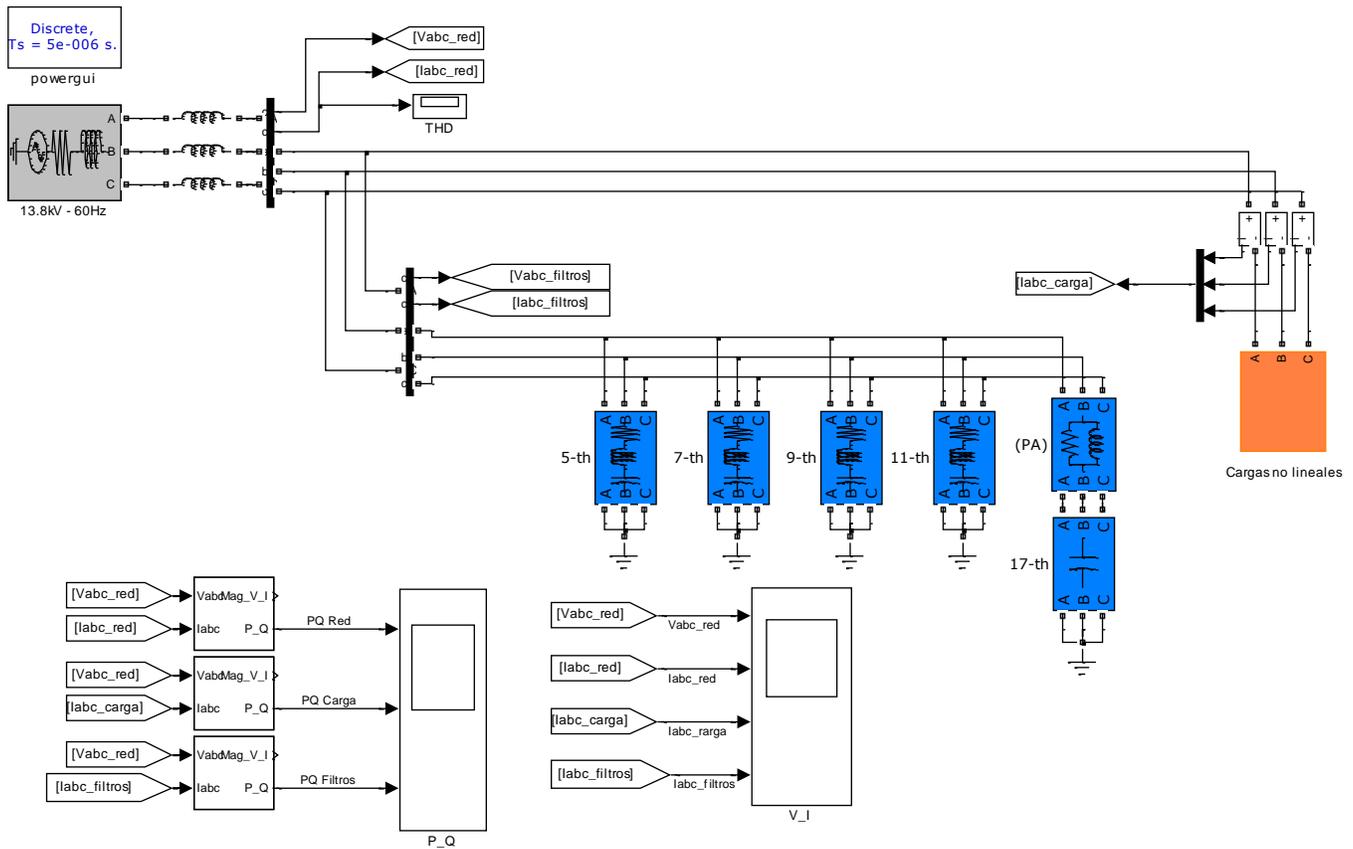


Fig. 37. Modelo en Simulink para evaluación del desempeño de un filtro pasivo trifásico (13.8kV, 60Hz) conectado en paralelo a un alimentador de media tensión. [Diseño de autores]

Los resultados obtenidos en la simulación del funcionamiento del modelo, muestran que la THD de corriente antes de instalar el filtro era del 11,42% (ver Fig.38), y, que se redujo al 3,75% una vez que el filtro estuvo operativo (ver Fig. 39). Este valor corresponde a la norma IEEE (519) para el control de armónicos, que establece que el límite superior del THD de corriente es del 5%.

