

**UNIVERSIDAD NACIONAL DEL CALLAO**  
**FACULTAD DE INGENIERÍA ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA**  
**ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA ELÉCTRICA**



**“UTILIZACIÓN DE LA  
ENERGÍA PROVENIENTE DE  
LA DISTORSIÓN ARMÓNICA  
EN UN SISTEMA  
ELÉCTRICO”**

**TESIS PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE  
INGENIERO ELECTRICISTA**

**FRANCISCO JESÚS AÑAZGO BARRANTES**

**Callao, Abril 2015  
PERÚ**

**HOJA DE REFERENCIA DEL JURADO Y APROBACIÓN**

---

**MG. ING. VÍCTOR LEÓN GUTIÉRREZ TOCAS**  
**PRESIDENTE DEL JURADO**

---

**ING. JORGE ALBERTO MONTAÑO PISFIL**  
**SECRETARIO DEL JURADO**

---

**ING. CÉSAR AUGUSTO SANTOS MEJÍA**  
**VOCAL**

---

**ING. EDGAR DEL ÁGUILA VELA**  
**ASESOR**

## DEDICATORIA

Dedico este trabajo a mi padre, *In memoriam*, por su incansable esfuerzo al darme educación, a mi madre que supo brindarme ánimo cuando lo necesitaba, ideas cuando me faltaban y su apoyo incondicional, y a mi Dios por la oportunidad de superarme.

## **AGRADECIMIENTO**

Un especial agradecimiento a mi madre que aportó en varias oportunidades buenas ideas para superar los obstáculos de mi investigación.

A mi hermana por ayudarme a sobrellevar mis responsabilidades mientras terminaba mi tesis.

A mi novia por brindarme la mejor motivación para terminar mi investigación.

A mi asesor de tesis, el Ingeniero Edgar del Águila por su acertado consejo y orientación en el proceso de patentar mi invento y su constante dirección en la presentación de este informe de tesis.

## ÍNDICE

	Pág.
CARÁTULA	
PÁGINA DE RESPETO	
HOJA DE REFERENCIA DEL JURADO Y APROBACIÓN	
DEDICATORIA	
AGRADECIMIENTO	
ÍNDICE.....	01
TABLAS DE CONTENIDO.....	03
RESÚMEN.....	06
ABSTRACT.....	07
I. PLANTEAMIENTO DE LA INVESTIGACIÓN.....	08
1.1 Identificación del problema.....	09
1.2 Formulación del problema.....	09
1.3 Objetivos de la investigación.....	10
1.4 Justificación.....	10
1.5 Importancia.....	11
II. MARCO TEÓRICO.....	13
2.1 Antecedentes del estudio.....	13
2.2 Marco teórico.....	13
2.3 Definición de términos básicos.....	31
III. VARIABLES E HIPÓTESIS.....	34
3.1 Variables de la investigación.....	34
3.2 Operacionalización de variables.....	34
3.3 Hipótesis general e hipótesis específicas.....	36
IV. METODOLOGÍA.....	37
4.1 Tipo de investigación.....	37
4.2 Diseño de la investigación.....	37
4.3 Población y muestra.....	37
4.4 Técnica e instrumentos de recolección de datos.....	38
4.5 Procedimientos de recolección de datos.....	41
4.6 Procesamiento estadístico y análisis de datos.....	75
V. RESULTADOS.....	81
VI. DISCUSIÓN DE RESULTADOS.....	85
6.1 Contrastación de hipótesis con los resultados.....	85
6.2 Contrastación de resultados con otros estudios similares	86
VII. CONCLUSIONES.....	94

VIII.RECOMENDACIONES.....	95
IX. PERSPECTIVAS DEL TRABAJO DE INVESTIGACIÓN.....	96
X. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	97
XI. ANEXOS.....	98

Anexo1: Presupuesto

Anexo2: Matriz de consistencia.

## TABLAS DE CONTENIDO

### LISTA DE TABLAS

<b>Número</b>	<b>Título</b>	<b>Página</b>
2.1	CLASIFICACIÓN DE ARMÓNICOS	25
2.2	ESTADO DE LA TÉCNICA DE LOS FILTROS	30
3.1	OPERACIONALIZACIÓN DE VARIABLES	35
4.1	CAPACIDAD DE LOS CONDENSADORES UTILIZADOS	42
4.2	CARACTERÍSTICAS DEL ALAMBRE USADO	43
4.3	DIMENSIONES DE LAS BASES PARA LAS BOBINAS	51
4.4	NÚMERO DE ESPIRAS DE LAS BOBINAS UTILIZADAS	52
4.5	PARÁMETROS DE LOS CONDENSADORES	55
4.6	MEDICIÓN DE PARÁMETROS DEL FILTRO	65
4.7	RESÚMEN DE MEDICIONES PRÓXIMAS A LA FRECUENCIA DEL TERCER ARMÓNICO	74
4.8	POTENCIA DE ENTRADA Y DE SALIDA DEL FILTRO	76
4.9	POTENCIA DISIPADA POR UN FILTRO CONVENCIONAL	79

## LISTA DE GRÁFICOS Y FIGURAS

<b>Número</b>	<b>Título</b>	<b>Página</b>
2.1	Circuito RC serie	15
2.2	Circuito RC paralelo	16
2.3	Impedancia vs frecuencia	19
2.4	Admitancia vs frecuencia	19
2.5	Ondas armónicas	21
2.6	Rectificador de onda completa	22
2.7	Rectificador trifásico	23
2.8	Ondas originadas por convertidor de 6 pulsos	24
2.9	Ondas originadas por fluorescente electrónico	24
2.10	Ondas originadas por motor de corriente continua	24
2.11	Filtro pasivo serie	27
2.12	Impedancia vs frecuencia	27
2.13	Filtro pasivo paralelo	28
2.14	Impedancia vs frecuencia	29
4.1	Medidor EXTECH LCR Meter modelo 380193	44
4.2	Medido PRASEK Premium PR-602	45
4.3	Topología del circuito	46
4.4	Fuente de frecuencia variable construida	46
4.5	Topología del circuito	48
4.6	Diagrama vectorial	49
4.7	Condensadores utilizados	53
4.8	Acoplamiento paralelo de condensadores	53



4.9	Acoplamiento serie de condensadores	54
4.10	Circuito de nuevo filtro pasivo	56
4.11	Onda de corriente del filtro	58
4.12	Circuito rectificador de onda completa	58
4.13	Medición de parámetros en nuevo filtro	59
4.14	Selección de núcleo	61
4.15	Modificación de núcleo	61
4.16	Unión de láminas del núcleo	62
4.17	Prueba de bases en núcleo	62
4.18	Armado de núcleo desmontable	63
4.19	Armado de bobina	63
4.20	Ubicación de bobina en núcleo	64
5.1	Gráfico capacidad (uf) vs potencia (W)	83
5.2	Gráfico capacidad (uf) vs tensión (v)	84
6.1	Topología del circuito para simulación	87
6.2	Onda de corriente total (sin filtro)	88
6.3	Onda de voltaje total (sin filtro)	89
6.4	Onda de corriente de carga (sin filtro)	89
6.5	Onda de corriente del filtro	90
6.6	Onda de corriente total (con filtro)	91
6.7	Onda de voltaje total (con filtro)	91
6.8	Onda de corriente de la carga (con filtro)	92
6.9	Onda en el secundario del filtro	93

## **RESÚMEN**

El presente informe corresponde a los resultados del proyecto de investigación titulado "UTILIZACIÓN DE LA ENERGÍA PROVENIENTE DE LA DISTORSIÓN ARMÓNICA EN UN SISTEMA ELÉCTRICO".

Debido a que el uso de filtros pasivos para contrarrestar los efectos de la distorsión armónica, genera un consumo considerable de energía, nace la necesidad de reducir este consumo.

El propósito de la presente investigación es llegar a darle un uso a la energía que normalmente es disipada por los filtros pasivos, es decir, la energía proveniente de la distorsión armónica, que por sus características no es aprovechada hasta el momento.

El método utilizado para desarrollar la presente investigación fue el experimental, ya que tiene como finalidad el diseño de un filtro pasivo capaz de aprovechar parte de la energía proveniente de la distorsión armónica, en vez de disiparla.

## ABSTRACT

This report corresponds to the results of the research project entitled "USING THE ENERGY FROM THE HARMONIC DISTORTION IN A POWER SYSTEM".

Because the use of passive filters to counteract the effects of harmonic distortion, generates considerable energy consumption, comes the need to reduce this consumption.

The purpose of this research is to give an application to the energy that is normally dissipated by passive filters, which means, the energy from harmonic distortion, which by its nature is not seized so far.

The method used to develop this research was experimental, and which aims to design a passive filter able to harness some of the energy from harmonic distortion, instead of dissipating.

## I.-PLANTEAMIENTO DEL LA INVESTIGACIÓN

Con la finalidad de alcanzar nuevos logros en la humanidad y a la vez optimizar el consumo de la energía, se introducen cada vez más aparatos electrónicos a la red eléctrica, originando perturbaciones en la forma de onda ya que estas cargas (por ejemplo variadores de velocidad, ordenadores personales, equipos de soldadura, hornos de arco eléctrico) no son lineales, es decir, a pesar de ser alimentados con un voltaje senoidal, no consumen corriente senoidal. Este tipo de cargas produce fuertes distorsiones armónicas en la corriente que consumen, alterando la forma de onda de la tensión. Por otra parte, muchos de los equipos que se utiliza de forma cotidiana, son altamente sensibles a dicha deformación.

La presencia de esta distorsión en la red eléctrica origina pérdidas económicas considerables, tanto por el costo de reparación o reposición de los equipos afectados, como pérdidas producto del elevado consumo de energía eléctrica. Las empresas de generación, transmisión y distribución, así como los usuarios finales, se ven afectados por la calidad de la energía eléctrica, por ello se han establecido normas que rigen los límites para los parámetros que la definen.

La Norma Técnica de Calidad de los Servicios Eléctricos (NTCSE) indica que la tolerancia máxima para la distorsión armónica total (THD) en media y baja tensión es del 8%, y en el caso particular de cada orden de armónicos el límite varía entre 0.1 y 6 %, siendo el 5% en el caso del armónico de tercer orden.

## **1.1.- Determinación del problema**

Hoy en día existen varios métodos para reducir la distorsión armónica. En este proyecto le prestaremos especial atención a los filtros para armónicos, de los cuales existen dos principales tipos: Los filtros pasivos y los filtros activos. Evaluando las ventajas y desventajas de cada tipo de filtro se observa que ambos generan pérdidas considerables de energía. Característica que aún no ha sido superada. El principal objeto del presente estudio es el filtro pasivo.

## **1.2.- Formulación del problema**

### **1.2.1.-Problema general**

Los métodos actuales utilizados para contrarrestar los efectos de los armónicos en un sistema eléctrico originan una pérdida considerable de energía, lo cual nos lleva a la siguiente interrogante:

**¿Es posible utilizar la energía proveniente de la distorsión armónica en vez de disiparla?**

### **1.2.2.-Problemas específicos**

Quedan determinadas e implicadas en las siguientes prerrogativas:

**P1 ¿Qué métodos se utilizan actualmente para reducir el nivel de armónicos de potencia en nuestro país?**

**P2 ¿Cuánta potencia disipa un filtro pasivo?**

**P3 ¿Cuánto de esa potencia perdida se podría recuperar utilizando el nuevo filtro para armónicos?**

### **1.3.- Objetivos de la investigación**

#### **1.3.1.-Objetivo general:**

Diseñar un nuevo filtro capaz de captar la energía proveniente de la distorsión armónica en un sistema eléctrico para transformarla en energía utilizable.

#### **1.3.2.-Objetivos específicos:**

- a) Identificar los métodos más utilizados actualmente en el Perú para reducir el nivel de los armónicos en las redes eléctricas.
- b) Determinar la potencia que disipan los filtros pasivos de armónicos en condiciones nominales.
- c) Determinar la potencia que se puede obtener de la distorsión armónica mediante el uso del nuevo filtro para armónicos.

### **1.4.- Justificación**

Las razones que justifican la investigación propuesta, son las siguientes:

- a) Mediante la presente tesis se pretende brindar un valioso aporte teórico práctico que beneficiará a las empresas de generación, transmisión, distribución y a los consumidores finales de energía eléctrica al proponer una nueva forma de “reciclar la energía eléctrica”.
- b) Esta tesis servirá como base para hallar nuevos métodos o procesos para recuperar la energía proveniente de la distorsión armónica.
- c) La presente tesis incluye la creación de un nuevo tipo de filtro pasivo que servirá como una solución efectiva y económica para la distorsión armónica.

#### **1.4.1.- Bases legales**

En el Perú, la Norma Técnica de Calidad de los Servicios Eléctricos (NTCSE) indica que el control de calidad se realiza en diferentes aspectos, siendo uno de ellos la "calidad de producto", en el cual se evalúan la tensión, frecuencia y perturbaciones (inicialmente flicker y tensiones armónicas), los cuales se miden en el punto de acoplamiento común del sistema.

La misma norma, precisa la tolerancia máxima para la distorsión armónica total (THD), y para el caso particular de cada orden de armónicos.

Por ejemplo, en la citada norma se menciona que para el caso de las armónicas de orden 3 para tensiones menores o iguales a 60 KV, la tolerancia expresada en porcentaje respecto a la tensión nominal es de 5%, lo mismo sucede con el THD, que tiene un límite de 5% para el mismo nivel de tensión. La quinta armónica tiene una tolerancia de 6%.

El filtro diseñado logra mantener los parámetros dentro de los límites definidos por dicha norma.

#### **1.5.- Importancia**

En cualquier sistema eléctrico convencional, al cual están conectadas cargas no lineales, podemos encontrar una gran cantidad de ondas armónicas, que debido al rango de sus parámetros no pueden ser aprovechadas para alimentar cargas comunes.

La presencia de ondas armónicas en una instalación origina el deterioro, mal funcionamiento y fallo de máquinas sensibles como motores trifásicos de inducción y en los equipo de cómputo, causa calentamiento de

conductores y barras colectoras, fallas en los transformadores, disparo repentino de interruptores, sobrecargas en los conductores del neutro, entre otros problemas más.

Ya que estas ondas armónicas perjudican a los equipos e instrumentos conectados al sistema, se ha optado, entre otras soluciones, por eliminarlas disipándolas por medio de filtros pasivos, traduciendo esta energía disipada en pérdidas económicas.

Acercándonos cada vez más a una falta de recursos que contrasta con una mayor demanda energética, es necesario e importante optimizar el uso de la energía que hoy se genera.

Por lo tanto, la importancia de la presente tesis radica en dos puntos, el primero es que sirve como base teórica para empezar a aprovechar la energía proveniente de la distorsión armónica que circula en un sistema eléctrico, y el segundo beneficio es que al captar esta energía no perjudicará a las cargas conectadas.



## **II.-MARCO TEÓRICO**

### **2.1.- Antecedentes del estudio**

Habiendo realizado una búsqueda en diferentes países por medio de INDECOPI, podemos decir que no existen investigaciones acerca del presente tema. Hasta el momento se han realizado diversas investigaciones que plantean soluciones ante la presencia de armónicos en los sistemas eléctricos, mas no se ha planteado la opción de utilizar esta energía.

Entre las investigaciones actuales mencionaré la tesis “Estudio y simulación de los filtros de potencia” presentada por el Ingeniero Oscar Julián Peña Huaranga, el año 2005 en la Facultad de Ingeniería Eléctrica y Electrónica de la Universidad Nacional de Ingeniería. En dicho trabajo de investigación se detallan los diferentes tipos de filtros y sus características, realizando la simulación de la operación de cada uno de ellos, describiendo las limitaciones de cada tipo de filtro como son la desintonía para los filtros pasivos y el elevado costo para los filtros activos. Incluye también en su análisis a los filtros híbridos.

### **2.2.- Marco teórico**

A medida que el mundo industrial va evolucionando, nueva tecnología se impone a la existente, la miniaturización, la optimización de la eficiencia y la innovación apuntan a obtener resultados utilizando menos energía, pero muchas veces sacrificando la calidad de la ésta.

Hablar de la calidad de la energía eléctrica es comprender muchos aspectos técnicos, así como fenómenos que intervienen en la generación, transmisión, distribución y en el uso de ésta. La presente investigación está centrada en uno de los fenómenos que intervienen en la medición de la calidad de la energía, los armónicos.

### **2.2.1.- Resonancia**

El fenómeno de la resonancia existe en diferentes campos de la física, como en la mecánica, en la acústica, y otros. Por ejemplo, al tocar la cuerda de una guitarra, la cuerda amortigua de forma desigual las diferentes ondas en que se puede descomponer la vibración original. Quedando finalmente un sonido limpio que se corresponde con una única frecuencia (la frecuencia de resonancia). Esta señal ingresa a la caja de la guitarra la cual presenta una amortiguación mínima a esa frecuencia, originando la resonancia. Es por eso que el fenómeno de resonancia es buscado al diseñar estos instrumentos.

En contraparte, en las construcciones de gran envergadura como puentes, edificios y otros, se trata de evitar dicho fenómeno, ya que podría ocurrir el deterioro o destrucción de dicha construcción al entrar en resonancia con temblores, con el viento u otros movimientos, tal como ocurrió con el famoso puente de Tacoma Narrows, un puente colgante de 1600 metros de longitud, con una distancia entre soportes de 850m (el tercero más grande del mundo en la época que fue construido), fue diseñado por Clark Eldridge. Dicho puente se hizo famoso por su dramático colapso estructural inducido por el viento el 7 de noviembre de 1940.

No sólo se observa el fenómeno de resonancia en sistemas mecánicos, los sistemas de radio aprovechan este fenómeno para discriminar frecuencias y amplificar la deseada, el acoplamiento magnético entre circuitos, la técnica de obtención de imágenes médicas y muchos otros fenómenos hacen uso del concepto de resonancia.

### **2.2.2.- Resonancia eléctrica**

En este caso se desea estudiar la resonancia eléctrica para circuitos RLC. Se dice que un circuito eléctrico se encuentra en resonancia cuando a

pesar de tener componentes como inductancias o capacitancias se comporta como un circuito resistivo puro o en caso contrario encuentra el mayor módulo de impedancia. La corriente es máxima o mínima según el caso y la tensión en la resistencia está en fase con la tensión de excitación del circuito.

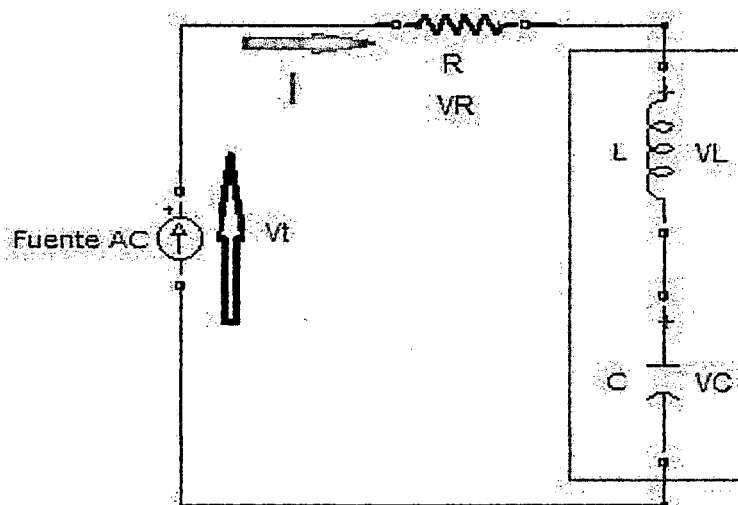
Las topologías de los circuitos en estudio son las siguientes:

**a) Circuito RLC serie:**

Un circuito serie que contiene R, L, y C, tal como se muestra en la Figura 2.1, está en resonancia cuando la reactancia resultante es cero. Puesto que la caída de tensión a través de la inductancia se adelanta a la corriente en  $90^\circ$ , mientras que la caída a través del capacitor se retrasa en  $90^\circ$ , las dos caídas de tensión son opuestas.

Si se logra que ambas caídas de tensión sean de igual valor, al ser opuestas se anulan y el voltaje sería únicamente igual a la caída de tensión en la resistencia. Ésta situación se presenta en resonancia.

**Figura N° 2.1: Circuito RLC serie**



**Fuente: Elaboración propia**

De aquí podemos deducir la siguiente expresión:

$$Z = R + j\left(\omega_0 L - \frac{1}{\omega_0 C}\right) \dots\dots\dots(1)$$

Si hacemos iguales las reactancias capacitiva e inductiva:

$$\omega_0 L = \frac{1}{\omega_0 C} \dots\dots\dots(2)$$

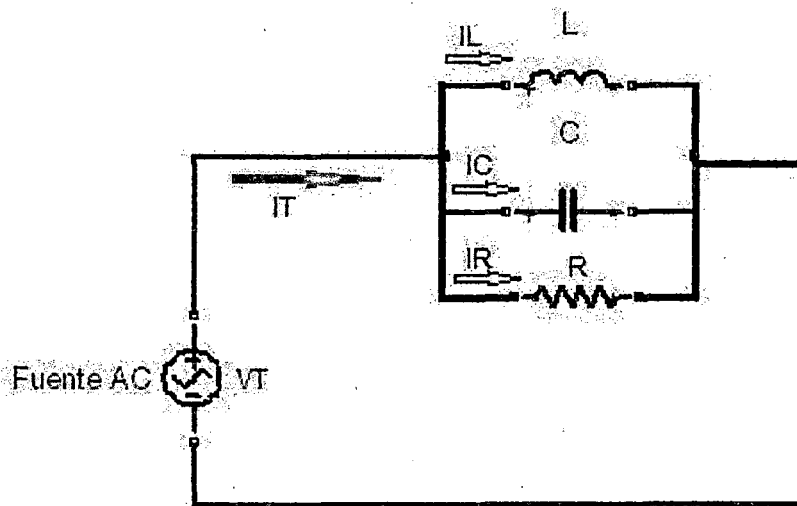
Resulta que esto puede ocurrir a la siguiente frecuencia angular:

$$\omega_0^2 = \frac{1}{LC} \dots\dots\dots(3)$$

**b) Circuito RLC paralelo:**

El circuito resonante paralelo que se muestra en la Figura 2.2, tiene similitud con el circuito resonante serie, pero su comportamiento es diferente, ya que el circuito paralelo tiene alta impedancia ante la frecuencia de resonancia.

**Figura N° 2.2: Circuito RC paralelo**



**Fuente: Elaboración propia**

Tomemos en cuenta lo siguiente:

$$Y = G + Y = G + B_L + B_C Y = G + B_L + B_C \dots \dots \dots (4)$$

Donde:

$$G = \frac{1}{R} \dots \dots \dots (5)$$

$$B_L = -j \frac{1}{X_L} \dots \dots \dots (6)$$

$$B_C = j \frac{1}{X_C} \dots \dots \dots (7)$$

Donde G: Conductancia, B: Susceptancia.

Reemplazando tenemos:

$$Y = G + j \left( \frac{1}{X_C} - \frac{1}{X_L} \right) = G + j \left( \omega_0 C - \frac{1}{\omega_0 L} \right) \dots \dots \dots (8)$$

En resonancia la susceptancia total es igual a cero, esto quiere decir que  $B_L = B_C$ , entonces:

$$\omega_0 L = \frac{1}{\omega_0 C} \dots \dots \dots (9)$$

Resulta que esto puede ocurrir a la siguiente frecuencia angular:

$$\omega_0^2 = \frac{1}{LC} \dots \dots \dots (10)$$

Tanto para el caso del circuito RLC serie como para el circuito en paralelo, la frecuencia angular de resonancia está dada por:

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{1}{L \cdot C}} \dots\dots\dots(11)$$

Donde:

$\omega_0$  es la frecuencia angular, L (Henrios) es la inductancia y C (faradios) es la capacitancia del circuito. Por otro lado, el campo magnético generado en la bobina puede estar afectado por distintas causas, entre ellas la cercanía de otra inductancia.

La frecuencia está definida por:

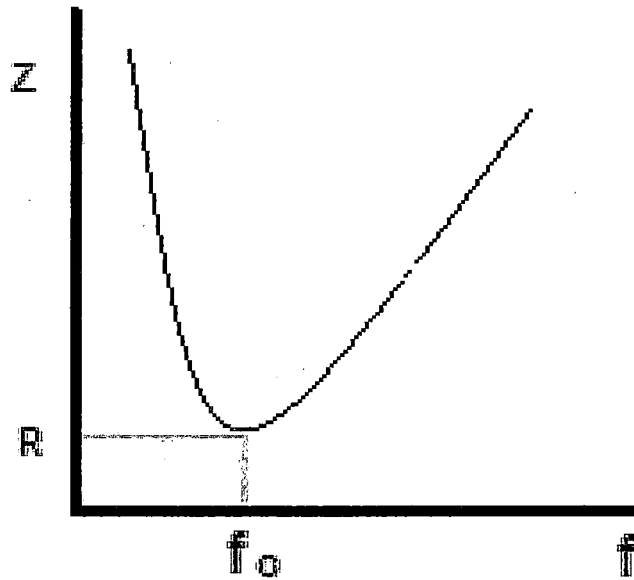
$$f = \frac{\omega_0}{2\pi} \dots\dots\dots(12)$$

De aquí:

$$f = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \dots\dots\dots(13)$$

En el circuito serie la impedancia varía en función de la frecuencia, tal como se muestra en la figura 2.3:

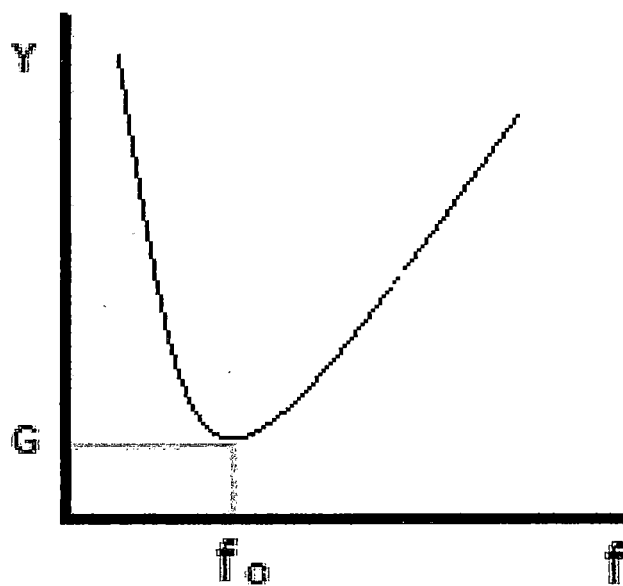
**Figura N° 2.3: Impedancia vs frecuencia**



**Fuente: Elaboración propia**

En el circuito paralelo la admitancia varía en función de la frecuencia, tal como se muestra en la figura 2.4:

**Figura N° 2.4: Admitancia vs frecuencia**



**Fuente: Elaboración propia**

En conclusión, un circuito RLC serie en resonancia presenta una baja impedancia, de igual magnitud que la resistencia del circuito, lo cual permite una alta circulación de corriente por dicha rama en serie. Una onda cuya frecuencia sea igual a la de resonancia del circuito circulará fácilmente por dicha rama.

El circuito RLC paralelo funciona de manera inversa, una onda cuya frecuencia sea igual a la de resonancia encontrará en el circuito una gran impedancia (baja admitancia) que dificultará el paso de dicha onda.

### 2.2.2.- ¿Qué son y cómo se generan los armónicos en una red eléctrica?

El sistema eléctrico genera, transporta y distribuye ondas de voltaje senoidales, las cargas lineales conectadas a este sistema consumen corriente senoidal sin generar distorsión a la onda de voltaje. Sin embargo, las cargas no lineales absorben corrientes en impulsos bruscos, estos impulsos crean ondas de corriente periódicas distorsionadas que originan a su vez corrientes de armónicos de retorno hacia otras partes del sistema. Mediante la serie de Fourier, estas corrientes se pueden descomponer en una componente de frecuencia fundamental (en el Perú la frecuencia es igual a 60 Hz), más una serie de corrientes superpuestas de frecuencias múltiplos de la fundamental a las que llamaremos armónicos. Los armónicos son entonces ondas similares a la componente fundamental pero de frecuencias múltiplos de la frecuencia fundamental.

La serie de Fourier indica que una función  $f(x)$  que está definida en el intervalo  $(-p,p)$  se puede expresar de la siguiente manera:

$$f(x) = \frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} \left[ a_n \cos\left(\frac{n\pi x}{p}\right) + b_n \operatorname{Sen}\left(\frac{n\pi x}{p}\right) \right] \dots\dots\dots(14)$$



Donde,

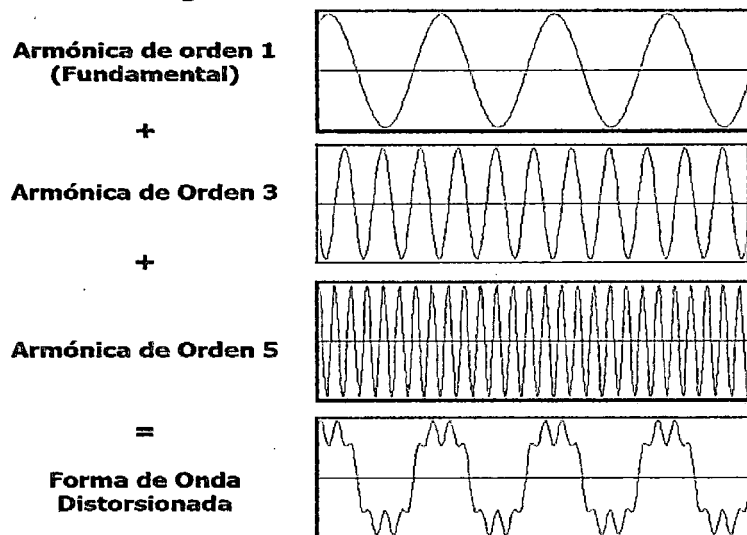
$$a_0 = \frac{1}{p} \int_{-p}^p f(x) dx \dots\dots\dots(15)$$

$$a_n = \frac{1}{p} \int_{-p}^p f(x) \cos\left(\frac{n\pi x}{p}\right) dx \dots\dots\dots(16)$$

$$b_n = \frac{1}{p} \int_{-p}^p f(x) \sin\left(\frac{n\pi x}{p}\right) dx \dots\dots\dots(17)$$

Por ejemplo, en la figura N°2.5, se presenta una onda sinusoidal fundamental, una onda armónica de orden 3 (su frecuencia es 3 veces la frecuencia de la onda fundamental), una onda armónica de orden 5 (su frecuencia es 5 veces la frecuencia de la onda fundamental), y por último la superposición de las 3 ondas.

**Figura N° 2.5: Ondas armónicas**



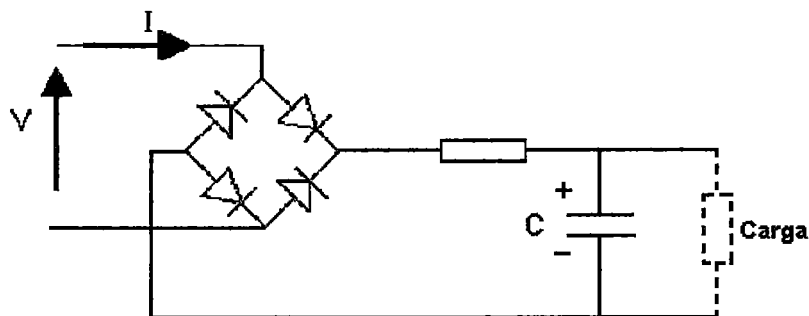
Fuente: [www.metrel.com](http://www.metrel.com)

**2.2.3.- Ejemplos típicos de cargas no lineales que originan esta perturbación:**

- **Rectificadores Monofásicos:**

Equipos como computadoras, impresoras, televisores, aparatos de medicina, y la mayoría de los equipos electrónicos usan este sistema como fuente de alimentación. En ellos, la tensión alterna de entrada es rectificadora por un puente de diodos, y con ella se carga un condensador. Después de un semiperiodo, el condensador se carga a la tensión de pico de la onda senoidal (véase la figura N° 2.6). El equipo puede absorber corriente hasta alcanzar un límite mínimo regulado, es decir, el condensador solamente absorbe un impulso de corriente durante la cresta de la onda. Los armónicos que generan son de orden impar con una amplitud inversamente proporcional al orden del armónico.

**Figura N° 2.6: Rectificador de onda completa**

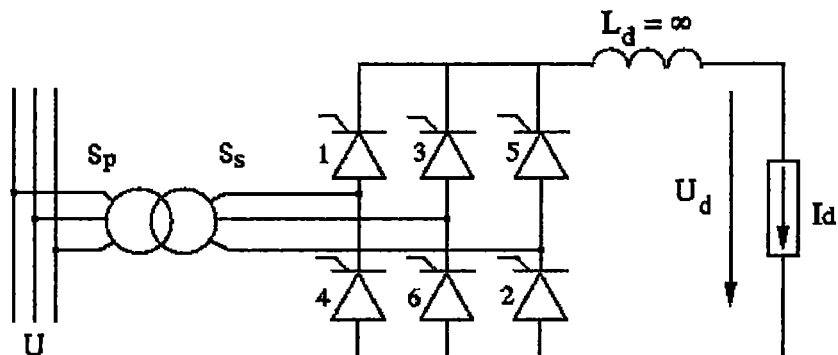


Fuente: [www.metrel.com](http://www.metrel.com)

- **Rectificadores Trifásicos:**

La configuración típica de los rectificadores trifásicos corresponde al puente de Graetz, cuyo esquema es el que se muestra en la Figura N° 2.7.

**Figura N° 2.7: Rectificador trifásico**



Fuente: [www.metrel.com](http://www.metrel.com)

Estos rectificadores inyectan armónicos de orden

$$n = k \cdot p \pm 1 \dots \dots \dots (18)$$

**Donde:**

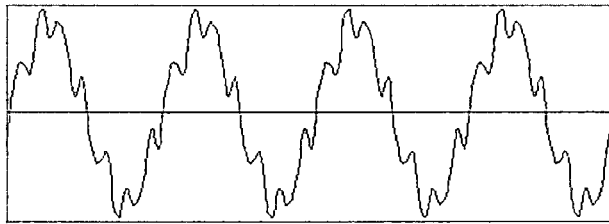
- n = orden del armónico
- p = número de pulsos del rectificador
- k = entero positivo 1, 2, 3...

Los equipos más comunes que incluyen rectificador trifásico son las luminarias ahorradoras, los sistemas de alimentación ininterrumpida y variadores de velocidad o convertidores de frecuencia. Otras cargas no lineales que podemos mencionar son los reguladores de tensión, utilizados para variar la intensidad luminosa o regulación de ciertos aparatos. También los hornos de arco que contiene casi todos los armónicos, y los transformadores que presentan una característica no lineal a partir del codo de saturación.

**2.2.4.- Formas de ondas originadas por cargas no lineales:**

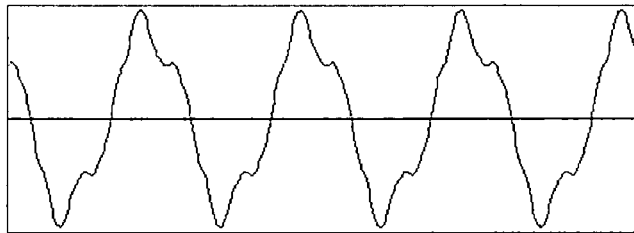
Las cargas no lineales como muchas de las que actualmente existen en viviendas, oficinas e industria originan la circulación de corriente con una forma de onda deformada, pondré tres ejemplos de estas ondas en las Figuras N° 2.8, 2.9, y 2.10

**Figura N° 2.8: Ondas originadas por convertidor de 6 pulsos**



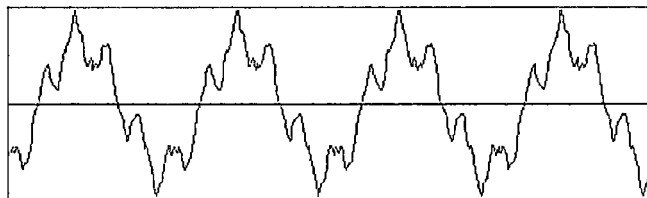
**Fuente: TECSUP VIRTUAL, Calidad de la Energía Eléctrica**

**Figura N° 2.9: Ondas originadas por fluorescente electrónico**



**Fuente: TECSUP VIRTUAL, Calidad de la Energía Eléctrica**

**Figura N° 2.10: Ondas originadas por motor de corriente continua**



**Fuente: TECSUP VIRTUAL, Calidad de la Energía Eléctrica**

Los armónicos se pueden clasificar según su frecuencia, secuencia, y si son característicos o no. Las armónicas de secuencia positiva (incluyendo

las fundamentales) giran en sentido directo y el campo magnético producido por las armónicas de secuencia negativa gira en sentido inverso, cancelando el campo producido por las armónicas de secuencia positiva. Este efecto puede producir que los motores de inducción trifásicos se quemen.

Las armónicas de secuencia cero o triples (secuencia homopolar) no rotan, estas se agregan en el neutro de un sistema trifásico de 4 hilos. (Véase la tabla N° 2.1)

**Tabla N° 2.1  
CLASIFICACIÓN DE ARMÓNICOS**

Nombre	Fund.	3	5	7	9	11	13
Frecuencia	60	180	300	420	540	660	780
Secuencia	+	-	0	+	-	0	+

**Fuente: Elaboración propia**

Los armónicos característicos son los impares, pues tienen mayor presencia en la medición, y los no característicos pueden ser los armónicos pares, los interarmónicos cuya frecuencia no es un múltiplo entero de la frecuencia fundamental y los subarmónicos cuya frecuencia es inferior a la frecuencia fundamental.

### **2.2.5 Métodos actuales utilizados en nuestro país para reducir el nivel de armónicos en una red eléctrica**

Los armónicos producen principalmente dos efectos, el envejecimiento acelerado y el calentamiento de conductores y equipos conectados a la red eléctrica afectada. También provoca fallos en contactores, relés e interruptores automáticos y altera el funcionamiento de muchos equipos

sensibles como ordenadores, teléfonos, telemandos, destrucción de condensadores por sobretensión, pérdidas en el cobre, pérdidas dieléctricas, incremento en las intensidades en los conductores de neutro incluso en las redes equilibradas, falla de los motores de inducción, calentamiento y falla de los transformadores, etc.

Existen muchos métodos para contrarrestar los armónicos y sus efectos. Podemos nombrar entre ellos a los transformadores de aislamiento, los filtros activos, los filtros pasivos, usar un conductor neutro con cada circuito, separar cargas contaminantes, o aumentar la sección del conductor neutro.

La presente investigación se origina analizando el principio de funcionamiento que tienen los filtros pasivos. Entre los filtros pasivos más comunes tenemos los filtros pasivos serie y los filtros pasivos paralelos. Centraremos especial atención en los filtros pasivos paralelos.

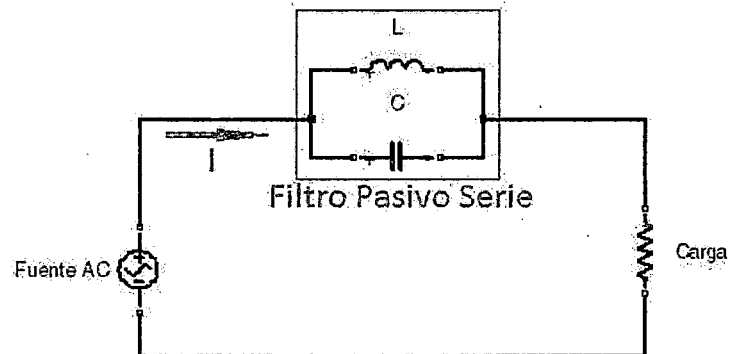
#### **a) Filtros Pasivos**

Es la agrupación de dispositivos que por su diseño aprovechan el fenómeno de la resonancia eléctrica para atraer o rechazar las corrientes y las tensiones armónicas según su frecuencia.