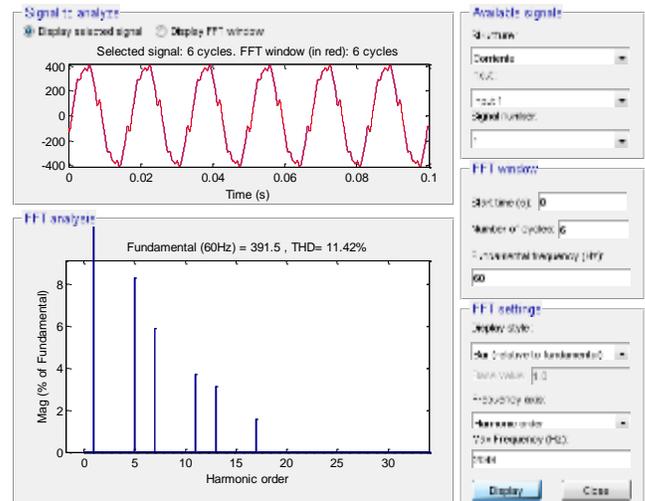


Fig. 38 Pantalla de Simulink que muestra la THD de corriente sin el filtro pasivo trifásico conectado al alimentador. [Autores]

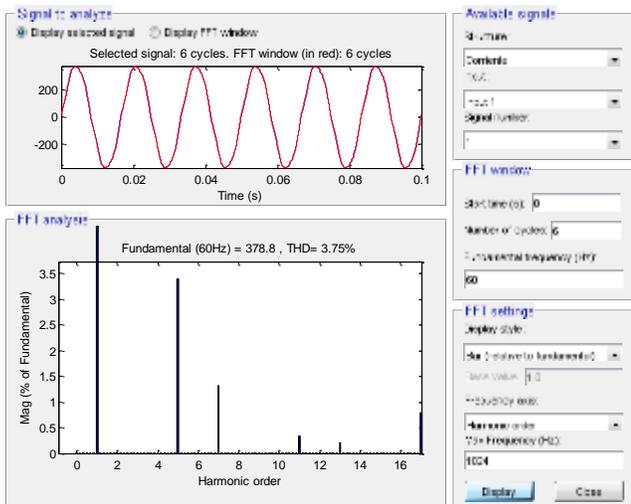


Fig. 39 Pantalla de Simulink que muestra la THD de corriente con el filtro pasivo trifásico conectado al alimentador. [Autores]

La Fig.40 muestra las formas de onda de la potencia activa (rojo) y reactiva (azul) en la red (fuente), en las cargas no lineales, y la compensación de potencia reactiva desde los filtros. Se concluye que los filtros operan correctamente, puesto que la potencia reactiva en la red es prácticamente nula.

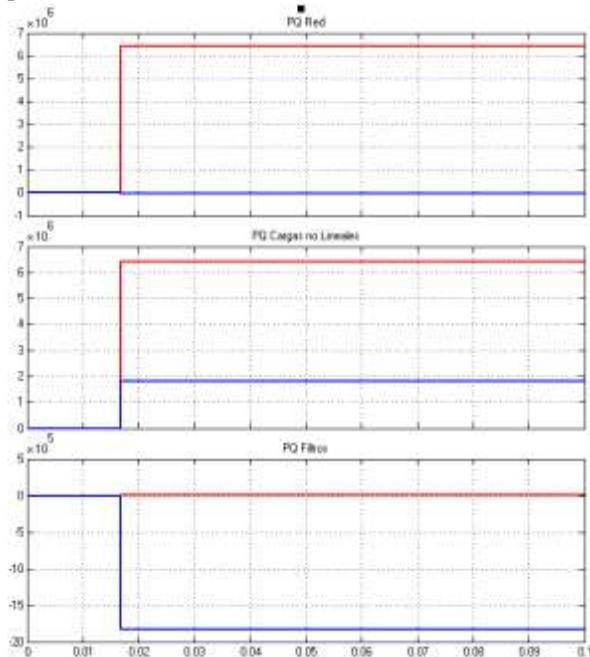


Fig. 40 Formas de onda de la potencia activa y reactiva en la red (PQ Fuente), en las cargas no lineales (PQ Cargas no Lineales); y, compensación de potencia reactiva de los filtros (PQ Filtros). [Autores]

La Fig.41 muestra las formas de onda del voltaje y corriente en la red, la corriente en la carga, y la corriente de compensación; de las tres fases. Los resultados muestran

que a pesar de que la corriente de la carga se distorsiona, el funcionamiento de los filtros devuelve a la red una corriente libre de armónicos que se asemeja a una senoidal pura.

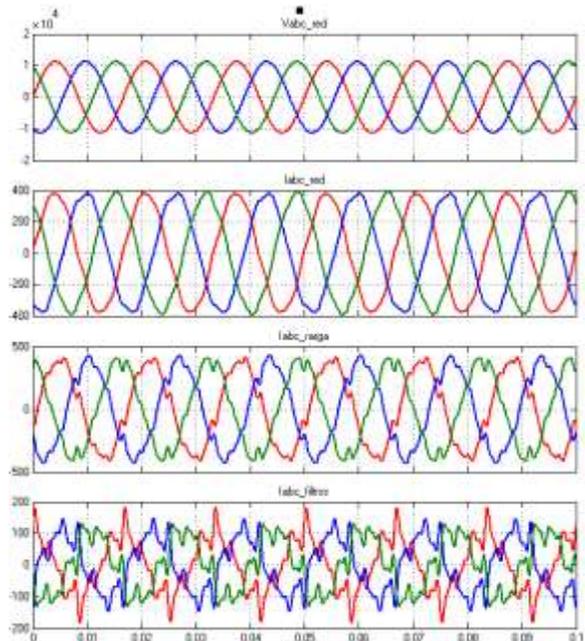


Fig. 41 Formas de onda de voltajes y corrientes en la red, corrientes en la carga, y, corrientes de los filtros. [Autores]

Evaluación del desempeño de un filtro activo tipo shunt trifásico, conectado en paralelo a un alimentador de media tensión

El principio de operación de un filtro activo conectado en paralelo, se basa en la inyección de la corriente armónica y de la corriente reactiva requerida por la carga. De esta forma, el sistema de potencia sólo aporta la componente fundamental de corriente, en fase con la respectiva tensión fase neutro [36].

Un filtro activo se forma principalmente de dos etapas: potencia y control. La etapa de potencia se encarga de suministrar las corrientes de compensación, mientras que la etapa de control dispara el IGBT que proporciona la energía de compensación a la carga.

El escenario de compensación coincide con el definido para estudiar el comportamiento de los filtros pasivos trifásicos. La Fig.42 muestra el modelo en Simulink, utilizado para la evaluación del filtro activo trifásico.