##### **□ Filtro Pasivo Serie**

Este filtro está formado por un inductor y un capacitor en paralelo, instalados en serie con la parte de la red que se desea proteger (véase la Figura N° 2.11).

**Figura N° 2.11: Filtro pasivo serie**



**Fuente: Elaboración propia**

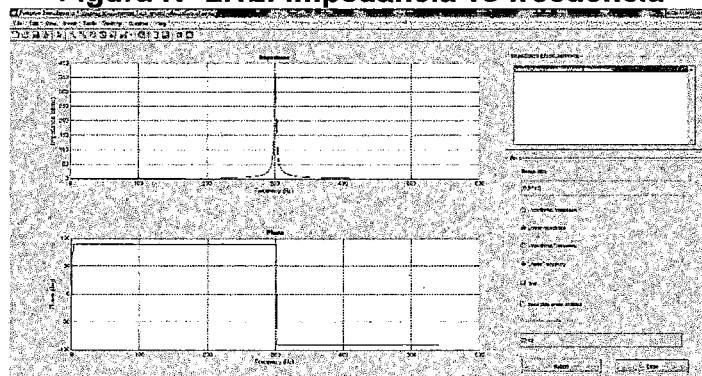
El circuito resonante formado por estos elementos ofrece una elevada impedancia a la circulación del armónico de corriente para el cual ha sido sintonizado, es decir se opone al paso de la onda armónica elegida. Para graficar la relación entre la impedancia y la frecuencia en el filtro serie se ha realizado la simulación en el programa Simulink de Matlab.

Ingresando los siguientes parámetros para el circuito:

$$L = 1\text{mH}$$

$$C = 280\mu\text{F}$$

**Figura N° 2.12: Impedancia vs frecuencia**



**Fuente: Elaboración propia**

De la Figura N° 2.12 podemos observar que mediante la selección de los adecuados valores, el filtro diseñado presenta una elevada impedancia ante la frecuencia de 300 Hz al que corresponde el quinto armónico.

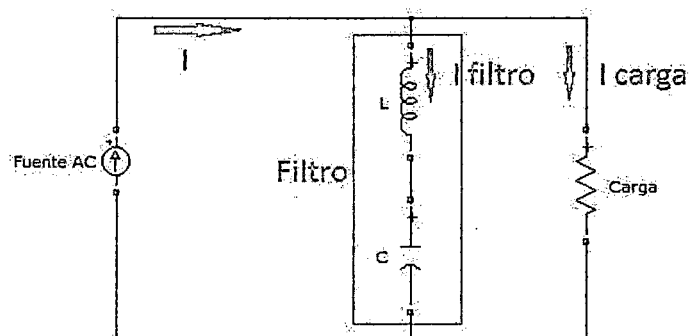
Por lo tanto, ante la presencia del quinto armónico en la red eléctrica, este filtro puede ser conectado en serie con la carga y se opondrá al paso de dicha onda armónica, permitiendo el libre paso de las otras frecuencias.

Uno de los principales problemas del filtro pasivo serie es que consume un gran porcentaje de la potencia aparente que consume la carga.

#### □ Filtro Pasivo Paralelo

Está formado por un inductor y un capacitor en serie, esta rama L-C servirá como sumidero de una onda armónica. Es decir, se deberá instalar tantas ramas L-C como armónicos se desea filtrar. Los valores de la inductancia y la capacitancia son seleccionados de tal forma que la frecuencia a la cual resuenen coincida con la frecuencia del armónico que se desea eliminar. De esta manera la mayor parte de la intensidad armónica se dirige hacia el filtro (80 a 90%).

**Figura N° 2.13: Filtro pasivo paralelo**



**Fuente: Elaboración propia**

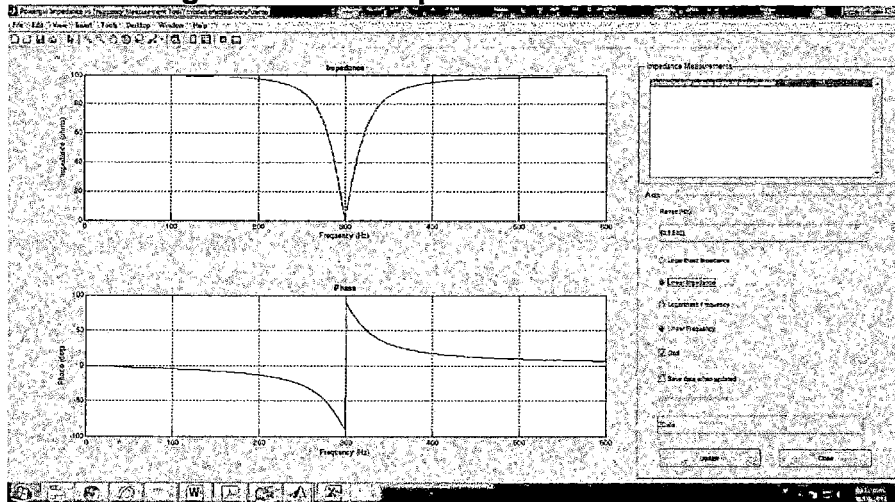
Para graficar la relación entre la impedancia y la frecuencia en el filtro paralelo, se ha realizado la simulación en el programa Simulink de Matlab. Ingresando los siguientes parámetros para el circuito de la Figura N° 2.13:



$$L = 0.2797 \text{ H}$$

$$C = 1.01 \mu\text{F}$$

**Figura N° 2.14: Impedancia vs frecuencia**



**Fuente: Elaboración propia**

Debido a los valores seleccionados, el filtro paralelo también resuena a 300 Hz (Ver Figura N° 2.14), correspondiente al quinto armónico. Pero esta vez, el filtro presenta una mínima impedancia ante la frecuencia de resonancia, atrayendo de esta manera las ondas armónicas que circulan con esa frecuencia y las disipa.

Los filtros pasivos paralelos pueden tener diferentes topologías como por ejemplo el filtro sintonizado simple y los filtros amortiguados. Los filtros amortiguados pueden atenuar un amplio rango de armónicos.

### **b) Filtros Activos**

Son equipos electrónicos capaces de eliminar los armónicos desde el 2° hasta el 50°, tanto en las fases como el neutro en tiempo real. Estos filtros evitan los problemas de resonancia, equilibra las fases y compensa la potencia reactiva. En el mercado, según su potencia, los filtros activos consumen aproximadamente un 25% de la potencia que consume la carga.

## 2.2.6.- Ventajas y desventajas de los filtros activos y filtros pasivos

La siguiente tabla muestra la comparación de los filtros más comunes.

**Tabla N° 2.2: ESTADO DE LA TÉCNICA DE LOS FILTROS**

Filtros Pasivos	Filtros Activos
<p><b>Ventajas:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Bajo costo.</li> <li>• Su cálculo y diseño es sencillo.</li> <li>• Muy utilizados en aplicaciones de altas frecuencias y de potencia.</li> </ul> <p><b>Desventajas:</b></p> <p>+ Las inductancias son difíciles de conseguir.</p> <p>+ La respuesta a la frecuencia está limitada al valor de sus componentes pasivos.</p> <p>+La respuesta a la frecuencia puede tener variaciones importantes a la función ideal.</p> <p>+Se puede producir la desintonía del filtro.</p> <p>+Existe una considerable pérdida de energía</p>	<p><b>Ventajas:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• No llevan inductancias en los circuitos.</li> <li>• Se adaptan a las impedancias perfectamente.</li> <li>• Se pueden crear filtros complejos conectando varios filtros en cascada</li> <li>• Aumentan la amplitud de la señal de entrada fácilmente.</li> <li>• Fácil de implementar.</li> <li>• Respuesta aproximada a la función ideal.</li> </ul> <p><b>Desventajas:</b></p> <p>+ Sus Amplificadores operacionales tienen un límite para la frecuencia de uso.</p> <p>+ No es posible usarlos en circuitos donde se requiera tener una alta potencia.</p> <p>+ La amplificación de la señal de entrada tiene como límite el nivel de la fuente de alimentación.</p>

**Fuente: Elaboración propia**

## 2.3.- Definición de términos básicos

### 2.3.1.-Valor medio

El valor medio para una función de periodo T, es la media algebraica de los valores instantáneos durante un periodo

$$Y_{med} = \frac{1}{T} \int_0^T y(t) dt \dots\dots\dots(19)$$

El valor medio es el valor del área que forma con el eje de abscisas partido por su período. Se puede interpretar como el componente de continua de la oscilación sinusoidal. Como en una señal sinusoidal el semiciclo positivo es idéntico al semiciclo negativo, su valor medio es nulo.

### 2.3.2.-Valor eficaz

Es la media cuadrática de los valores instantáneos durante un periodo completo.

$$Y_{ef} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T (y(t))^2 dt} \dots\dots\dots(20)$$

Para una función senoidal, el valor eficaz es:

$$Y_{ef} = \frac{V_0}{\sqrt{2}} \dots\dots\dots(21)$$

El valor eficaz de una corriente variable es el valor de una corriente constante que al circular por una determinada resistencia óhmica pura produce los mismos efectos caloríficos (igual potencia disipada) que dicha corriente variable (alterna).

### 2.3.3.-Factor de cresta

Representa la comparación del valor pico en comparación con su valor rms (root mean square o valor medio cuadrático).

$$FC = \frac{X_{pico}}{X_{rms}} \dots\dots\dots(22)$$

### 2.3.4.-Carga

Se llama carga a cualquier dispositivo que usa corriente de una determinada fuente de poder eléctrica.

### 2.3.5.-Carga lineal

Es aquella carga donde la forma de onda de corriente que consume tiene la misma forma que la onda de tensión suministrada, en otras palabras, el voltaje y la corriente son semejantes el uno al otro. La carga lineal característica es la resistencia. En ella la tensión y la corriente son senoidales y además ambas ondas se encuentran en fase la una respecto a la otra. En este tipo de carga también se puede considerar a los condensadores e inductancias, que aunque sus ondas de corriente no se encuentran en fase con la onda de tensión siguen manteniendo una forma senoidal.

### 2.3.6.-Carga no lineal

Es aquella carga que, debido a su naturaleza, crea una diferencia entre la forma de onda de corriente y la onda de voltaje que la alimenta, por tanto genera distorsión en la onda de voltaje, sobrecalentamiento en los transformadores, entre otros efectos. Una carga no lineal puede ser un circuito rectificador basado en diodos, ya que al ser alimentado por una tensión senoidal no consume una corriente senoidal sino que extrae energía de los picos de la onda causando una distorsión en la corriente que lo alimenta.

### 2.3.7.-Armónicos

Una función periódica no senoidal puede descomponerse en la suma de una función senoidal de frecuencia fundamental y de otras funciones senoidales, cuyas frecuencias son múltiplos enteros de la frecuencia fundamental. A estas otras funciones senoidales se les conoce como armónicos.

### 2.3.8.-Distorsión armónica total (THD)

Es la proporción de la señal distorsionada respecto de la onda fundamental.

Existe la distorsión armónica total de tensión y de corriente.

$$THD(\%) = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{n=\infty} h_n}}{h_1} * 100\% \dots \dots (5) \dots \dots \dots (23)$$

**Donde:**

h1: Valor de onda fundamental

h2, h3, h4, ... hn: armónica presente en la señal

### 2.3.9.-Frecuencia fundamental (f1)

Frecuencia de la onda original (en el Perú es de 60 Hz)

### 2.3.10.-Orden de un armónico (n)

Número entero dado por la relación entre la frecuencia de un armónico y la frecuencia fundamental.

### **III.-VARIABLES E HIPÓTESIS**

#### **3.1.- Variables de investigación**

Las variables que intervienen son las siguientes:

**X:** Energía disipada comúnmente por un filtro pasivo para armónicos

**Y:** Energía recuperada por el nuevo filtro para armónicos.

Los indicadores para la variable "X" son los parámetros de entrada del nuevo filtro pasivo para armónicos, definidos por la tensión, la corriente y otros.

Los indicadores para la variable dependiente "Y" son los parámetros de salida del nuevo filtro pasivo para armónicos, definidos también por la tensión, la corriente y la potencia.

#### **3.2.- Operacionalización de variables**

El diseño del nuevo filtro para armónicos nos permite recuperar y aprovechar parte de la energía proveniente de la distorsión armónica que normalmente es disipada.

**Por su naturaleza,** todas las variables identificadas son del tipo cuantitativas.

**Por su dependencia,** la Variable X es independiente, y la variable Y es dependiente. Es decir:  $Y=f(X)$

**Tabla N° 3.1  
OPERACIONALIZACIÓN DE VARIABLES**

<b>VARIABLE</b>	<b>DIMENSIONES</b>	<b>INDICADORES</b>
<b>VARIABLE INDEPENDIENTE</b>  X: Energía disipada comúnmente por un filtros pasivo para armónicos	Impedancia	Resistencia de la bobina
		Reactancia inductiva
		Reactancia capacitiva
		Impedancia total
	Tensión	Tensión en la bobina
		Tensión en el condensador
		Tensión total
	Corriente	Corriente Total
	Frecuencia	Frecuencia fundamental
		Frecuencia del 3er armónico
	Potencia	Potencia de la bobina
		Potencia del condensador
		Potencia total
<b>VARIABLE DEPENDIENTE</b>  Y: Energía recuperada por el nuevo filtro para armónicos	Tensión	Tensión en el secundario
		Tensión rectificadora
	Corriente	Corriente máxima
	Potencia	Potencia de salida

**Fuente: elaboración propia**

### **3.3 Hipótesis general e hipótesis específicas**

#### **Hipótesis general**

**HG:** Diseñando un nuevo tipo de filtro para armónicos será posible aprovechar parte de la energía proveniente de la distorsión armónica que normalmente es disipada.

#### **Hipótesis específicas**

**H1:** Conociendo los métodos actuales para reducir el nivel de los armónicos será posible consolidar las bases teóricas para el diseño del nuevo filtro.

**H2:** Al determinar la potencia disipada por un filtro pasivo podremos conocer la cantidad de energía que podemos aprovechar con el nuevo filtro.

**H3:** La cantidad de potencia que podemos obtener de la distorsión armónica determinará la viabilidad técnica y económica del nuevo filtro.

Existen diferentes clases de filtros para armónicos, y dentro del tipo de filtros pasivos existe una variedad de tipologías, todos estos filtros están destinados a disipar la energía armónica de una red eléctrica. Debido a que no existe actualmente una máquina con la función de aprovechar la energía armónica en vez de disiparla, la patente del diseño de este nuevo tipo de filtro pasivo para armónicos está en proceso de aprobación, y su posterior estudio y mejoras permitirán obtener nuevas patentes. Se espera que en base al presente estudio se adquiera un mayor interés en la eficiencia del uso de la energía eléctrica.



## **IV.-METODOLOGÍA**

### **4.1.- Tipo de investigación**

La Investigación propuesta es del tipo experimental y aplicada

### **4.2.- Diseño de la investigación**

a) El diseño de la investigación es del tipo experimental.

b) El diseño de la presente investigación es: experimental y prospectivo.

#### **4.2.1.- Etapas de la investigación**

**Primera etapa:** Revisión de la teoría y normas legales vinculadas.

**Segunda etapa:** Análisis de la información y diseño del filtro.

**Tercera etapa:** Construcción de prototipo y pruebas de funcionamiento.

### **Resultados de la Investigación**

#### **4.3.- Población y muestra**

##### **Población**

El experimento se realizó en un laboratorio implementado en mi domicilio y en el laboratorio de máquinas eléctricas de la Facultad de Ingeniería Eléctrica y Electrónica de la Universidad Nacional del Callao. Se armó un circuito serie formado por un condensador y el primario de un transformador y se conectaron los terminales a la red eléctrica buscando la frecuencia de resonancia del circuito. La población está conformada por las combinaciones de condensadores y transformadores en serie realizadas en esta experiencia.

## **Muestra**

Debido a que el diseño de esta investigación es experimental se ha elegido una muestra no probabilística que depende del criterio del investigador y no de la probabilidad, la validez de esta muestra se consolida con la repetición. Por lo tanto se decidió que la muestra sea igual a la población.

### **4.4.- Técnicas e instrumentos de recolección de datos.**

#### **4.4.1.- Técnica de recolección de datos:**

Mediante la recolección de datos se obtuvieron los parámetros de los componentes y los valores nominales a los cuales fue sometido el nuevo filtro.

La recolección de datos se llevó a cabo con la medición de parámetros de manera directa e indirecta mediante el uso de voltímetros, amperímetros, osciloscopio, analizador de redes y la aplicación de fórmulas y funciones en Excel, así como la simulación del mismo circuito en el software Simulink de Matlab.

#### **4.4.2.- Técnica de evaluación de los resultados cuantitativos del monitoreo de los parámetros eléctricos:**

Mediante la aplicación de esta técnica se realizó la optimización en el uso de este nuevo filtro.

La base de toda esta investigación es el fenómeno de la resonancia eléctrica producida por una inductancia y una capacitancia en serie. Es posible llegar a la misma frecuencia de resonancia con una infinita cantidad de combinaciones de estos elementos. La diferencia radica en que cada combinación de valores origina diferentes corrientes y voltajes en el condensador y la bobina.

La técnica utilizada fue la combinación física y virtual de diferentes capacitores y bobinas para llegar a la misma frecuencia de resonancia. Se midieron los parámetros y se compararon, encontrando así la mejor combinación de ellos para lograr el objetivo.

Se procedió a evaluar todos los resultados del experimento físico ya que la población no era muy grande, es decir, la muestra es igual a la población. Para la simulación en Matlab también se evaluaron todos los resultados, en esta simulación se consideró una onda fundamental con una onda armónica de orden 3.

#### **4.4.3.- Evaluación técnica y económica del proyecto:**

A continuación se presentan los costos reales para la fabricación de un filtro, tomando como referencia el filtro correspondiente al capacitor cuyo valor es 11.7 uF

<b>DESCRIPCIÓN</b>	<b>COSTO</b>
Alambre #20 AWG (388vueltas)	S/ 12.00
Alambre #21 AWG (110 vueltas)	S/ 10.00
Núcleo magnético	S/ 30.00
Capacitor 10 uf	S/ 15.00
Capacitor 2 uf	S/ 7.00
Consumibles	S/ 20.00
Mano de obra	S/ 100.00
Total	S/ 194.00

El nuevo filtro para armónicos

Potencia consumida: 0.10013 KW

Potencia recuperada: 0.04045 KW

Potencia disipada: 0.05968 KW

Energía consumida en un mes (72 horas): 72.0936 KWh

Energía recuperada en un mes (72 horas): 29.124 KWh

Energía disipada en un mes (72 horas): 42.9696KWh

Costo por KWh según Edelnor en tarifa BT5B: 0.4175

Costo de energía consumida en un mes: S/ 30.10

Costo de energía recuperada en un mes: S/ 12.16

Costo de energía disipada en un mes: S/ 17.94

El ahorro generado en energía recuperada mediante por el uso del nuevo filtro para armónicos durante 15 meses cubre el costo de la fabricación del filtro. Esto comparado con la energía disipada por un filtro convencional que no genera ahorro sino solamente consume energía.

Mediante la evaluación técnica y económica queda demostrado el beneficio de instalar el nuevo filtro en comparación con un filtro pasivo.

Durante el proceso de ensayo, se ha tomado en cuenta la medición de la potencia disipada para cada combinación de elementos que forman un filtro pasivo paralelo. Dichos datos han sido analizados y se muestra cuanta potencia disipó cada filtro, así como cuanta potencia se pudo recuperar utilizando este nuevo filtro.

El beneficio no es en sí una ganancia sino un ahorro, de esta manera se llegó a la conclusión de que el nuevo tipo de filtro diseñado puede recuperar hasta el 60% de la potencia que disipa un filtro convencional.