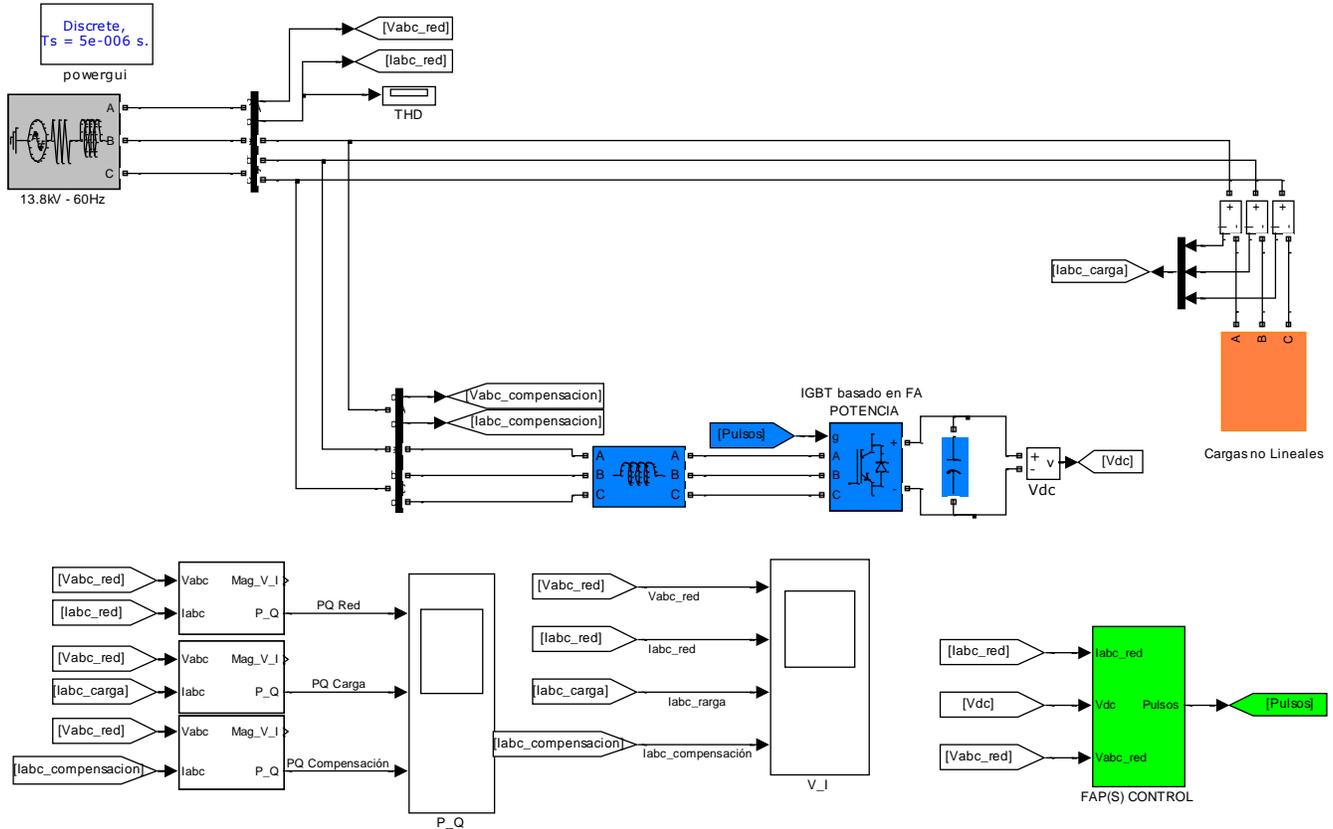


Fig. 42 Modelo en Simulink para evaluación del desempeño de un filtro activo trifásico (13.8kV, 60Hz) conectado en paralelo a un alimentador de media tensión. [Diseño de autores]

Los resultados obtenidos en la simulación del funcionamiento del modelo, muestran que la THD de corriente antes de instalar el filtro era del 11,42% (ver Fig.38), y, que se redujo al 2,54% una vez que el filtro activo estuvo operativo (ver Fig. 43). En comparación, con el filtro pasivo trifásico, la THD de corriente se redujo solo al 3,75%.

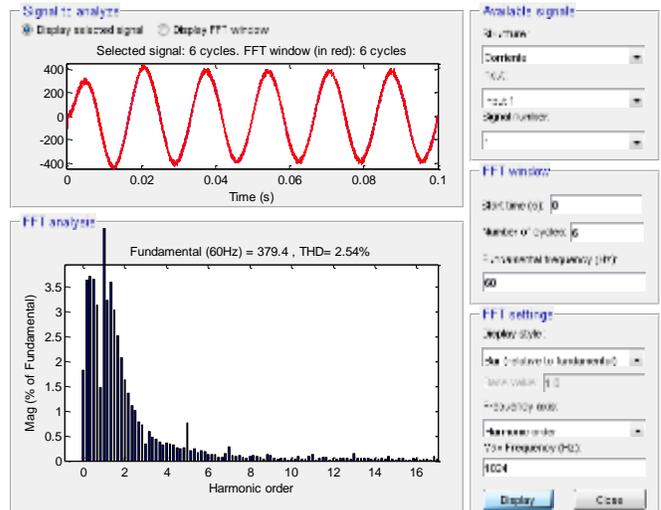


Fig. 43 Pantalla de Simulink que muestra la THD de corriente con el filtro activo trifásico conectado al alimentador. [Autores]

La Fig.44 muestra las formas de onda de la potencia activa (rojo) y reactiva (azul) en la red (fuente), en las cargas no lineales, y la compensación de potencia reactiva

desde del filtro activo. Se concluye que luego del filtrado activo, la potencia reactiva en la red es prácticamente nula.

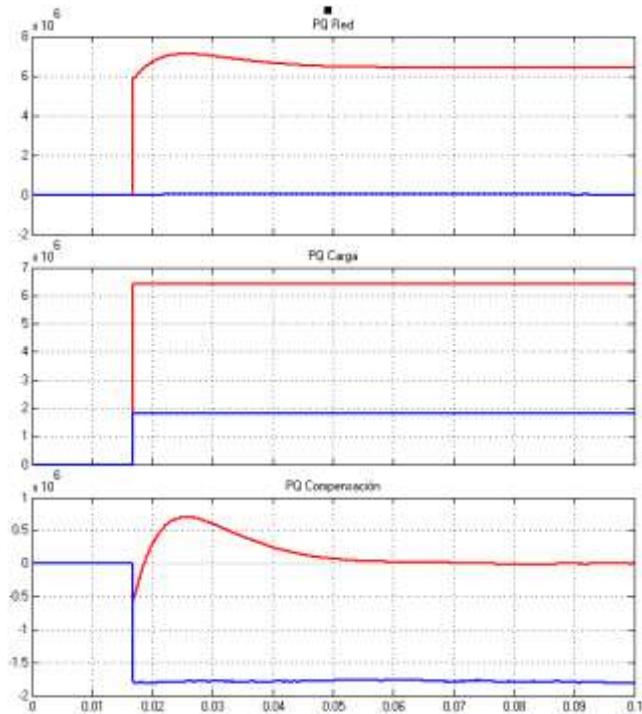


Fig. 44 Formas de onda de la potencia activa y reactiva en la red (PQ Fuente), en las cargas no lineales (PQ Cargas no Lineales); y, compensación de potencia reactiva del filtro activo (PQ Compensación). [Autores]

La Fig.45 muestra las formas de onda de voltaje y corriente en la red, la corriente en la carga, y, la corriente de compensación (en las tres fases). Los resultados muestran que, a pesar de que la corriente de la carga se distorsiona, el funcionamiento de los filtros devuelve a la red una corriente libre de armónicos, que se asemeja a una senoidal pura.

C. A manera de conclusión.

El empleo de filtros demostró ser una estrategia válida para la compensación de armónicos y factor de potencia en las instalaciones que albergan CI.

Se comprobó que el uso de filtros pasivos monofásicos es efectivo para compensar los problemas generados por la CI de manera local, mientras que los filtros activos trifásicos mostraron su alto desempeño compensando los problemas causados por las CI a nivel de un alimentador. El uso de uno o de otro tipo de filtro dependerá de si la compensación es responsabilidad del propietario de la CI, o si se trata del problema a nivel del proveedor local de energía eléctrica.

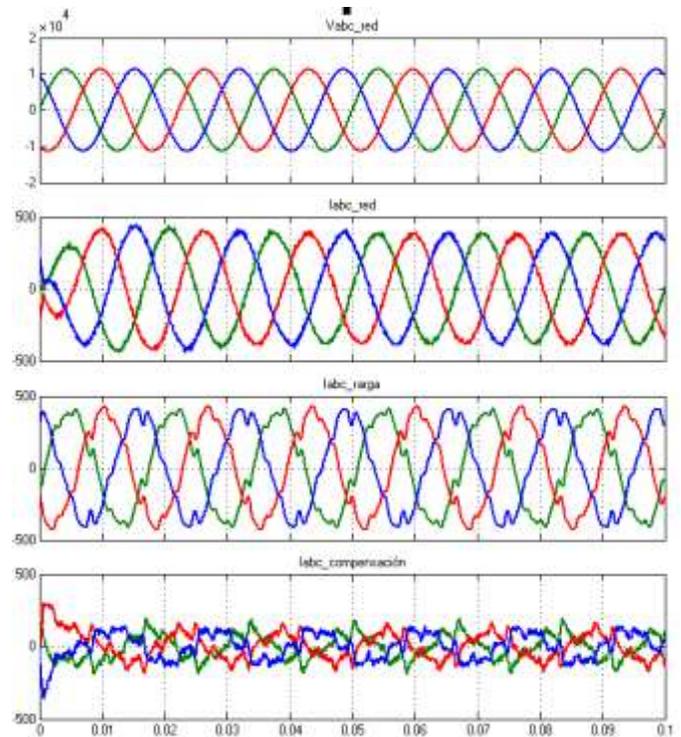


Fig. 45 Formas de onda de voltajes y corrientes en la red, corrientes en la carga, y, corrientes de compensación. [Autores]

VI. CONCLUSIONES

- El calentamiento por inducción genera calentamiento resistivo en un recipiente, en función de la corriente de Eddy que se forma en la superficie, cuando el recipiente se ubica dentro del campo magnético generado por la bobina de una CI.
- Para el bloque de inversor de alta frecuencia de una CI, el esquema más utilizado es el del inversor cuasi-resonante, debido a su bajo costo de producción en masa, aunque sus indicadores de eficiencia no sean altos.
- El creciente uso de cargas no lineales en la red eléctrica, obliga a utilizar métodos de compensación de armónicos, y, de bajo factor de potencia, entre otros.
- En una cocina de inducción, la afectación mayor al factor de potencia puede provenir del IR, razón por la cual los fabricantes adoptan las medidas compensatorias que se corresponden con la teoría general de compensación del factor de potencia, utilizando filtros.
- En este trabajo se ha presentado la simulación de filtrado pasivo en paralelo con una carga no lineal (CI), antes de instalar el filtro la THD de corriente era de 19,49%, una vez instalado el filtro la THD se redujo al 3,05% cumpliendo

con el estándar IEEE 519 de la recomendación para el control de armónicos.

- En filtrado pasivo trifásico la THD de corriente antes de instalar los filtros alcanzó un valor de 11.42%, con el filtrado pasivo trifásico se redujo a 3,75%, de la misma manera con filtrado activo trifásico disminuyó a 2,54% dando un mejor resultado; en ambos casos se cumple con el estándar IEEE 519.
- El empleo de filtros demostró ser una estrategia válida para la compensación de armónicos y factor de potencia en las instalaciones que albergan CI. Se comprobó que el uso de filtros pasivos monofásicos es efectivo para compensar los problemas generados por la CI de manera local, mientras que los filtros activos trifásicos mostraron su alto desempeño compensando los problemas causados por las CI a nivel de un alimentador. El uso de uno o de otro tipo de filtro dependerá de si la compensación es responsabilidad del propietario de la CI, o si se trata el problema a nivel del proveedor local de energía eléctrica.