En una red con una elevada distorsión armónica, ésta puede llegar a proveer de una significativa cantidad de potencia recuperada.

#### **4.5 Procedimientos de recolección de datos:**

Para la recolección de datos y obtención de resultados, en primer lugar se realizaron mediciones de los valores de los elementos que componen el nuevo filtro. También se revisaron los valores nominales de cada elemento proporcionados por el fabricante.

Luego, una vez armado el nuevo filtro se sometió al efecto de una onda fundamental (60Hz) afectada por ondas armónicas, y se realizó la medición de los parámetros eléctricos en cada ensayo. Se utilizaron para tal efecto instrumentos de laboratorio como: Inyectores de señales, fuente VAC variable, Osciloscopio digital, multímetros, analizador de redes, entre otros. También se utilizó el software especializado SIMULINK y el MS EXCEL para contrastar los resultados y probar la efectividad del nuevo filtro con otras frecuencias armónicas.

##### **4.5.1.- Parámetros de los elementos del filtro:**

El filtro básicamente se compone de dos elementos, el condensador y el transformador.

En el caso de los condensadores se han tomado los valores de fábrica y se han comprobado las capacidades utilizando un capacímetro.

En el caso de los transformadores en primer lugar se muestran los parámetros del alambre que se utilizó para los bobinados.

A continuación se indican los valores en las tablas correspondientes. (Véase Tabla N° 4.1 y Tabla N° 4.2)

**Tabla N° 4.1**  
**CAPACIDAD DE LOS CONDENSADORES UTILIZADOS**

<b>CONDENSADORES</b>	<b>Capacidad (F)</b>
5XC1.C2	1.83E-07
C1.C2.C3.C5.C8	4.99E-07
C1.C2.C3	5.56E-07
C1.C2	6.75E-07
C1	1.01E-06
C2.C3	1.24E-06
C2	2.05E-06
C3.15	3.15E-06
C5	4.95E-06
C8	8.10E-06
C10	1.00E-05
C10//C1	1.10E-05
C10//C2	1.20E-05
C10//C5	1.50E-05
C20	2.00E-05
C20//C5	2.50E-05
C20//C10	3.00E-05
C20//C10//C10	4.00E-05
C45	4.50E-05
C45//C10//C10	6.50E-05
C45//C20//C10	7.50E-05
C400	4.00E-04

**Fuente: Elaboración propia**

**Tabla N° 4.2  
CARACTERÍSTICAS DEL ALAMBRE USADO**

<b>ALAMBRE DE COBRE PARA BOBINA</b>			
<b>A.W.G.</b>	<b>Diámetro (mm)</b>	<b>Sección (mm<sup>2</sup>)</b>	<b>Amperaje (A)</b>
11	2.305	4.172	12
12	2.053	3.309	9.5
13	1.828	2.624	7.5
14	1.628	2.081	6
15	1.45	1.65	4.8
16	1.291	1.309	3.7
17	1.15	1.038	3.2
18	1.024	0.823	2.5
19	0.912	0.653	2
20	0.812	0.518	1.6
21	0.7229	0.41	1.2
22	0.644	0.326	0.92
23	0.573	0.258	0.73
24	0.511	0.205	0.58
25	0.455	0.162	0.46
26	0.405	0.129	0.37
27	0.361	0.102	0.29
28	0.321	0.081	0.23
29	0.286	0.064	0.18
30	0.255	0.051	0.15
31	0.227	0.04	0.11
32	0.202	0.032	0.09
33	0.18	0.025	0.072
34	0.16	0.02	0.057
35	0.143	0.016	0.045
36	0.127	0.013	0.036
37	0.113	0.01	0.028
38	0.101	0.00797	0.022
39	0.09	0.00632	0.017
40	0.07987	0.00501	0.014

**Fuente: Elaboración propia**

#### 4.5.2.- Parámetros de la tensión de alimentación:

El filtro fue conectado directamente a la red eléctrica o a una fuente alterna, teniendo especial cuidado de conservar siempre los siguientes parámetros:

Voltaje: 220 V  
Frecuencia: 60 Hz  
Conexión: Monofásica

#### 4.5.3.- Procedimientos para hallar la inductancia en las bobinas

##### a) Medición de inductancia utilizando un medidor RCL

Para comprobar el valor de los componentes como resistencias, condensadores e inductancias se utilizaron 2 medidores LCR de componentes pasivos (Véase Figura N° 4.1 y Figura N° 4.2):

**Figura N° 4.1: Medidor EXTECH LCR Meter modelo 380193**



**Fuente: Elaboración propia**



**Figura N° 4.2: Medidor PRASEK Premium PR-602**



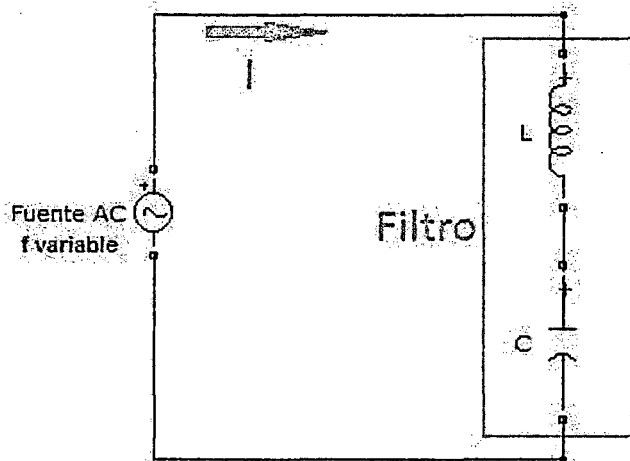
**Fuente: Elaboración propia**

Estos instrumentos nos brindaron las medidas directas de la resistencia de las bobinas y la capacidad de los condensadores, pero hubo mucha imprecisión en la medida de las impedancias ya que los parámetros de las bobinas cambian cuando varía la cantidad de corriente que atraviesa sus espiras. Regularmente estos instrumentos son usados para medir impedancias que trabajan a bajos niveles de tensión y corriente.

**b) Medición indirecta por variación de frecuencia.**

El segundo método por el cual se comprobó el valor de las inductancias de las bobinas fue utilizando una fuente de frecuencia variable. La Figura N° 4.3 nos muestra la topología del circuito:

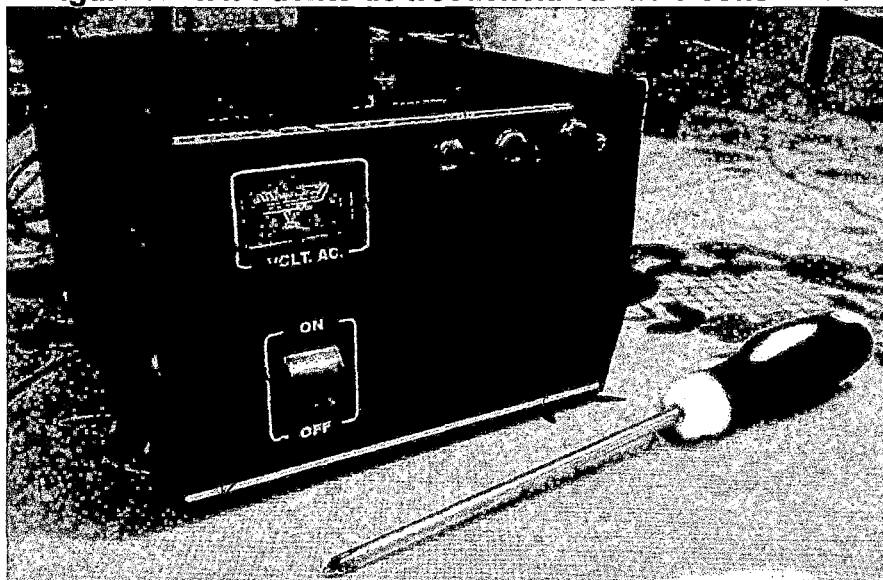
**Figura N° 4.3: Topología del circuito**



**Fuente: Elaboración propia**

Para tal efecto se construyó una fuente de frecuencia variable (Véase Figura N° 4.4) que nos pudo suministrar mayor potencia que el inyector de señales del laboratorio

**Figura N° 4.4: Fuente de frecuencia variable construida**



**Fuente: Elaboración propia**

La figura nos muestra la fuente de frecuencia variable, la nos permite saber cuál es la frecuencia de resonancia del circuito formado por una bobina y un capacitor

Conociendo el valor del capacitor y la frecuencia de resonancia se encuentra el valor de la inductancia mediante la fórmula:

$$f = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \dots\dots\dots(24)$$

Las desventajas de este artefacto son las siguientes:

Potencia de trabajo limitada, ya que obtenía tensión alterna a partir de una fuente de tensión continua.

Frecuencia variable limitada (hasta 1Khz), aunque esto fue suficiente para estudiar el tercer armónico.

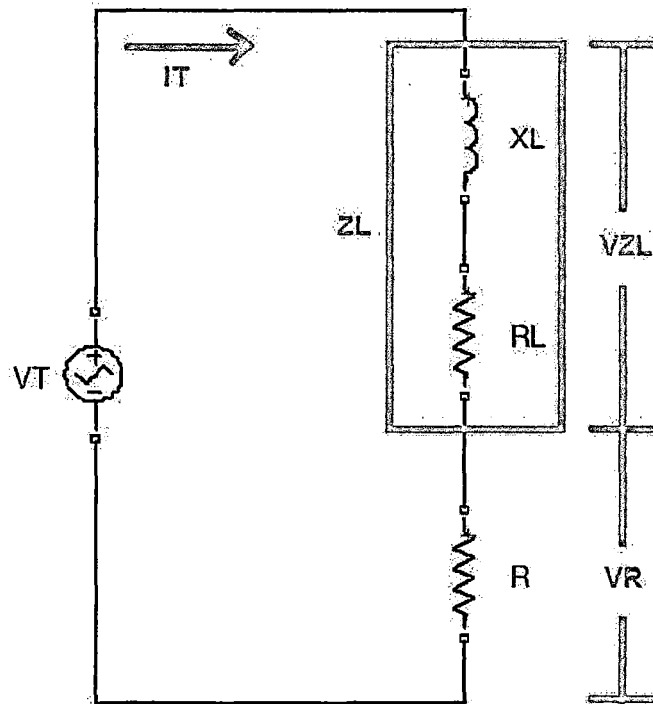
Forma de onda no senoidal.

Este sería el mejor método para construir las bobinas, para lo cual se deben subsanar las desventajas que actualmente tiene.

**c) Medición indirecta de la inductancia con resistencia**

Uno de los métodos utilizados en esta experiencia para hallar el valor de la inductancia de una bobina o un transformador fue el método indirecto utilizando una resistencia en serie con el elemento a medir, lo describiré a continuación:

**Figura N° 4.5: Topología del circuito**

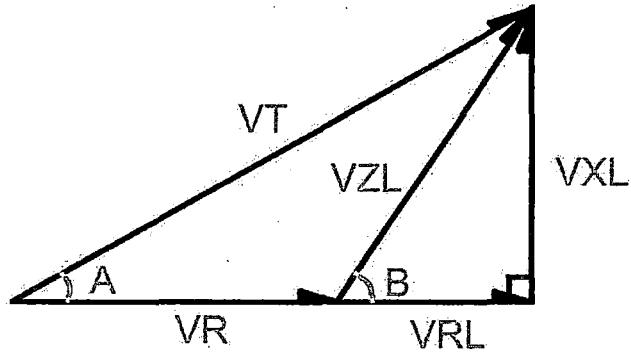


**Fuente: Elaboración propia**

En la Figura N° 4.5 podemos observar la impedancia  $Z_L$  conformada por la reactancia inductiva  $X_L$  y la resistencia propia del devanado  $R_L$ , y a la resistencia  $R$  que está conectada en serie con  $Z_L$ , ambas conectadas a los terminales de la fuente  $V_T$ .

Al obtener la medición de los parámetros como tensiones, corriente, y resistencia, procedimos a graficar el siguiente diagrama vectorial (Véase Figura N° 4.6):

**Figura N° 4.6: Diagrama vectorial**



**Fuente: Elaboración propia**

Aplicando la Ley de Cosenos a la figura tenemos:

$$V_{ZL}^2 = V_T^2 + V_R^2 - 2(V_T)(V_R)\cos(A) \dots\dots\dots(25)$$

De aquí obtenemos el valor de "A" despejando:

$$A = \text{ARCOS} \left( \frac{V_T^2 + V_R^2 - V_{ZL}^2}{2(V_T)(V_R)} \right) \dots\dots\dots(26)$$

Una vez encontrado el valor de A podemos hallar VLR y VXL:

Hasta ahora los datos son: VT, VZL, VR, IT, A

$$\text{Sen}(A) = \sqrt{1 - \text{Cos}^2(A)} \dots\dots\dots(27)$$

$$V_{XL} = V_T \text{Sen}(A) \dots\dots\dots(28)$$

También:

$$\cos(A) = \frac{V_R + V_{RL}}{V_T} \dots\dots\dots(29)$$

De aquí:

$$V_{RL} = V_T \cos(A) - V_R \dots\dots\dots(30)$$

Luego se toma en cuenta que:

$$R_L = \frac{V_{RL}}{I} \dots\dots\dots(31)$$

$$X_L = \frac{V_L}{I} \dots\dots\dots(32)$$

$$X_L = 2\pi fL \dots\dots\dots(33)$$

De aquí:

$$L = \frac{X_L}{2\pi f} \dots\dots\dots(34)$$

De esta manera obtuvimos el valor de la inductancia y la resistencia interna de las impedancias utilizadas en el proceso.

#### **4.5.4.- Construcción y medidas de las bobinas:**

Las bobinas fueron fabricadas utilizando alambre de cobre esmaltado de diversos calibres, enrollando las espiras sobre una base de plástico tal como se muestra en la Figura N°4.17.

Las dimensiones de las bases para las bobinas se aprecian en la tabla N° 4.3, y la cantidad de espiras en cada bobinado se puede apreciar en la Tabla N° 4.4.

La construcción de los transformadores, conformados por núcleos y bobinas fue ejecutada de manera artesanal, lo cual reduce la eficiencia de la máquina e incrementa las pérdidas de potencia. Para evitar estas pérdidas se recomienda encargar la confección de las bobinas y el armado de los núcleos a personas o empresas especializadas en el rubro.

Se utilizaron tres tamaños de bases para las bobinas y en base a ellas se eligieron los núcleos. En estas bases se enrollaron diferentes números de espiras en cada bobina para así tener diferentes transformadores.

Las variaciones no solo fueron en la cantidad de espira por bobina sino también se consideró el uso de diferente diámetro de alambre esmaltado.

**Tabla N° 4.3**  
**DIMENSIONES DE LAS BASES PARA LAS BOBINAS**

<b>DIMENSIONES DE LAS BASES PARA LAS BOBINAS</b>		
<b>Núcleo</b>	<b>Altura</b>	<b>Lado</b>
	<b>Bobina</b>	<b>Bobina</b>
	<b>mm</b>	<b>mm</b>
<b>I</b>	<b>17</b>	<b>15</b>
<b>II</b>	<b>33</b>	<b>29</b>
<b>III</b>	<b>62</b>	<b>47</b>

**Fuente: Elaboración propia**

**Tabla N° 4.4**  
**NÚMERO DE ESPIRAS DE LAS BOBINAS UTILIZADAS**

BOBINAS CÓDIGO	Núcleo	PRIMARIO		SECUNDARIO	
		Espiras	Calibre AWG	Espiras	Calibre AWG
I-2000-35	I	2000	35		
I-2000-A	I	2000	35		
I-2000-B	I	2000	35		
I-400-23	I	400	23		
I-400-26	I	400	26		
I-560-26	I	560	26		
I-800-30	I	800	30		
II-350-30	II	350	30	50	30
II-350-30+50-30+RECTIFCARGA	II	350	30	50	30
II-374-23	II	374	23	40	23
II-374-23+40-23+RECTIF	II	374	23	40	23
II-400-26	II	400	26	45	21
II-400-26+45-21	II	400	26	45	21
II-150-21+100-21+RECTIF	II	150	21	100	21
III-204-17	III	204	17	30	20
III-204-17+30-20+RECTIF	III	204	17	30	20
III-180-26+24-26+RECTIF	III	180	26	24	26
III-150-17+30-20+RECTIF	III	150	17	30	20
III-388-21+48-21	III	388	20	48	21
III-388-20+48-21+RECTIF	III	388	20	48	21
III-388-20+110-21	III	388	20	110	21
III-388-20+285-21	III	388	20	285	21
III-610-21+630-23	III	610	21	630	23

**Fuente: Elaboración propia**

#### **4.5.5 Procedimiento para encontrar los valores de los condensadores:**

Los condensadores utilizados para esta investigación son de la marca COMAR (Véase Figura N° 4.7), y sus capacidades varían entre 1 y 400 uf, considerando también la combinación de ellos para lograr otros valores



adicionales. Para prevenir cualquier deterioro por superar la tensión de 220V decidí utilizar los condensadores con tensión nominal de 440V.

**Figura N° 4.7: Condensadores utilizados**

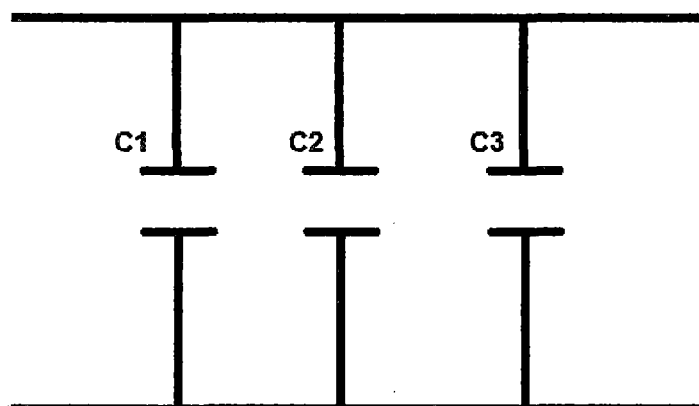


**Fuente: Elaboración propia**

Para obtener una mayor variedad de capacidades se ha considerado acoplarlos en paralelo y en serie teniendo las siguientes consideraciones:

**Acoplamiento en paralelo:**

**Figura N° 4.8: Acoplamiento paralelo de condensadores**



**Fuente: Elaboración propia**

Capacidad Total (CT):

$$CT = C1 + C2 + C3 \dots \dots \dots (35)$$

Carga Total (QT):

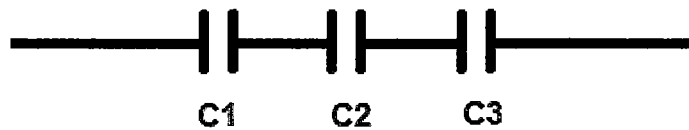
$$QT = Q1 + Q2 + Q3 \dots \dots \dots (36)$$

Voltaje Total (VT):

$$VT = V1 = V2 = V3 \dots \dots \dots (37)$$

**Acoplamiento en serie:**

**Figura N° 4.9: Acoplamiento serie de condensadores**



**Fuente: Elaboración propia**

Capacidad Total (CT):

$$CT = \frac{1}{\frac{1}{C1} + \frac{1}{C2} + \frac{1}{C3}} \dots \dots \dots (38)$$

Carga Total (QT):

$$QT = \frac{1}{\frac{1}{Q1} + \frac{1}{Q2} + \frac{1}{Q3}} \dots \dots \dots (39)$$

Voltaje Total (VT):

$$VT = V1 + V2 + V3 \dots \dots \dots (40)$$

**Tabla N° 4.5  
PARÁMETROS DE LOS CONDENSADORES**

Placa	Medidor		Calculado			
	Capacidad(F)	R(Ohm)	TENSIÓN	XL (60HZ)	In (A)	Qn(VAR)
(5)1uF//2uF	1.83E-07	0.52	440	14,473.19	0.03	13.38
1uF//2uF//3.15uF 5uF//8uF	4.99E-07	0.52	440	5,313.35	0.08	36.44
1uF//2uF//3.15uF	5.56E-07	0.52	440	4,770.84	0.09	40.58
1uF//2uF	6.75E-07	0.52	440	3,929.29	0.11	49.27
1uF	1.01E-06	0.52	440	2,635.98	0.17	73.45
2 uF // 3.15 uF	1.24E-06	0.52	440	2,134.87	0.21	90.68
2 uF	2.05E-06	0.36	440	1,293.31	0.34	149.69
3.15 uF	3.15E-06	0.36	440	841.56	0.52	230.05
5 uF	4.95E-06	0.34	440	535.88	0.82	361.28
8 uF	8.10E-06	0.29	440	327.68	1.34	590.82
10 uF	1.00E-05	0.25	440	265.26	1.66	729.85
11 uF	1.10E-05	0.24	440	241.14	1.82	802.84
12 uF	1.20E-05	0.23	440	221.05	1.99	875.83
15 uF	1.50E-05	0.23	440	176.84	2.49	1,094.78
C20	2.00E-05	0.23	440	132.63	3.32	1,459.71
25 uF	2.50E-05	0.23	440	106.10	4.15	1,824.64
30 uF	3.00E-05	0.23	440	88.42	4.98	2,189.56
40 uF	4.00E-05	0.23	440	66.31	6.64	2,919.42
45 uF	4.50E-05	0.23	440	58.95	7.46	3,284.35
65 uF	6.50E-05	0.23	440	40.81	10.78	4,744.06
75 uF	7.50E-05	0.23	440	35.37	12.44	5,473.91
400 uF	4.00E-04	0.25	440	6.63	66.35	29,194.19

**Fuente: Elaboración propia**

**(CA//CB: CA en paralelo con CB)**

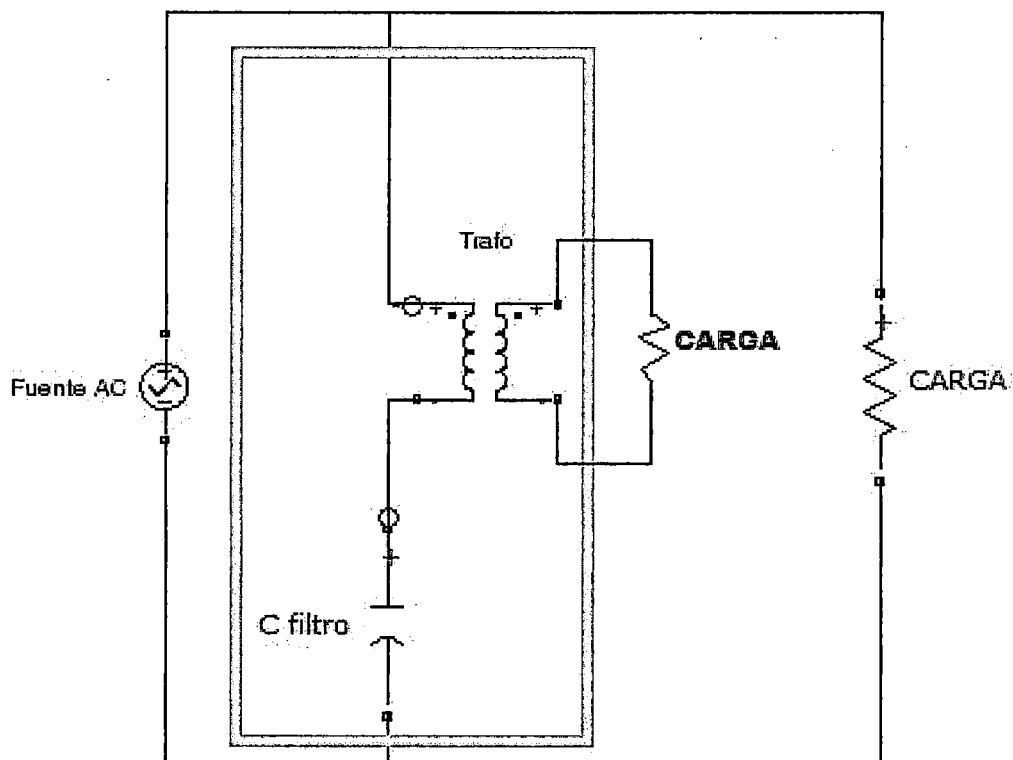
#### 4.5.6.-Topología del circuito y fundamento teórico:

El circuito del nuevo filtro diseñado está basado en el filtro pasivo paralelo que está formado por un condensador en serie con una bobina.

La diferencia que da origen al nuevo tipo de filtro pasivo es que se ha reemplazado el uso de la bobina individual por la bobina primaria de un transformador con la finalidad de transmitir magnéticamente la onda distorsionada a otra bobina (al secundario del transformador).

El circuito resultante se muestra en la Figura N° 4.10:

**Figura N° 4.10: Circuito de nuevo filtro pasivo**



**Fuente: Elaboración propia**

Partimos de la premisa de que el transformador puede ser representado por una reactancia inductiva, en consecuencia es posible hacerlo resonar a una frecuencia determinada al conectarlo en serie con un condensador. A la impedancia formada por estos dos componentes y sus respectivas resistencias internas la hemos representado así:

$$Z = R + j\left(\omega_0 L - \frac{1}{\omega_0 C}\right) \quad (41)$$

Al encontrar experimentalmente la frecuencia de resonancia se comprobó que la reactancia capacitiva es igual a la inductiva, por lo cual:

$$\omega_0 L = \frac{1}{\omega_0 C} \quad (42)$$

De aquí despejo la frecuencia angular:

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{1}{L \cdot C}} \quad (43)$$

Y luego despejo la frecuencia:

$$f = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (44)$$

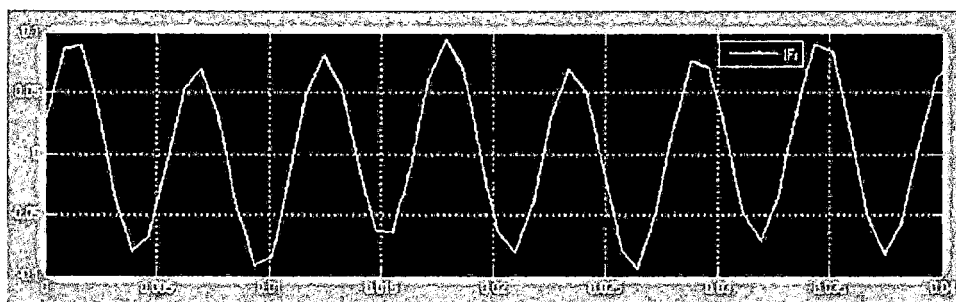
Con este procedimiento tenemos la frecuencia de resonancia del circuito serie Transformador / Condensador.

El transformador fue fabricado teniendo los siguientes criterios:

- La inductancia del transformador es directamente proporcional al número de vueltas del primario y del secundario.
- La inductancia del transformador es directamente proporcional al área transversal ocupada por la bobina del primario y del secundario.
- La inductancia del transformador es inversamente proporcional a la altura de la bobina del primario y del secundario.

El filtro fabricado de esa manera transmite la misma forma de onda desde el primario hacia el secundario del transformador, según se aprecia en la figura N° 4.11

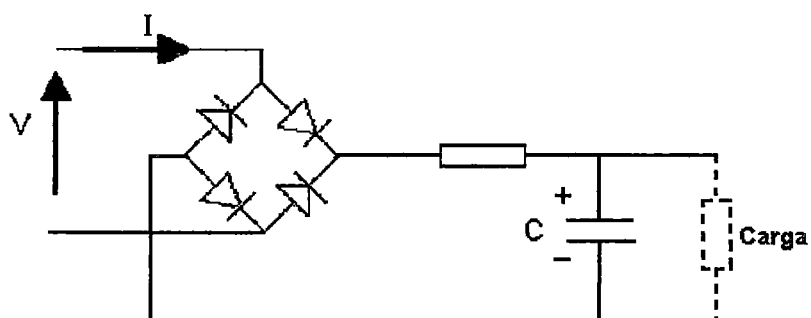
**Figura N° 4.11 : Onda de corriente del filtro**



**Fuente: Elaboración propia**

Es necesario rectificar dicha onda, para lo cual se utilizó un puente de diodos de la serie 1N 400XS y un condensador de 4700 uF / 400V, obteniendo así corriente continua a la salida. El circuito rectificador se muestra en la Figura N° 4.12.

**Figura N° 4.12: Circuito rectificador de onda completa**

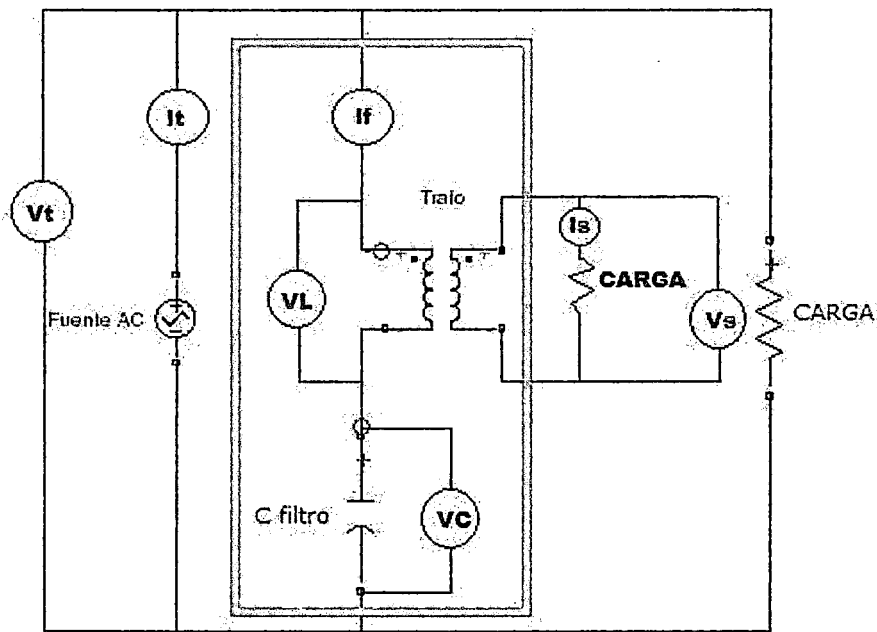


**Fuente: Elaboración propia**

#### 4.5.7.-Medición de parámetros:

Se realizaron las siguientes mediciones según lo propuesto en la figura siguiente:

Figura N° 4.13: Medición de parámetros en nuevo filtro



Fuente: Elaboración propia

- $V_t$ : Voltaje total o voltaje de la fuente.
- $I_t$ : Corriente total o corriente de la fuente.
- $I_f$ : Corriente consumida por el filtro.
- $V_L$ : Voltaje del primario del transformador.
- $V_C$ : Voltaje del condensador.
- $V_s$ : Voltaje del secundario del transformador.
- $I_s$ : Corriente del secundario del transformador.

Adicionalmente se tomó gráficamente la frecuencia, la forma de onda y la distorsión armónica mediante un osciloscopio y un analizador de redes.

Se comprobó directa e indirectamente la capacidad de los condensadores, así como la inductancia y la resistencia de las bobinas de los transformadores. Para obtener estos datos se procedió a fabricar el filtro, el proceso se detalla a continuación.

#### **4.5.8.-Construcción de transformadores:**

Para llevar a cabo el experimento realicé pruebas con transformadores armados por mí mismo, con cada uno de ellos comprobé como los valores de los parámetros eléctricos variaban según iba modificando la forma del núcleo, el número de espiras de las bobinas, las dimensiones del núcleo, entre otras variables.

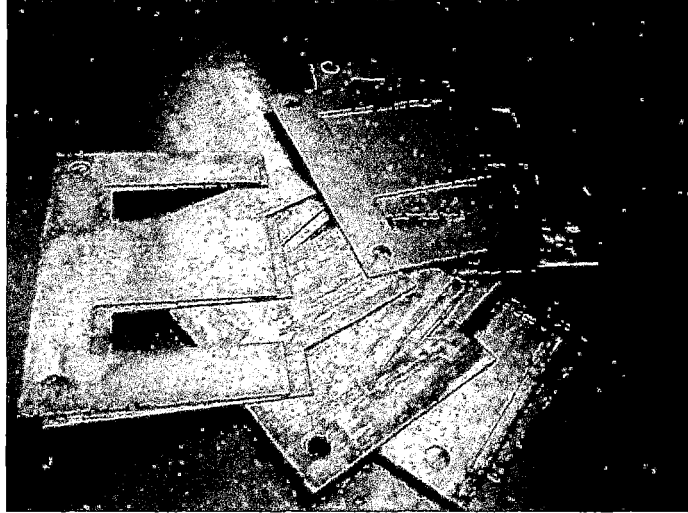
Un mismo transformador fue probado con diferentes combinaciones de condensadores, con estas combinaciones se encontraban diferentes frecuencias de resonancia que eran anotadas en una tabla.

Aquí muestro el procedimiento del armado del primer transformador que permitió demostrar la variación de la inductancia del primario respecto a la cantidad de espiras del secundario y también la variación de la inductancia respecto al circuito magnético formado por el núcleo del transformador.

Paso 1: Se selecciona las dimensiones del núcleo y la cantidad de láminas que lleva, lo cual coincidió con las dimensiones del soporte de las bobinas (Ver Figura N° 4.14).



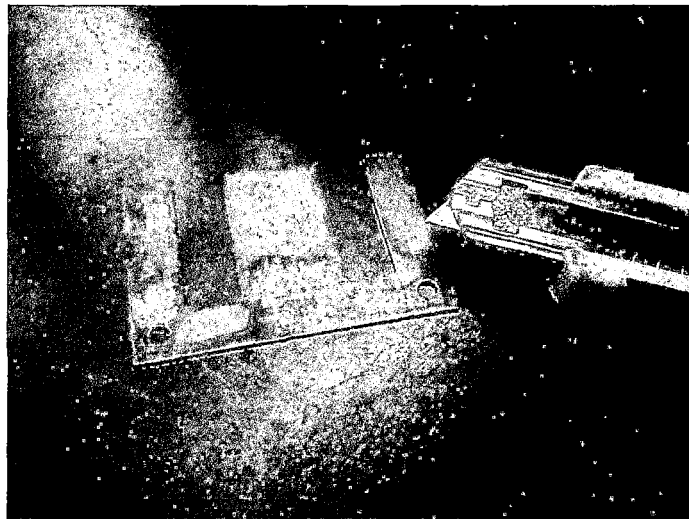
**Figura N° 4.14: Selección de núcleo**



**Fuente: Elaboración propia**

Paso 2: Se eliminó la parte central de cada lámina con una herramienta, esto nos permitió tener un núcleo removible e intercambiar las bobinas las veces necesarias (Ver Figura 4.15).

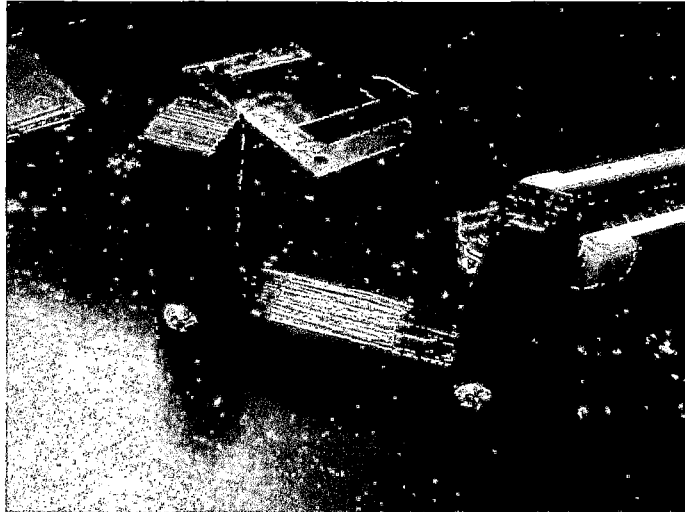
**Figura N° 4.15: Modificación de núcleo**



**Fuente: Elaboración propia**

Paso 3: Se apilaron todas las láminas uniéndolas firmemente con un par de tornillos (Ver Figura 4.16).

**Figura N° 4.16: Unión de láminas del núcleo**



**Fuente: Elaboración propia**

Paso 4: Prueba que entren las bases para las bobinas sin ningún problema (Ver Figura N° 4.17).

**Figura N° 4.17: Prueba de bases en núcleo**

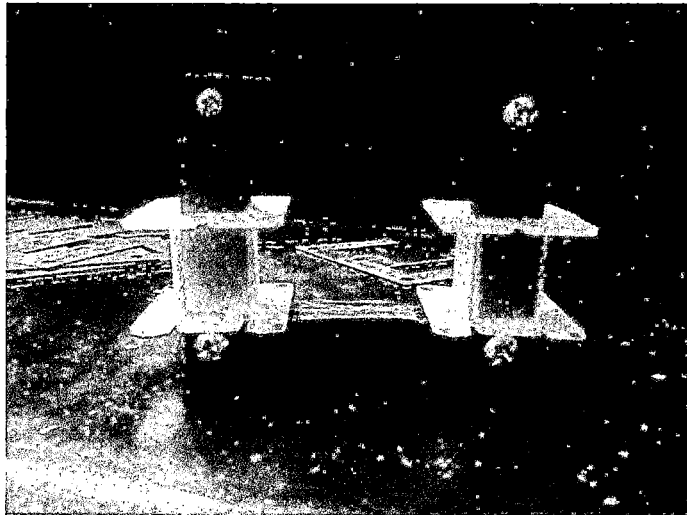


**Fuente: Elaboración propia**

Paso 5: Unir de la misma manera la parte faltante del núcleo magnético y se alinea con el resto para que formen un circuito cerrado. Las pérdidas

son considerables por lo cual se asume una mejor eficiencia en una máquina que tenga las partes fijas (Ver Figura N° 4.18).

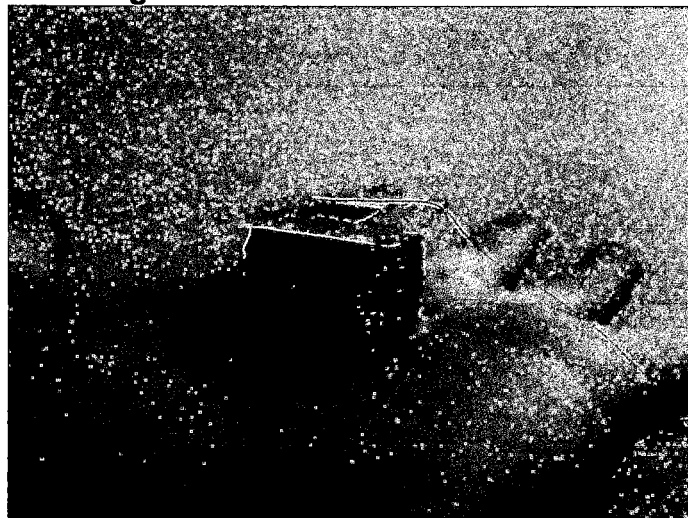
**Figura N° 4.18: Armado de núcleo desmontable**



**Fuente: Elaboración propia**

Paso 6: Se procedió a envolver el alambre de cobre en las bases para formar la bobina, se hicieron varias bobinas de diferentes calibres y número de espiras. Se tuvo especial cuidado de etiquetar cada bobina con estos dos datos (Ver Figura N° 4.19).