VII. REFERENCIAS

- [1] Salazar Masson, J. “Estudio técnico-comparativo para la introducción de cocinas eléctricas de inducción magnética en el Ecuador”. [Online]. Disponible en: <http://bibdigital.epn.edu.ec/bitstream/15000/2165/1/CD-2931.pdf>
- [2] GOBIERNO DE ARAGON. “Tecnologías electrónicas aplicadas a cocción por inducción”. [Online]. Disponible en: <http://www.aragoninvestiga.org/Tecnologias-electronicas-aplicadas-a-coccion-por-induccion/>
- [3] SIMULINK. “Simulation and Model-Based Design”. [Online]. Disponible en: <http://www.mathworks.com/products/simulink/>
- [4] MATLAB. “The Language of Technical Computing”. [Online]. Disponible en: <http://www.mathworks.com/products/matlab/>
- [5] FAIRCHILD Semiconductor. “AN-9012 Induction heating system topology review”. [Online]. Disponible en: <https://www.fairchildsemi.com/application-notes/AN/AN-9012.pdf>
- [6] ON Semiconductor. “Induction Cooking - Everything you need to know”. [Online]. Disponible en: http://www.onsemi.com/pub_link/Collateral/AND9166-D.PDF
- [7] Gómez, V. “Influencia de los Componentes Parásitos en el Análisis y Diseño de Inversores Resonantes Paralelo para Aplicaciones de Calentamiento por Inducción”. [Online]. Disponible en: <http://www.uv.es/~vesteveg/Tesis.pdf>
- [8] Montaña Méndez, N. Mesías Fernández, D. “Diseño de una planta Ensambladora de Cocinetas a Inducción Magnética”. [Online]. Disponible en: http://www.cib.espol.edu.ec/Digipath/D_Tesis_PDF/D-94194.pdf
- [9] TDK EPCOS. “Components for induction in the cookers”. [Online]. Disponible en: <http://www.epcos.com/epcos-en/373562/tech-library/articles/applications---cases/applications---cases/energy-efficiency-in-the-kitchen-/171866>
- [10] No se reconoce el autor. “Filtros EMI-EMC”. [Online]. Disponible en: <http://www.wavecontrol-emc.com/es/136132/-/Filtros-EMI-EMC.htm>
- [11] No se reconoce el autor. “Ecuador Cambia”. [Online]. Disponible en: <http://www.ecuadorcambia.com/>
- [12] MIPRO, MEER. “Convocatoria para la presentación de expresiones de interés y calificación de proveedores de cocinas de inducción para el programa cocción eficiente”. [Online]. Disponible en: <http://www.industrias.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2014/04/PCE-Concurso-cocinas.pdf>
- [13] Cushicóndor Collaguazo, E. Tito Saráuz, D. “DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN PROTOTIPO DE UNA COCINA DE INDUCCIÓN ELECTROMAGNÉTICA”. [Online]. Disponible en: <http://bibdigital.epn.edu.ec/bitstream/15000/1113/1/CD-2596.pdf>
- [14] No se reconoce el autor. “Conmutación Suave”. [Online]. Disponible en: http://catarina.udlap.mx/u_dl_a/tales/documentos/lem/juarez_h_ii/capitulo5.pdf
- [15] Aragonés Boix, O. “Estudio y modelización en régimen permanente de cargas no lineales para el análisis armónico de redes eléctricas”. [Online]. Disponible en: <http://www.tdx.cat/bitstream/handle/10803/6291/01Oba01de10.pdf?sequence=1>
- [16] Noroña Lucero, N. “DIAGNOSTICO DE PERTURBACIONES ARMÓNICAS EN EL SISTEMA NACIONAL INTERCONECTADO”. [Online]. Disponible en: <http://bibdigital.epn.edu.ec/bitstream/15000/3791/1/CD-3509.pdf>
- [17] MEER, MIPRO, “CONVOCATORIA PARA LAPRESENTACIÓN DE EXPRESIONES DE INTERÉS Y CALIFICACIÓN DE PROVEEDORES DE COCINAS DE INDUCCIÓN PARA EL PROGRAMA COCCIÓN EFICIENTE”. [Online]. Disponible en: <http://www.industrias.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2014/04/PCE-Concurso-cocinas.pdf>
- [18] Pavas A. “Calidad del Suministro de la Energía Eléctrica” [Online]. Disponible en: <http://empresas.micodensa.com/BancoMedios/Documentos%20PDF/calidad-de%20energ%C3%ADa-24-11-2011.pdf>
- [19] Bueno Muñoz, H. Fajardo Muzo, M. “DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN FILTRO ACTIVO PARA LA ELIMINACIÓN DE ARMÓNICOS EN UNA RED BIFÁSICA RESIDENCIAL”. [Online]. Disponible en: <http://dspace.ups.edu.ec/handle/123456789/5145>
- [20] Asqui Santillán, G. Velasco Molina, L. “ANÁLISIS RESIDENCIAL DE ARMÓNICOS PARA USUARIOS TIPO A (PLAN PILOTO) DE LA CIUDAD DE LATACUNGA Y DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE FILTROS ATENUADORES”. [Online]. Disponible en: <http://repositorio.espe.edu.ec/bitstream/21000/4996/1/T-ESPEL-%200745.pdf> Asqui Santillán, G. Velasco Molina, L. “ANÁLISIS RESIDENCIAL DE ARMÓNICOS PARA USUARIOS TIPO A (PLAN PILOTO) DE LA CIUDAD DE LATACUNGA Y DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE FILTROS ATENUADORES”. [Online]. Disponible en:

- <http://repositorio.espe.edu.ec/bitstream/21000/4996/1/T-ESPEL-%200745.pdf>
- [21] Sharmistha Bhattacharyya, J. Wil Kling. Sjeff Cobben and Jasper van Casteren “Harmonic Current Interaction at a Low Voltage Customer’s Installation” [Online]. Disponible en: <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=5318859>
- [22] Mora Barajas, M. Bañuelos Sánchez P. “Contaminación armónica producida por cargas no lineales de baja potencia: modelo matemático y casos prácticos”. [Online]. Disponible en: <http://www.ejournal.unam.mx/ict/vol1102/ICT001100206.pdf>
- [23] Ministerio de Electricidad y Energía Renovable. “Programa de eficiencia energética para cocción por inducción y calentamiento de agua con electricidad en sustitución del gas licuado de petróleo (GLP) en el sector residencial” [Online]. Disponible en: <http://www.energia.gob.ec/programa-de-eficiencia-energetica-para-coccion-por-induccion-y-calentamiento-de-agua-con-electricidad-en-sustitucion-del-gas-licuado-de-petroleo-glp-en-el-sector-reside/>
- [24] Téllez Ramírez, E. “DISTORSION ARMONICA”. [Online]. Disponible en: <http://watergymex.org/contenidos/rtecnicos/Optimizando%20la%20Operacion%20y%20el%20Mantenimiento/Distorsion%20Armonica.pdf>
- [25] Sagredo Gonzáles, J. Abad San Martin. Gonzalez de la Viuda Javier. “Influencia de armónicos en el factor de potencia de una instalación eléctrica y en su compensación”. [Online]. Disponible en: <https://es.scribd.com/doc/212714021/Influencia-De-Armonicos-En-El-Factor-De-Potencia-De-Una-Instalacion-Elctrica-Y-En-Su-Compensacio>
- [26] Román Lumbreras, M. “FILTROS ACTIVOS DE POTENCIA PARA LA COMPENSACIÓN INSTANTANEA DE ARMÓNICOS Y ENERGÍA REACTIVA”. [Online]. Disponible en: <http://www.tdx.cat/bitstream/handle/10803/6306/01Mrl01de01.pdf?sequence=1>
- [27] Ahmed Memon, Z. Aslam Uquaili, M. Ali Unar, M. “Harmonics Mitigation of Industrial Power System Using Passive Filters”. [Online]. Disponible en: https://www.google.com.ec/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=1&cad=rja&uact=8&ved=0CCIQFjAA&url=http%3A%2F%2Fwww.researchgate.net%2Fprofile%2FMukhtiar_Unar%2Fpublication%2F259483983_Harmonics_Mitigation_of_Industrial_Power_System_Using_Passive_Filters%2Flinks%2F02e7e53c586161200c000000&ei=8U9-VOPxFoSoNvzXgvAF&usq=AFQjCNHyZ6_IGlIm6UwXz1U_bPDwXFiPtZg&bvm=bv.80642063.d.eXY
- [28] Ramírez Giraldo, J. Bedoya Salazar, A. “DISEÑO Y SIMULACION DE UN SISTEMA DE FILTRO ACTIVO HIBRIDO PARA LA SUPRESION DE ARMONICOS EN UN SISTEMA DE CONVERSION AC/DC” “. [Online]. Disponible en: <http://repositorio.utp.edu.co/dspace/bitstream/11059/1705/1/62138223R173.pdf>
- [29] Aragonés Boix, O. “Estudio y modelización en régimen permanente de cargas no lineales para el análisis armónico de redes eléctricas”. [Online]. Disponible en: <http://www.tdx.cat/bitstream/handle/10803/6291/01Oba01de10.pdf?sequence=1>
- [30] Electrical Construction & Maintenance. “FACTOR DE POTENCIA”. [Online]. Disponible en: <http://www.ruelsa.com/notas/factor/fp20.html>
- [31] Boylestad, Robert L. “Introducción al análisis de circuitos”, PEARSON EDUCATION, México, 2004.
- [32] Campos, Juan. Figueroa, Edgar. Stand, Lourdes. Ospino, Iván. Gómez, Alfredo. Quispe, Enrique. Vidal, Juan. Castrillón, Yuri. Mendoza, Rosaura. “CORRECCIÓN DEL FACTOR DE POTENCIA Y CONTROL DE LA DEMANDA”. [Online]. Disponible en: <http://www.si3ea.gov.co/Portals/0/Gie/Tecnologias/factor.pdf>
- [33] RTR, Energía. “Compensación de Energía Reactiva”. [Online]. Disponible en: http://www.rtrenergia.es/downloads/reactiva_2012.pdf
- [34] Cushicóndor Collaguazo, E. Tito Saráuz, D, “DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN PROTOTIPO DE UNA COCINA DE INDUCCIÓN ELECTROMAGNÉTICA”. [Online]. Disponible en: <http://bibdigital.epn.edu.ec/bitstream/15000/1113/1/CD-2596.pdf>
- [35] MINISTERIO DE ELECTRICIDAD Y ENERGÍA RENOVABLE. Informe de resultados de la implementación del “Plan Fronteras para Sustitución de Cocinas de Inducción en el Carchi”. [Online]. Disponible en: <http://idbdocs.iadb.org/wsdocs/getdocument.aspx?docnum=38699214>
- [36] Iagar, A. Popa, N. Dinis, C. “The influence of home nonlinear electric equipment operating modes on power quality”. [Online]. Disponible en: <http://www.wseas.org/multimedia/journals/systems/2014/c085702-389.pdf>
- [37] Tapia Arias, A. Vilcacundo Banda, M. “ESTUDIO DE LA PROYECCIÓN Y DETERMINACIÓN DEL CRECIMIENTO DE LA DEMANDA POR TIPO DE USUARIO, CON LA INCLUSIÓN DE LA COCINA DE INDUCCIÓN, EN EL ALIMENTADOR PICAIHUAA 13,8 KV DE LA SUBESTACIÓN ORIENTE, PERTENECIENTE A LA EMPRESA ELÉCTRICA AMBATO REGIONAL CENTRO NORTE S.A.”. [Online]. Disponible en: <http://repositorio.utc.edu.ec/bitstream/27000/1890/1/T-UTC-1780.pdf>
- [38] Hernández Tolentino, F. “Impacto de las armónicas en los sistemas eléctricos de potencia”. [Online]. Disponible en: <http://cdigital.uv.mx/bitstream/123456789/31227/1/felixjavierhernandeztolentino.pdf>
- [39] CICUTOR. “Filtros de armónicos y EMP”. [Online]. Disponible en: http://cicutor.com/docs/CA_R7_SP.pdf
- [40] INDURAMA. Especificaciones Técnicas Cocina de Inducción, “PRAGA”. [Online]. Disponible en: http://www.indurama.com/Portals/_default/Resources/Products/134/InfoMail/InfoMail.pdf
- [41] Ahmed Memon, Z. Aslam Uquaili, M. Ali Unar, M. “Harmonics Mitigation of Industrial Power System Using Passive Filters”. [Online]. Disponible en: https://www.google.com.ec/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=1&cad=rja&uact=8&ved=0CCIQFjAA&url=http%3A%2F%2Fwww.researchgate.net%2Fprofile%2FMukhtiar_Unar%2Fpublication%2F259483983_Harmonics_Mitigation_of_Industrial_Power_System_Using_Passive_Filters%2Flinks%2F02e7e53c586161200c000000&ei=8U9-VOPxFoSoNvzXgvAF&usq=AFQjCNHyZ6_IGlIm6UwXz1U_bPDwXFiPtZg&bvm=bv.80642063.d.eXY
- [42] González Hidalgo W. Impacto de la implementación del sistema de cocción inducción electromagnética en las redes de distribución de la empresa Eléctrica Regional del Sur. [Online].

Disponible en:
http://dspace.ucuenca.edu.ec/bitstream/123456789/19841/1/TE_SIS.pdf

- [43] Pérez Abril, I. Cálculo de parámetros de filtros pasivos de armónicos. [Online]. Disponible en:
http://scielo.sld.cu/scielo.php?pid=S1815-59012012000200006&script=sci_arttext