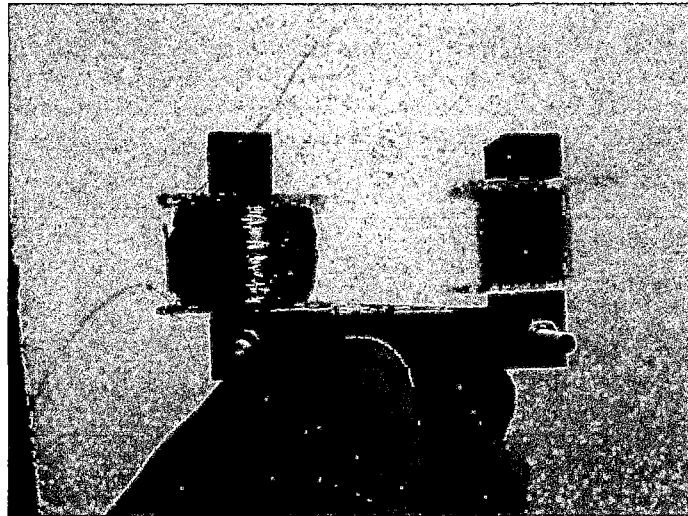
**Figura N° 4.19: Armado de bobina**



**Fuente: Elaboración propia**

Paso 7: Se ubicó la bobina en el núcleo magnético dejando los dos extremos de la bobina libres de esmalte (Ver Figura N° 4.20).

**Figura N° 4.20: Ubicación de bobina en núcleo**



**Fuente: Elaboración propia**

#### **4.5.9.- Toma de datos:**

En las tablas N° 4.6 y 4.7 se muestran los datos tomados directamente como son: voltaje total (VT), voltaje de primario del transformador (VL), voltaje del condensador (VC), corriente (I), frecuencia (f), resistencia del primario del transformador (RL) y resistencia del condensador (RC).

También se muestran los datos calculados utilizando la hoja de cálculo de Ms Excel y comparado con los datos obtenidos de la simulación en el software Simulink de Matlab. Entre todos, los principales datos son los valores de la inductancia (L) y la capacidad del condensador (C). Los cuales coincidieron con los valores obtenidos de la placa de los condensadores y con los valores obtenidos por otro método. Con esa seguridad pudimos obtener también la frecuencia de resonancia de cada combinación de elementos.

**Tabla N° 4.6: MEDICIÓN DE PARÁMETROS DEL FILTRO**

VT (V)	I (A)	VRL (V)	VLL (V)	VL (V)	VRC (V)	VCC (V)	VC (V)	RL (Ohm)	XL (Ohm)	ZL (Ohm)	RC (Ohm)	XC (Ohm)	ZC (Ohm)	L (H)	C (F)	f(Hz) reson.
219	0.82	40.44	34.41	53.1	4.818	-248.85	249	49.44	42.07	64.91	5.89	304.22	304.28	0.1116	8.72E-06	161.35
221	0.72	38.3	30.561	49	4.2526	-247.46	248	53.05	42.33	67.87	5.89	342.75	342.8	0.1123	7.74E-06	170.74
221	0.62	35.45	23.436	42.5	3.6636	-240.37	240	57	37.68	68.33	5.89	386.45	386.5	0.1	6.86E-06	192.15
220	0.67	37.65	26.942	46.3	3.9463	-243.17	243	56.2	40.21	69.1	5.89	362.94	362.99	0.1067	7.31E-06	180.26
220	0.09	31.88	45.556	55.6	0.5007	-263.5	264	375	535.95	654.12	5.89	3,099.99	3,100.00	1.4217	8.56E-07	144.3
222	0.66	29.8	44.43	53.5	3.858	-263.47	264	45.5	67.83	81.68	5.89	402.25	402.29	0.1799	6.59E-06	146.11
221	0.45	24.14	31.14	39.4	2.6328	-250.19	250	54	69.67	88.14	5.89	559.7	559.73	0.1848	4.74E-06	170.07
222	0.37	20.29	25.643	32.7	2.197	-246.69	247	54.4	68.75	87.67	5.89	661.37	661.39	0.1824	4.01E-06	186.1
225	0.65	11.99	9.345	15.2	3.8167	-233.27	233	18.5	14.42	23.46	5.89	359.98	360.03	0.0383	7.37E-06	299.77
226	0.65	14.19	7.389	16	3.8521	-232.97	233	21.7	11.3	24.46	5.89	356.22	356.27	0.03	7.45E-06	336.91
227	0.66	13.48	9.158	16.3	3.8933	-234.97	235	20.4	13.85	24.66	5.89	355.47	355.52	0.0368	7.46E-06	303.92
220	0.72	27.58	46.193	53.8	4.2526	-263.97	264	38.2	63.98	74.52	5.89	365.6	365.65	0.1697	7.26E-06	143.43
220	0.69	27.84	43.205	51.4	4.0818	-260.57	261	40.18	62.34	74.17	5.89	376	376.05	0.1654	7.05E-06	147.35
220	0.42	16.88	10.349	19.8	2.4856	-228.79	229	40	24.52	46.92	5.89	542.15	542.18	0.0651	4.89E-06	282.11
220	0.62	32.97	10.155	34.5	3.6518	-226.57	227	53.18	16.38	55.65	5.89	365.44	365.48	0.0435	7.26E-06	283.41
221	0.43	23.78	10.76	26.1	2.5327	-229.99	230	55.3	25.02	60.7	5.89	534.85	534.88	0.0664	4.96E-06	277.4
222	0.96	53.68	26.354	59.8	5.6662	-239.93	240	55.8	27.4	62.16	5.89	249.41	249.48	0.0727	1.06E-05	181.04

VT (V)	I (A)	VRL (V)	VLL (V)	VL (V)	VRC (V)	VCC (V)	VC (V)	RL (Ohm)	XL (Ohm)	ZL (Ohm)	RC (Ohm)	XC (Ohm)	ZC (Ohm)	L (H)	C (F)	f(Hz) reson.
219	0.82	40.44	34.41	53.1	4.818	-248.85	249	49.44	42.07	64.91	5.89	304.22	304.28	0.1116	8.72E-06	161.35
224	0.05	15.89	17.182	23.4	0.2651	-240.7	241	353	381.83	520	5.89	5,348.89	5,348.89	1.0128	4.96E-07	224.57
224	0.06	24.38	29.408	38.2	0.3711	-252.1	252	387	466.79	606.35	5.89	4,001.58	4,001.59	1.2382	6.63E-07	175.67
219	0.06	26.85	27.312	38.3	0.3711	-244.6	245	426.2	433.52	607.94	5.89	3,882.54	3,882.54	1.15	6.83E-07	179.56
221	0.07	33.7	32.766	47	0.4241	-250.7	251	468	455.08	652.78	5.89	3,481.94	3,481.94	1.2071	7.62E-07	165.97
225	0.1	51.58	53.057	74	0.6126	-271.7	272	496	510.17	711.54	5.89	2,612.49	2,612.50	1.3533	1.02E-06	135.78
223	0.06	11.69	11.647	16.5	0.3416	-234.3	234	201.5	200.82	284.48	5.89	4,039.65	4,039.66	0.5327	6.57E-07	269.1
223	0.09	26.59	16.704	31.4	0.5419	-238.4	238	289	181.57	341.3	5.89	2,591.30	2,591.30	0.4816	1.02E-06	226.67
224	0.2	65.69	32.97	73.5	1.1898	-247.1	247	325.2	163.22	363.86	5.89	1,223.25	1,223.27	0.433	2.17E-06	164.26
220	0.1	85.26	19.209	87.4	0.5713	-221.2	221	879	198.03	901.03	5.89	2,280.40	2,280.41	0.5253	1.16E-06	203.61
218	0.09	70.12	10.474	70.9	0.5478	-217	217	754	112.63	762.37	5.89	2,333.33	2,333.33	0.2988	1.14E-06	273.1
223	0.15	144	3.229	144	0.8776	-172.5	173	966.2	21.67	966.44	5.89	1,157.70	1,157.72	0.0575	2.29E-06	438.56
224	0.18	173	1.052	173	1.0838	-141.5	142	940.2	5.72	940.22	5.89	769	769.02	0.0152	3.45E-06	695.77
226	0.1	89.78	16.595	91.3	0.5654	-223.2	223	935.2	172.86	951.04	5.89	2,324.99	2,325.00	0.4585	1.14E-06	220.05
226	0.15	160.3	15.457	161	0.8894	-173.1	173	1061.3	102.36	1,066.23	5.89	1,146.34	1,146.36	0.2715	2.31E-06	200.79
227	0.03	20.28	7.427	21.6	0.1767	-233.5	234	676.1	247.57	720	5.89	7,783.33	7,783.33	0.6567	3.41E-07	336.43
224	0.05	31.51	11.063	33.4	0.2709	-233.1	233	685.1	240.5	726.09	5.89	5,067.39	5,067.39	0.638	5.23E-07	275.41

VT (V)	I (A)	VRL (V)	VLL (V)	VL (V)	VRC (V)	VCC (V)	VC (V)	RL (Ohm)	XL (Ohm)	ZL (Ohm)	RC (Ohm)	XC (Ohm)	ZC (Ohm)	L (H)	C (F)	f(Hz) reson.
219	0.82	40.44	34.41	53.1	4.818	-248.85	249	49.44	42.07	64.91	5.89	304.22	304.28	0.1116	8.72E-06	161.35
218	0.08	54.96	10.761	56	0.483	-221.9	222	670.2	131.23	682.93	5.89	2,706.09	2,706.10	0.3481	9.80E-07	272.46
225	0.1	63.63	13.271	65	0.5654	-228.5	229	662.82	138.24	677.08	5.89	2,380.20	2,380.21	0.3667	1.11E-06	248.96
225	0.11	76.73	7.521	77.1	0.6715	-218.9	219	673.09	65.98	676.32	5.89	1,920.17	1,920.18	0.175	1.38E-06	323.69
223	0.13	98.4	7.644	98.7	0.7893	-207.7	208	734.36	57.04	736.57	5.89	1,549.99	1,550.00	0.1513	1.71E-06	312.76
226	0.17	126.9	5.125	127	0.9719	-191.6	192	769.07	31.06	769.7	5.89	1,161.20	1,161.21	0.0824	2.28E-06	366.86
226	0.21	169.9	5.961	170	1.2251	-153.6	154	816.81	28.66	817.31	5.89	738.44	738.46	0.076	3.59E-06	304.55
226	0.25	191.5	0.003	192	1.4784	-115.99	116	762.95	0.01	762.95	5.89	462.11	462.15	3E-05	5.74E-06	12,628.44
218	0.26	206.7	11.726	207	1.5373	-75.984	76	791.83	44.93	793.1	5.89	291.13	291.19	0.1192	9.11E-06	152.74
220	0.27	211.7	12.034	212	1.6021	-63.98	64	778.16	44.24	779.41	5.89	235.22	235.29	0.1174	1.13E-05	138.35
223	0.04	25.34	13.467	28.7	0.212	-235.1	235	704	374.1	797.22	5.89	6,530.55	6,530.56	0.9923	4.06E-07	250.69
225	0.05	35.79	11.208	37.5	0.2768	-233.6	234	761.4	238.47	797.87	5.89	4,970.21	4,970.21	0.6326	5.34E-07	273.92
226	0.1	74.11	17.718	76.2	0.5831	-230.6	231	748.6	178.97	769.7	5.89	2,329.29	2,329.29	0.4747	1.14E-06	216.46
225	0.1	75.85	19.419	78.3	0.5831	-230.5	231	766.2	196.15	790.91	5.89	2,328.28	2,328.28	0.5203	1.14E-06	206.72
227	0.1	77	13.081	78.1	0.5713	-226.1	226	793.78	134.86	805.15	5.89	2,330.92	2,330.93	0.3577	1.14E-06	249.44
220	0.03	5.03	8.058	9.5	0.2003	-228.2	228	148	237	279.41	5.89	6,711.76	6,711.76	0.6287	3.95E-07	319.3
221	0.09	31.65	29.258	43.1	0.5478	-247.8	248	340.3	314.6	463.44	5.89	2,664.51	2,664.52	0.8345	9.96E-07	174.61
227	0.1	45.77	24.885	52.1	0.5654	-246.8	247	476.8	259.22	542.71	5.89	2,570.83	2,570.83	0.6876	1.03E-06	188.95

VT (V)	I (A)	VRL (V)	VLL (V)	VL (V)	VRC (V)	VCC (V)	VC (V)	RL (Ohm)	XL (Ohm)	ZL (Ohm)	RC (Ohm)	XC (Ohm)	ZC (Ohm)	L (H)	C (F)	f (Hz) reson.
219	0.82	40.44	34.41	53.1	4.818	-248.85	249	49.44	42.07	64.91	5.89	304.22	304.28	0.1116	8.72E-06	161.35
222	0.1	58.4	12.87	59.8	0.5654	-227.1	227	608.32	134.06	622.92	5.89	2,365.62	2,365.63	0.3556	1.12E-06	252.04
227	0.09	47.31	9.215	48.2	0.5478	-230.7	231	508.72	99.08	518.28	5.89	2,480.64	2,480.65	0.2628	1.07E-06	300.21
226	0.17	104.8	4.257	105	1.0249	-204.4	204	602.38	24.46	602.87	5.89	1,174.70	1,174.71	0.0649	2.26E-06	415.77
226	0.17	1.3	0.032	1.3	1.0072	-226	226	7.6	0.19	7.6	5.89	1,321.62	1,321.64	0.0005	2.01E-06	5,022.98
225	0.17	1.31	0.117	1.32	1.019	-225.5	226	7.6	0.68	7.63	5.89	1,303.45	1,303.47	0.0018	2.04E-06	2,633.51
226	1.73	10.28	4.198	11.1	10.172	-229.48	230	5.95	2.43	6.43	5.89	132.87	133.01	0.0065	2.00E-05	443.62
225	2.5	14.53	8.036	16.6	14.725	-231.03	232	5.81	3.21	6.64	5.89	92.41	92.6	0.0085	2.87E-05	321.7
223	3.43	20.98	8.135	22.5	20.2027	-227.3	228	6.116	2.37	6.56	5.89	66.27	66.53	0.0063	4.00E-05	317.16
218	1.68	13.82	3.275	14.2	9.9188	-220.38	221	8.205	1.94	8.43	5.89	130.87	131	0.0052	2.03E-05	492.2
226	0.46	20.37	17.563	26.9	2.68	-242.79	243	44.78	38.6	59.12	5.89	533.59	533.63	0.1024	4.97E-06	223.08
227	0.76	30.25	30.14	42.7	4.5	-254.36	254	39.59	39.45	55.89	5.89	332.93	332.98	0.1047	7.97E-06	174.3
227	0.1	82.86	24.483	86.4	0.6008	-235.8	236	812.34	240.03	847.06	5.89	2,311.76	2,311.76	0.6367	1.15E-06	186.21
226	0.1	30.14	39.394	49.6	0.5713	-263.5	264	310.7	406.12	511.34	5.89	2,716.49	2,716.49	1.0773	9.76E-07	155.18
227	0.08	1.31	0.504	1.4	0.4948	-227	227	15.55	6	16.67	5.89	2,702.37	2,702.38	0.0159	9.82E-07	1,273.57



VT (V)	I (A)	VRL (V)	VLL (V)	VL (V)	VRC (V)	VCC (V)	VC (V)	RL (Ohm)	XL (Ohm)	ZL (Ohm)	RC (Ohm)	XC (Ohm)	ZC (Ohm)	L (H)	C (F)	f(Hz) reson.
219	0.82	40.44	34.41	53.1	4.818	-248.85	249	49.44	42.07	64.91	5.89	304.22	304.28	0.1116	8.72E-06	161.35
227	1.89	22.34	12.714	25.7	11.1203	-236.84	237	11.83	6.73	13.61	5.89	125.44	125.58	0.0179	2.11E-05	258.97
223	0.1	80.02	23.155	83.3	0.5772	-231.5	232	816.5	236.28	850	5.89	2,362.24	2,362.24	0.6268	1.12E-06	189.71
226	0.1	80.97	23.452	84.3	0.5831	-234	234	817.9	236.89	851.52	5.89	2,363.63	2,363.64	0.6284	1.12E-06	189.52
227	0.1	88.57	27.371	92.7	0.5949	-235.7	236	876.9	271	917.82	5.89	2,333.66	2,333.66	0.7189	1.14E-06	176.07
225	0.1	74.06	17.934	76.2	0.5713	-230.4	230	763.5	184.89	785.57	5.89	2,375.25	2,375.26	0.4904	1.12E-06	215.06
225	0.17	146.4	21.734	148	0.9777	-192.3	192	881.9	130.93	891.57	5.89	1,158.42	1,158.43	0.3473	2.29E-06	178.47
220	0.16	91.1	0.054	91.1	0.9424	-197.2	197	569.37	0.34	569.38	5.89	1,232.49	1,232.50	0.0009	2.15E-06	3,626.06
222	0.16	92.2	0.172	92.2	0.9424	-198.1	198	576.25	1.07	576.25	5.89	1,238.11	1,238.13	0.0029	2.14E-06	2,037.61
222	0.12	128.7	54.336	140	0.6891	-184	184	1,100.00	464.41	1,194.02	5.89	1,572.64	1,572.65	1.2319	1.69E-06	110.41
222	0.35	205.9	9.322	206	2.0556	-86.776	86.8	589.94	26.71	590.544	5.89	248.64	248.71	0.0709	1.07E-05	183.06
223	0.27	205.9	5.112	206	1.5903	-86.185	86.2	762.73	18.93	762.963	5.89	319.2	319.26	0.0502	8.31E-06	246.36
223	0.33	206.7	7.05	207	1.9614	-85.177	85.2	620.66	21.17	621.021	5.89	255.79	255.86	0.0562	1.04E-05	208.55
225	0.32	206	0.812	206	1.8848	-85.579	85.6	643.75	2.54	643.75	5.89	267.44	267.5	0.0067	9.92E-06	616
226	0.34	219.4	12.182	220	4.056	-44.214	44.4	649	36.04	650	12	130.81	131.36	0.0956	2.03E-05	114.31
222	0.42	212.3	9.339	213	5.004	-54.772	55	509.1	22.39	509.592	12	131.35	131.89	0.0594	2.02E-05	145.31
221	0.33	214.1	13.064	215	3.984	-48.838	49	644.89	39.35	646.084	12	147.1	147.59	0.1044	1.80E-05	116.01
223	0.33	213.3	7.561	213	3.948	-58.467	58.6	648.23	22.98	648.632	12	177.71	178.12	0.061	1.49E-05	166.85
221	0.33	209.2	5.889	209	3.9	-65.885	66	643.75	18.12	644	12	202.72	203.08	0.0481	1.31E-05	200.68
222	0.33	211.5	7.756	212	3.924	-61.575	61.7	646.66	23.72	647.095	12	188.3	188.69	0.0629	1.41E-05	169.06

VT (V)	I (A)	VRL (V)	VLL (V)	VL (V)	VRC (V)	VCC (V)	VC (V)	RL (Ohm)	XL (Ohm)	ZL (Ohm)	RC (Ohm)	XC (Ohm)	ZC (Ohm)	L (H)	C (F)	f (Hz) reson.
219	0.82	40.44	34.41	53.1	4.818	-248.85	249	49.44	42.07	64.91	5.89	304.22	304.28	0.1116	8.72E-06	161.35
223	0.33	212.8	7.615	213	3.936	-58.468	58.6	648.67	23.22	649.085	12	178.26	178.66	0.0616	1.49E-05	166.25
224	0.32	206.6	3.488	207	3.852	-78.806	78.9	643.52	10.86	643.614	12	245.5	245.79	0.0288	1.08E-05	285.21
223	0.32	206.3	3.3	206	3.84	-78.606	78.7	644.61	10.31	644.688	12	245.64	245.94	0.0274	1.08E-05	292.82
224	0.33	210.9	8.344	211	3.912	-66.184	66.3	647.04	25.59	647.546	12	203.02	203.37	0.0679	1.31E-05	168.98
224	0.33	212.1	8.58	212	3.924	-66.584	66.7	648.71	26.24	649.235	12	203.62	203.98	0.0696	1.30E-05	167.14
225	0.41	209.7	6.146	210	4.896	-73.738	73.9	514	15.06	514.216	12	180.73	181.13	0.04	1.47E-05	207.83
225	0.41	212.6	8.319	213	4.944	-65.213	65.4	516.11	20.19	516.505	12	158.28	158.74	0.0536	1.68E-05	167.99
224	0.42	213.2	9.426	213	4.98	-61.499	61.7	513.72	22.71	514.217	12	148.19	148.67	0.0603	1.79E-05	153.26
226	0.41	212	6.544	212	4.908	-68.925	69.1	518.34	16	518.582	12	168.52	168.95	0.0424	1.57E-05	194.72
224	0.37	211.8	9.316	212	4.464	-68.455	68.6	569.34	25.04	569.892	12	184.02	184.41	0.0664	1.44E-05	162.65
226	0.38	213.4	8.433	214	4.56	-69.551	69.7	561.67	22.19	562.105	12	183.03	183.42	0.0589	1.45E-05	172.31
220	0.39	209.7	17.121	210	4.632	-68.443	68.6	543.27	44.36	545.078	12	177.31	177.72	0.1177	1.50E-05	119.96
219	0.38	207.8	16.012	208	4.56	-67.546	67.7	546.8	42.14	548.421	12	177.75	178.16	0.1118	1.49E-05	123.24
228	0.21	27.35	471.31	472	162.971	-595.92	618	129	2,223.15	2,226.89	768.7	2,810.93	2,914.15	5.8971	9.44E-07	67.47
225	0.08	6.31	3.463	7.2	64.5736	-216.58	226	75.15	41.22	85.714	768.7	2,578.32	2,690.48	0.1094	1.03E-06	474.51
224	0.35	98.28	12.694	99.1	60.9881	-170.63	181	284.88	36.79	287.246	176.8	494.57	525.22	0.0976	5.36E-06	219.97
222	0.45	157.9	8.28	158	35.6776	-117.4	123	347.76	18.24	348.238	78.59	258.59	270.26	0.0484	1.03E-05	225.93
222	0.04	3.41	0.778	3.5	3.3006	-222.28	222	81.25	18.52	83.333	78.59	5,292.27	5,292.86	0.0491	5.01E-07	1,014.35
221	0.24	54.37	4.998	54.6	63.3897	-192.01	202	226.55	20.82	227.5	264.1	800.03	842.5	0.0552	3.32E-06	371.9
222	0.24	62.34	4.428	62.5	62.3332	-187.51	198	264.17	18.76	264.831	264.1	794.54	837.29	0.0498	3.34E-06	390.44

VT (V)	I (A)	VRL (V)	VLL (V)	VL (V)	VRC (V)	VCC (V)	VC (V)	RL (Ohm)	XL (Ohm)	ZL (Ohm)	RC (Ohm)	XC (Ohm)	ZC (Ohm)	L (H)	C (F)	f (Hz) reson.
219	0.82	40.44	34.41	53.1	4.818	-248.85	249	49.44	42.07	64.91	5.89	304.22	304.28	0.1116	8.72E-06	161.35
224	0.48	198	1.097	198	14.5321	-61.918	63.6	415.96	2.31	415.966	30.53	130.08	133.61	0.0061	2.04E-05	450.73
222	0.42	164.5	0.937	165	33.0843	-108.57	114	390.73	2.23	390.736	78.59	257.89	269.6	0.0059	1.03E-05	645.78
218	0.37	135.1	0.308	135	30.793	-138.72	142	364.15	0.83	364.151	83	373.92	383.02	0.0022	7.09E-06	1,274.35
220	0.38	136.5	1.81	137	31.208	-139.04	143	363	4.81	363.032	83	369.79	378.99	0.0128	7.17E-06	525.89
224	0.48	206.2	13.104	207	11.2103	-42.651	44.1	426	27.07	426.86	23.16	88.12	91.12	0.0718	3.01E-05	108.25
224	0.49	211.5	0.742	212	8.0389	-32.727	33.7	431.63	1.51	431.633	16.41	66.79	68.78	0.004	3.97E-05	398.6
225	0.49	214.3	3.817	214	7.38	-27.321	28.3	435.5	7.76	435.569	15	55.53	57.52	0.0206	4.78E-05	160.52
224	0.53	209.2	0.259	209	8.7607	-36.154	37.2	391.76	0.48	391.76	16.41	67.7	69.66	0.0013	3.92E-05	709.25
<b>220</b>	<b>0.18</b>	<b>40.64</b>	<b>31.145</b>	<b>51.2</b>	<b>58.2369</b>	<b>-227.67</b>	<b>235</b>	<b>228.3</b>	<b>174.97</b>	<b>287.64</b>	<b>327.2</b>	<b>1,279.04</b>	<b>1,320.22</b>	<b>0.4641</b>	<b>2.07E-06</b>	<b>162.22</b>
220	0.28	62.73	51.238	81	72.8981	-224.46	236	227.3	185.65	293.478	264.1	813.26	855.07	0.4924	3.26E-06	125.58
220	0.42	97.56	76.532	124	74.7767	-213.27	226	230.65	180.93	293.144	176.8	504.19	534.28	0.4799	5.26E-06	100.16
220	0.66	147.6	106.48	182	54.936	-203.72	211	225	162.32	277.439	83.74	310.55	321.65	0.4306	8.54E-06	82.99
220	0.78	152.6	139.92	207	61.0606	-192.55	202	196.33	180.08	266.409	78.59	247.81	259.97	0.4777	1.07E-05	70.39
220	2.98	55.42	307.04	312	90.9175	-471.31	480	18.61	103.1	104.768	30.53	158.26	161.18	0.2735	1.68E-05	74.34
220	0.17	4.13	5.216	6.65	54.3108	-217.32	224	24.85	31.42	40.06	327.2	1,309.13	1,349.40	0.0834	2.03E-06	387.29
220	0.26	7.24	7.745	10.6	68.1439	-214.43	225	28.05	30.02	41.085	264.1	831.13	872.09	0.0796	3.19E-06	315.71
220	0.41	13.06	11.351	17.3	72.3018	-214.12	226	31.92	27.75	42.298	176.8	523.53	552.57	0.0736	5.07E-06	260.59
220	0.67	26.98	15.267	31	56.4434	-218.84	226	40.03	22.65	45.994	83.74	324.69	335.31	0.0601	8.17E-06	227.17
<b>220</b>	<b>0.83</b>	<b>31.3</b>	<b>20.834</b>	<b>37.6</b>	<b>65.5399</b>	<b>-218.38</b>	<b>228</b>	<b>37.53</b>	<b>24.98</b>	<b>45.084</b>	<b>78.59</b>	<b>261.84</b>	<b>273.38</b>	<b>0.0663</b>	<b>1.01E-05</b>	<b>194.25</b>

VT (V)	I (A)	VRL (V)	VLL (V)	VL (V)	VRC (V)	VCC (V)	VC (V)	RL (Ohm)	XL (Ohm)	ZL (Ohm)	RC (Ohm)	XC (Ohm)	ZC (Ohm)	L (H)	C (F)	f (Hz) reson.
219	0.82	40.44	34.41	53.1	4.818	-248.85	249	49.44	42.07	64.91	5.89	304.22	304.28	0.1116	8.72E-06	161.35
220	1.77	63.14	43.539	76.7	54.0376	-229.73	236	35.68	24.6	43.333	30.53	129.79	133.33	0.0653	2.04E-05	137.82
220	2.99	60.96	80.526	101	69.2303	-257.87	267	20.4	26.94	33.791	23.16	86.27	89.33	0.0715	3.07E-05	107.37
220	3.85	72.63	89.162	115	30.792	-283.33	285	18.87	23.16	29.878	8	73.61	74.05	0.0615	3.60E-05	106.96
220	0.17	0.28	1.105	1.14	53.9837	-214.31	221	1.7	6.7	6.909	327.2	1,298.82	1,339.39	0.0178	2.04E-06	835.6
220	0.25	-	1.81	1.81	66.5592	-211.79	222		7.18	7.183	264.1	840.43	880.95	0.0191	3.16E-06	649.03
220	0.4	1.56	2.646	3.07	70.5341	-210.5	222	3.9	6.63	7.694	176.8	527.56	556.39	0.0176	5.03E-06	535.11
220	0.65	3.32	3.967	5.17	54.4335	-216.25	223	5.1	6.1	7.954	83.74	332.7	343.08	0.0162	7.97E-06	442.98
220	0.8	4.88	4.651	6.74	62.9466	-213.93	223	6.09	5.81	8.414	78.59	267.08	278.4	0.0154	9.93E-06	406.93
220	1.65	12.01	8.307	14.6	50.2824	-219.31	225	7.29	5.04	8.865	30.53	133.16	136.61	0.0134	1.99E-05	308.29
220	2.48	19.07	12.308	22.7	57.4178	-218.59	226	7.69	4.97	9.157	23.16	88.17	91.17	0.0132	3.01E-05	252.85
<b>220</b>	<b>3.74</b>	<b>10.72</b>	<b>31.209</b>	<b>33</b>	<b>29.888</b>	<b>-227.04</b>	<b>229</b>	<b>2.87</b>	<b>8.35</b>	<b>8.833</b>	<b>8</b>	<b>60.77</b>	<b>61.3</b>	<b>0.0222</b>	<b>4.36E-05</b>	<b>161.83</b>
14.1	0.35	10.38	7.988	13.1	2.792	-13.004	13.3	29.75	22.89	37.536	8	37.26	38.11	0.0607	7.12E-05	76.55
24.6	0.54	18.59	11.582	21.9	4.32	-20.551	21	34.42	21.45	40.556	8	38.06	38.89	0.0569	6.97E-05	79.92
34.5	0.7	26.18	13.821	29.6	5.608	-27.228	27.8	37.34	19.72	42.225	8	38.84	39.66	0.0523	6.83E-05	84.22
43.3	0.87	33.29	18.323	38	6.992	-34.192	34.9	38.09	20.96	43.478	8	39.12	39.93	0.0556	6.78E-05	81.96
53.6	1.07	41.33	22.795	47.2	8.576	-42.34	43.2	38.56	21.26	44.03	8	39.5	40.3	0.0564	6.72E-05	81.77
14	0.37	11.53	7.584	13.8	1.83	-11.758	11.9	31.5	20.72	37.705	5	32.13	32.51	0.055	8.26E-05	74.71
24	0.55	19.93	10.872	22.7	2.76	-18.697	18.9	36.1	19.7	41.123	5	33.87	34.24	0.0522	7.83E-05	78.68
34.6	0.75	28.83	14.112	32.1	3.76	-25.727	26	38.34	18.77	42.686	5	34.21	34.57	0.0498	7.75E-05	81.01

VT (V)	I (A)	VRL (V)	VLL (V)	VL (V)	VRC (V)	VCC (V)	VC (V)	RL (Ohm)	XL (Ohm)	ZL (Ohm)	RC (Ohm)	XC (Ohm)	ZC (Ohm)	L (H)	C (F)	f (Hz) reson.
219	0.82	40.44	34.41	53.1	4.818	-248.85	249	49.44	42.07	64.91	5.89	304.22	304.28	0.1116	8.72E-06	161.35
43.4	0.92	36.35	17.175	40.2	4.595	-31.567	31.9	39.55	18.69	43.743	5	34.35	34.71	0.0496	7.72E-05	81.34
53.4	1.13	44.9	21.532	49.8	5.625	-38.794	39.2	39.92	19.14	44.267	5	34.48	34.84	0.0508	7.69E-05	80.54
220	0.74	155.1	134.03	205	58.3887	-187.1	196	208.77	180.39	275.908	78.59	251.82	263.8	0.4785	1.05E-05	70.89
220	0.83	154.3	156.87	220	63.91	-185.29	196	185.84	189	265.06	77	223.24	236.14	0.5013	1.19E-05	65.21
220	1.69	82.56	252.86	266	113.163	-353.32	371	48.88	149.71	157.49	67	209.19	219.66	0.3971	1.27E-05	70.92
220	0.21	39.21	32.142	50.7	69.3608	-223.48	234	184.95	151.61	239.151	327.2	1,054.17	1,103.77	0.4022	2.52E-06	158.21
220	0.12	13.73	18.076	22.7	93.7854	-210.01	230	112.55	148.17	186.066	768.7	1,721.40	1,885.25	0.393	1.54E-06	204.51
220	0.86	31.32	21.166	37.8	67.1902	-217.88	228	36.63	24.76	44.211	78.59	254.82	266.67	0.0657	1.04E-05	192.5
220	0.94	34.05	24.754	42.1	72.534	-217.21	229	36.15	26.28	44.692	77	230.58	243.1	0.0697	1.15E-05	177.73
220	1.04	37.85	27.183	46.6	69.345	-219.3	230	36.57	26.26	45.024	67	211.88	222.22	0.0697	1.25E-05	170.42
220	0.93	34.46	24.709	42.4	71.302	-217.62	229	37.21	26.68	45.788	77	235.01	247.3	0.0708	1.13E-05	178.06
220	0.97	38.93	25.613	46.6	64.722	-219.66	229	40.3	26.51	48.24	67	227.39	237.06	0.0703	1.17E-05	175.71
220	3.77	29.4	15.212	33.1	30.12	-227.01	229	7.81	4.04	8.792	8	60.29	60.82	0.0107	4.40E-05	231.78

Fuente: Elaboración propia

**Tabla N° 4.7: RESÚMEN DE MEDICIONES PRÓXIMAS A LA FRECUENCIA DEL TERCER ARMÓNICO**

VT	I	VRL	VLL	VL	VRC	VCC	VC	RL	XL	ZL	RC	XC	ZC	F aplic.	L	C	F reson.
221.00	0.7220	38.30	30.561	49.00	4.2526	-247.463	247.50	53.05	42.33	67.87	5.89	342.75	342.80	60	0.11228	7.74E-06	170.74
220.20	0.6700	37.65	26.942	46.30	3.9463	-243.168	243.20	56.2	40.21	69.10	5.89	362.94	362.99	60	0.10667	7.31E-06	180.26
220.80	0.4470	24.14	31.140	39.40	2.6328	-250.186	250.20	54	69.67	88.14	5.89	559.70	559.73	60	0.18479	4.74E-06	170.07
222.20	0.3730	20.29	25.643	32.70	2.1970	-246.690	246.70	54.4	68.75	87.67	5.89	661.37	661.39	60	0.18236	4.01E-06	186.10
224.10	0.0630	24.38	29.408	38.20	0.3711	-252.100	252.10	387	466.79	606.35	5.89	4,001.58	4,001.59	60	1.23819	6.63E-07	175.67
219.00	0.0630	26.85	27.312	38.30	0.3711	-244.600	244.60	426.2	433.52	607.94	5.89	3,882.54	3,882.54	60	1.14995	6.83E-07	179.56
220.90	0.0930	31.65	29.258	43.10	0.5478	-247.799	247.80	340.30	314.60	463.44	5.89	2,664.51	2,664.52	60	0.83450	9.96E-07	174.61
226.70	0.0960	45.77	24.885	52.10	0.5654	-246.799	246.80	476.80	259.22	542.71	5.89	2,570.83	2,570.83	60	0.68760	1.03E-06	188.95
226.90	0.7640	30.25	30.140	42.70	4.5000	-254.360	254.40	39.59	39.45	55.89	5.89	332.93	332.98	60	0.10465	7.97E-06	174.30
227.20	0.1020	82.86	24.483	86.40	0.6008	-235.799	235.80	812.34	240.03	847.06	5.89	2,311.76	2,311.76	60	0.63669	1.15E-06	186.21
223.40	0.0980	80.02	23.155	83.30	0.5772	-231.499	231.50	816.50	236.28	850.00	5.89	2,362.24	2,362.24	60	0.62675	1.12E-06	189.71
225.80	0.0990	80.97	23.452	84.30	0.5831	-233.999	234.00	817.90	236.89	851.52	5.89	2,363.63	2,363.64	60	0.62837	1.12E-06	189.52
226.60	0.1010	88.57	27.371	92.70	0.5949	-235.699	235.70	876.90	271.00	917.82	5.89	2,333.66	2,333.66	60	0.71886	1.14E-06	176.07
225.40	0.1660	146.40	21.734	148.00	0.9777	-192.298	192.30	881.90	130.93	891.57	5.89	1,158.42	1,158.43	60	0.34730	2.29E-06	178.47
221.90	0.3490	205.89	9.322	206.10	2.0556	-86.776	86.80	589.94	26.71	590.544	5.89	248.64	248.71	60	0.07085	1.07E-05	183.06
226.40	0.3800	213.43	8.433	213.60	4.5600	-69.551	69.70	561.67	22.19	562.105	12	183.03	183.42	60	0.05887	1.45E-05	172.31
220.00	0.9420	34.05	24.754	42.10	72.5340	-217.209	229.00	36.15	26.28	44.692	77.00	230.58	243.10	60	0.06971	1.15E-05	177.73
220.00	1.0350	37.85	27.183	46.60	69.3450	-219.297	230.00	36.57	26.26	45.024	67.00	211.88	222.22	60	0.06967	1.25E-05	170.42
220.00	0.9260	34.46	24.709	42.40	71.3020	-217.617	229.00	37.21	26.68	45.788	77.00	235.01	247.30	60	0.07078	1.13E-05	178.06
220.00	0.9660	38.93	25.613	46.60	64.7220	-219.664	229.00	40.30	26.51	48.240	67.00	227.39	237.06	60	0.07033	1.17E-05	175.71

Fuente: Elaboración propia

#### **4.6 Procesamiento estadístico y análisis de datos:**

El procedimiento experimental fue llevado a cabo física y virtualmente, comparando cada resultado con el anterior y modificando los parámetros para así optimizar poco a poco dichos resultados, tal como puede apreciarse en la tabla N° 4.6. Aquellos datos nos muestran que es posible llegar a establecer una misma frecuencia de resonancia a partir de un infinito número de combinaciones, como es en el caso del presente estudio, en el cual se ha llegado o aproximado a la frecuencia de resonancia de 180 Hz correspondiente al tercer armónico, así como a otras ondas armónicas.

De todas las combinaciones fueron seleccionadas algunas para realizar el cálculo de la potencia consumida por el filtro y los parámetros de salida, como son: voltaje, corriente y potencia, que nos permiten evaluar la eficacia de esta nueva máquina.

En la Tabla N° 4.7 podemos observar que la relación:

$$P_{\text{sec}} / P_{\text{t}} \dots \dots \dots (45)$$

Puede alcanzar hasta un 61%

P sec: Potencia en el secundario.

P t: Potencia total.

Esto nos indica que es posible recuperar hasta el momento el 61% de la potencia aparente que disiparía el filtro convencional.

**Tabla N° 4.8**  
**POTENCIA DE ENTRADA Y DE SALIDA DEL FILTRO**

L (H)	C (F)	f reson. (Hz)	V sec. (V)	I sec. (A)	Psec (W)	PT (W)	PSEC/PT	PSEC/PPRIM	Carga (Ohm)
0.03825	7.37E-06	299.77	21.8	0.034	0.74	10.24	7.2%	7.525%	834
0.02997	7.45E-06	336.91	24.2	0.029	0.70	11.80	5.9%	6.707%	1160
0.03675	7.46E-06	303.92	25.1	0.018	0.45	11.49	3.9%	4.193%	2179
0.16971	7.26E-06	143.43	65.4	0.045	2.94	22.98	12.8%	7.577%	2179
0.16537	7.05E-06	147.35	62.3	0.086	5.36	22.13	24.2%	15.041%	2179
0.06505	4.89E-06	282.11	66.3	0.081	5.37	8.17	65.7%	64.272%	834
0.04345	7.26E-06	283.41	121	0.128	15.49	22.71	68.2%	72.408%	1185
0.06637	4.96E-06	277.40	87.3	0.08	6.98	11.31	61.7%	62.229%	1185
0.07267	1.06E-05	181.04	193.7	0.178	34.48	57.09	60.4%	59.934%	1185
1.23819	6.63E-07	175.67	28.6	0.027	0.77	1.56	49.5%	32.087%	834
0.52529	1.16E-06	203.61	72.9	0.07	5.10	8.33	61.3%	60.193%	1185
0.29876	1.14E-06	273.10	57.8	0.074	4.28	6.57	65.1%	64.868%	854
0.45853	1.14E-06	220.05	72.9	0.07	5.10	8.67	58.8%	58.222%	1185
0.68760	1.03E-06	188.95	59.5	0.055	3.27	4.45	73.6%	65.429%	1185
0.00645	2.00E-05	443.62	6.9	0.009	0.06	35.31	0.2%	0.324%	1185
0.00853	2.87E-05	321.70	9.9	0.013	0.13	73.13	0.2%	0.310%	1185
0.00629	4.00E-05	317.16	13	0.016	0.21	141.25	0.1%	0.270%	1185
0.10465	7.97E-06	174.30	25.3	0.028	0.71	26.55	2.7%	2.171%	1185
0.63669	1.15E-06	186.21	59.5	0.055	3.27	8.51	38.4%	37.133%	1185
1.07727	9.76E-07	155.18	59.5	0.055	3.27	2.98	109.9%	68.018%	1185
0.01786	2.11E-05	258.97	21	0.023	0.48	63.16	0.8%	0.995%	1185
0.62675	1.12E-06	189.71	71.5	0.067	4.79	7.90	60.7%	58.683%	1185
0.49043	1.12E-06	215.06	66	0.069	4.55	7.24	62.9%	61.612%	838+168.9
0.34730	2.29E-06	178.47	125	0.12	15.00	24.46	61.3%	61.055%	838
0.07085	1.07E-05	183.06	148.6	0.284	42.20	72.57	58.2%	58.672%	491.8



L (H)	C (F)	f reson. (Hz)	V sec. (V)	I sec. (A)	Psec (W)	PT (W)	PSEC/PT	PSEC/PPRIM	Carga (Ohm)
0.06291	1.41E-05	169.06	155.4	0.286	44.44	70.43	63.1%	64.232%	68
0.04244	1.57E-05	194.72	134	0.376	50.38	88.71	56.8%	58.080%	34
0.11766	1.50E-05	119.96	134.5	0.391	52.59	82.73	63.6%	64.754%	34
0.11177	1.49E-05	123.24	131.5	0.387	50.89	80.69	63.1%	64.262%	34
0.40217	2.52E-06	158.21	65.5	0.113	7.40	23.02	32.2%	68.861%	600
0.39302	1.54E-06	204.51	29.5	0.055	1.62	13.12	12.4%	58.587%	600
0.06566	1.04E-05	192.50	127	0.214	27.18	84.23	32.3%	84.093%	600
0.06971	1.15E-05	177.73	141	0.233	32.85	100.41	32.7%	82.840%	600
0.06967	1.25E-05	170.42	155	0.256	39.68	110.95	35.8%	82.271%	600
0.07078	1.13E-05	178.06	142	0.248	35.22	97.93	36.0%	89.694%	600
0.07033	1.17E-05	175.71	155	0.261	40.46	100.13	40.4%	89.869%	600

Fuente: Elaboración propia

Para comparar y comprobar los datos anteriormente presentados (véase Tabla N° 4.7) se ha elaborado la Tabla N° 4.8 con valores de condensadores e inductancias, ambos elegidos de tal manera que se encuentran en su conjunto sintonizados a 180 Hz, encontrando mediante el uso de fórmulas la potencia disipada tanto en el condensador, en la inductancia y en el circuito serie formado por ambos elementos. Este circuito estará sometido a una tensión de 220V, y a una frecuencia de 60 Hz.

Se elige un valor como ejemplo de la tabla N° 4.7:

$$C = 1.15E-05 \text{ F}$$

$$L = 0.06971 \text{ H}$$

$$f \text{ resonancia} = 177.73 \text{ Hz}$$

$$\text{Pot} = 100.41 \text{ W}$$

Y lo se compara con un valor aproximado en la tabla N° 4.8:

$$C = 1 \text{ E-05 F}$$

$$L = 0.0782 \text{ H}$$

$$f \text{ resonancia} = 180 \text{ Hz}$$

$$\text{Pot} = 204.85 \text{ W}$$

**Tabla N° 4.9**  
**POTENCIA DISIPADA POR UN FILTRO CONVENCIONAL**

VT (V)	C (F)	L (H)	f (Hz)	f arm. (Hz)	I (A)	VL (V)	VC (V)	ANGULO (°)	PT (W)	PT (VA)	PL (VA)	PC (VA)
220	1.00E-06	0.7818	60	180	0.093	27.52	247.49	-89.61	0.14	20.53	2.57	23.09
220	2.00E-06	0.3909	60	180	0.187	27.56	247.48	-89.23	0.55	41.05	5.14	46.18
220	3.00E-06	0.2606	60	180	0.280	27.63	247.46	-88.85	1.23	61.57	7.73	69.25
220	4.00E-06	0.1954	60	180	0.373	27.73	247.42	-88.48	2.18	82.08	10.35	92.31
220	5.00E-06	0.1564	60	180	0.466	27.85	247.38	-88.11	3.39	102.58	12.99	115.35
220	6.00E-06	0.1303	60	180	0.559	28.00	247.33	-87.74	4.85	123.07	15.66	138.36
220	7.00E-06	0.1117	60	180	0.652	28.16	247.27	-87.38	6.56	143.54	18.38	161.33
220	8.00E-06	0.0977	60	180	0.745	28.35	247.20	-87.02	8.52	164.00	21.13	184.27
220	9.00E-06	0.0869	60	180	0.838	28.55	247.13	-86.67	10.72	184.43	23.94	207.18
220	1.00E-05	0.0782	60	180	0.931	28.77	247.05	-86.32	13.15	204.85	26.79	230.04
220	2.00E-05	0.0391	60	180	1.851	32.16	245.74	-82.70	51.73	407.22	59.52	454.86
220	3.00E-05	0.0261	60	180	2.749	36.86	243.64	-79.18	113.54	604.87	101.33	669.87
220	4.00E-05	0.0195	60	180	3.618	42.19	240.86	-75.78	195.54	795.92	152.65	871.39
220	5.00E-05	0.0156	60	180	4.450	47.72	237.51	-72.51	294.21	978.91	212.34	1,056.83
220	6.00E-05	0.0130	60	180	5.240	53.18	233.71	-69.39	405.82	1,152.79	278.64	1,224.64
220	7.00E-05	0.0112	60	180	5.986	58.40	229.57	-66.42	526.76	1,316.95	349.57	1,374.25
220	8.00E-05	0.0098	60	180	6.687	63.30	225.20	-63.62	653.73	1,471.12	423.29	1,505.92
220	9.00E-05	0.0087	60	180	7.342	67.84	220.70	-60.97	783.88	1,615.34	498.13	1,620.47
220	1.00E-04	0.0078	60	180	7.954	72.01	216.14	-58.48	914.81	1,749.86	572.75	1,719.16
220	2.00E-04	0.0039	60	180	11.831	101.83	171.74	-39.35	2012.9	2,602.86	1,204.80	2,031.91
220	3.00E-04	0.0026	60	180	13.482	114.02	143.31	-28.79	2599.4	2,966.14	1,537.33	1,932.22
220	4.00E-04	0.0020	60	180	14.292	119.37	126.86	-22.52	2904.6	3,144.22	1,706.08	1,813.03

<b>VT (V)</b>	<b>C (F)</b>	<b>L (H)</b>	<b>f (Hz)</b>	<b>f arm. (Hz)</b>	<b>I (A)</b>	<b>VL (V)</b>	<b>VC (V)</b>	<b>ANGULO (°)</b>	<b>PT (W)</b>	<b>PT (VA)</b>	<b>PL (VA)</b>	<b>PC (VA)</b>
220	5.00E-04	0.0016	60	180	14.760	121.93	117.11	-18.44	3080.3	3,247.10	1,799.62	1,728.46
220	6.00E-04	0.0013	60	180	15.070	123.19	111.10	-15.62	3193	3,315.33	1,856.45	1,674.28
220	7.00E-04	0.0011	60	180	15.299	123.78	107.28	-13.55	3272.1	3,365.77	1,893.76	1,641.24
220	8.00E-04	0.0010	60	180	15.483	124.00	104.79	-11.97	3332.2	3,406.28	1,919.85	1,622.44
220	9.00E-04	0.0009	60	180	15.640	123.98	103.15	-10.73	3380.7	3,440.89	1,939.07	1,613.33
220	1.00E-03	0.0008	60	180	15.781	123.81	102.08	-9.74	3421.8	3,471.81	1,953.85	1,611.00

Fuente: Elaboración propia

## **V.-RESULTADOS**

5.1.- Resultados del diseño del nuevo filtro capaz de captar la energía proveniente de la distorsión armónica en un sistema eléctrico para transformarla en energía utilizable.

Se realizó el experimento fabricando un filtro con un condensador y un transformador y al ingresar los datos en la tabla N° 4.6, se encontró que existe una frecuencia de resonancia, con ello se ha determinado que es posible elaborar un filtro con un condensador y un transformador y sintonizarlo a una frecuencia determinada. El transformador es capaz de transmitir la onda que incide en su bobina primaria hacia su bobina secundaria, permitiéndonos utilizarla para otros fines.

5.2.- Resultados de identificar los métodos más utilizados actualmente en el Perú para reducir el nivel de los armónicos en las redes eléctricas.

En el presente estudio se mencionaron los filtros activos y los filtros pasivos como los métodos más utilizados actualmente, prestando especial atención en los filtros pasivos y su funcionamiento.

5.3.- Resultados de determinar la potencia que disipan los filtros pasivos de armónicos en condiciones nominales.

La tabla N° 4.8 presenta una simulación de un filtro convencional sintonizado a 180 Hz, así como la potencia que disipa, la cual fue comparada con los resultados del nuevo filtro para armónicos.

5.4.- Resultados de determinar la potencia que se puede obtener de la distorsión armónica mediante el uso del nuevo filtro para armónicos.

Del gráfico de la Figura N° 5.1 se puede observar que para valores del capacitor comprendidos entre 1 y 450uf, el valor de la tensión del capacitor es mayor que el valor de la tensión en la inductancia.

En consecuencia, podemos deducir que la potencia consumida por el capacitor es mayor que la consumida por la bobina, tal como se muestra en el gráfico.

Ahora observando el intervalo de 450 a 1000uf, según el gráfico de la Figura N° 5.2, la tensión que actúa sobre el capacitor disminuye hasta estar por debajo de la tensión que actúa sobre la inductancia que va en aumento.

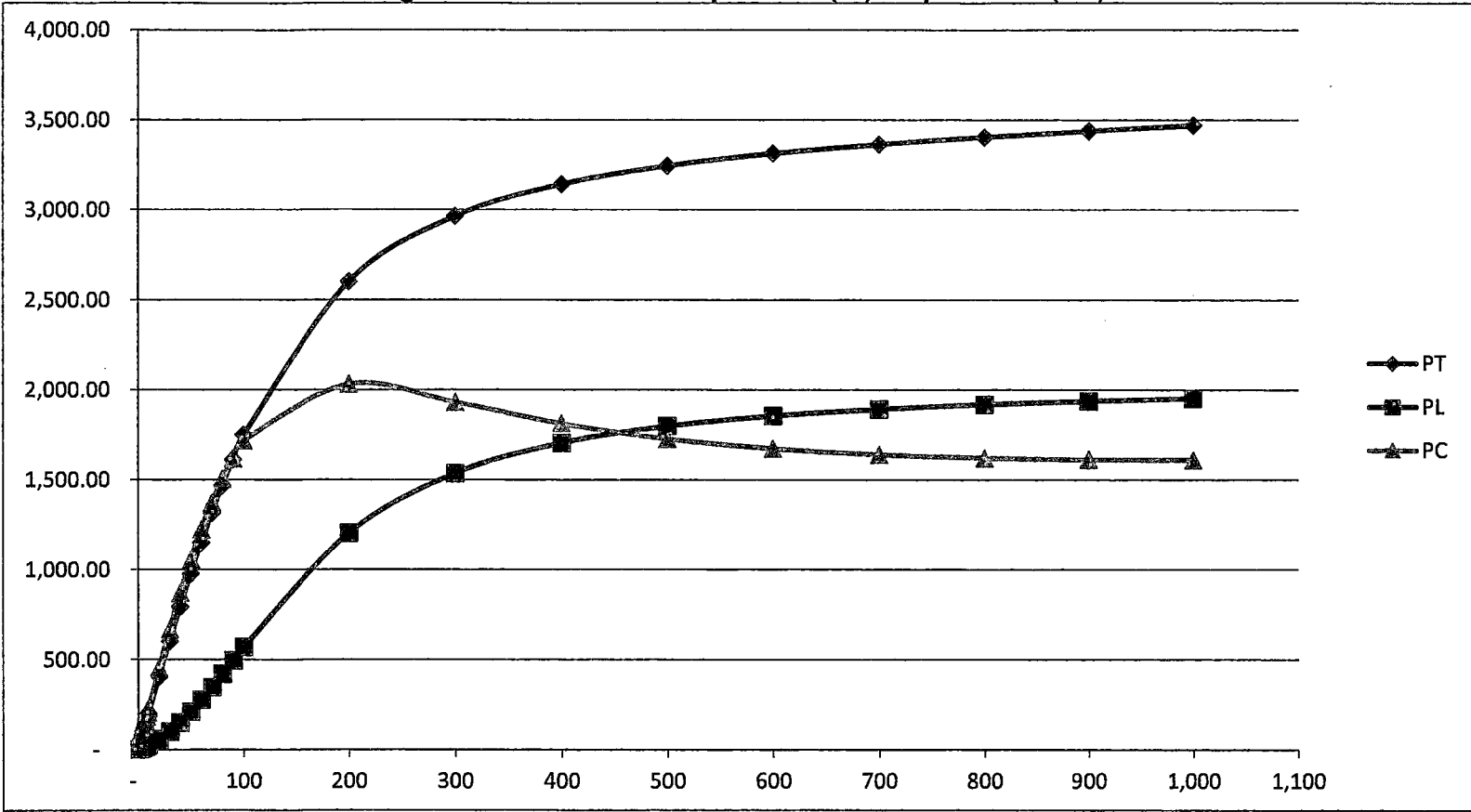
En consecuencia, en ese rango (450 a 1000 uf) según el gráfico de la Figura N° 5.1, la potencia consumida por la inductancia es mayor que la consumida por el capacitor.

Utilizando una correcta combinación de capacitor e inductancia se puede lograr que dicha inductancia sea la que represente una mayor potencia, con la finalidad de transmitirla por inducción a otro bobinado.

Los valores dependerán tanto del valor del capacitor, la inductancia de las bobinas y la resistencia interna de ellos que depende del diámetro del alambre, entre otros parámetros.

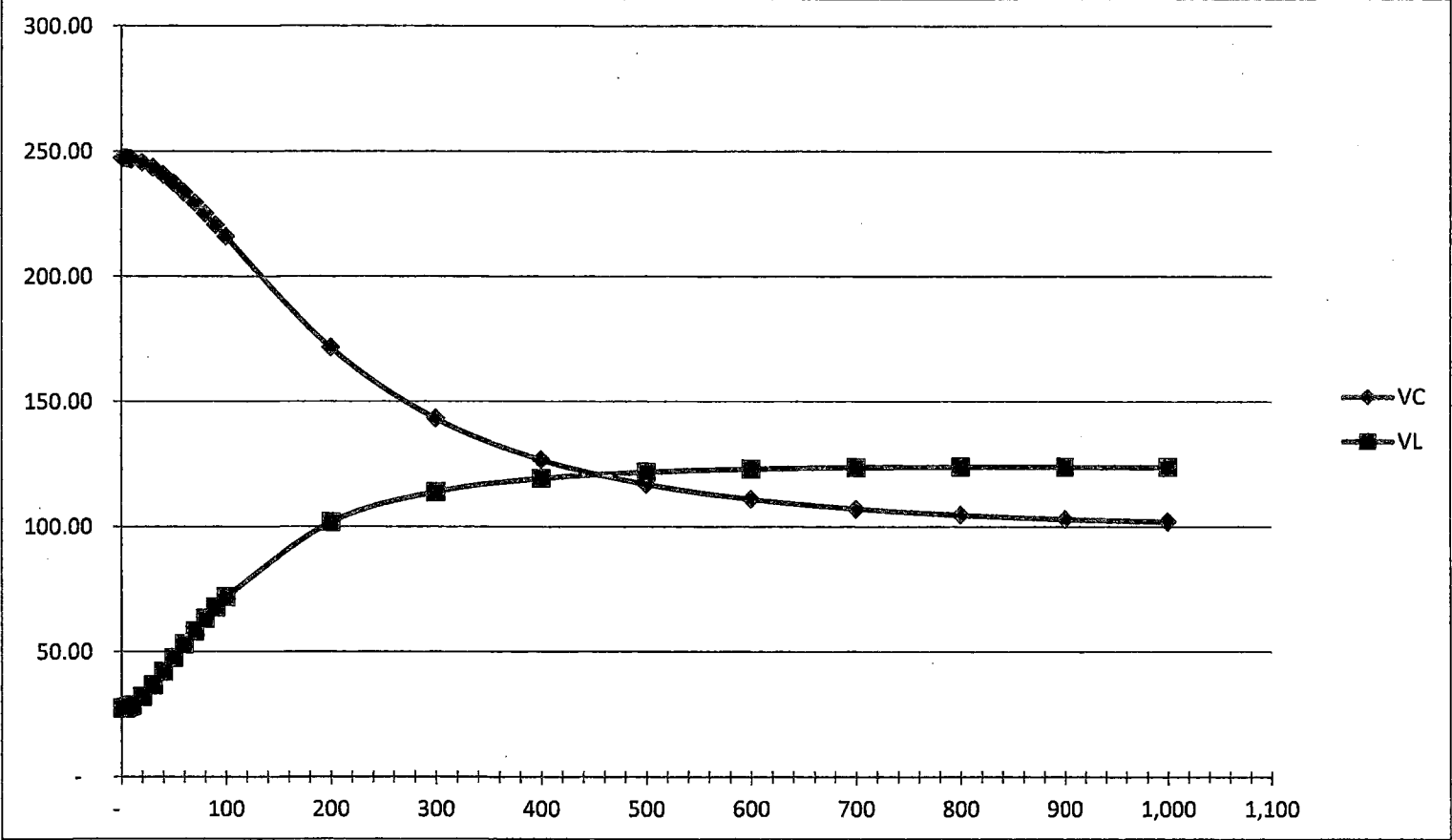
Se puede observar en el gráfico de la Figura N° 5.1 que la potencia en la bobina para los valores considerados asciende hasta el 56% del valor de la potencia total, lo cual nos da a entender que es posible recuperar alrededor del 56% de la potencia total de la rama serie formada por el capacitor y el primario del transformador.

Figura N° 5.1: Gráfico capacidad (uf) vs potencia (VA)



Fuente: Elaboración propia

Figura N° 5.2: Gráfico capacidad (uf) vs tensión (V)



Fuente: Elaboración propia



## **VI.- DISCUSIÓN DE RESULTADOS**

### **6.1.- Contrastación de hipótesis con los resultados**

#### **6.1.1.- Hipótesis general**

La hipótesis general indicaba que diseñando un nuevo tipo de filtro para armónicos sería posible aprovechar parte de la energía proveniente de la distorsión armónica que normalmente es disipada. Lo cual queda demostrado mediante el experimento realizado.

La lógica utilizada para formular la hipótesis y llegar a probarla es sencilla, si un filtro para armónicos del tipo pasivo paralelo es capaz de absorber con facilidad las ondas de determinada frecuencia y disiparlas ya sea en el condensador o en la bobina, se puede aprovechar parte de esta onda al acoplar otra bobina mediante un circuito magnético, generando una caída de tensión en los bornes de la nueva bobina. Mediante la relación de transformación es posible reducir o amplificar la onda armónica para luego rectificarla y utilizarla.

Los resultados obtenidos en la fase experimental indican que es posible realizar esto, y ya que los transformadores fueron fabricados artesanalmente y su montaje no es fijo para mayor facilidad al cambiar las bobinas podemos asegurar que se puede mejorar la eficiencia de la máquina al fabricar un producto terminado.

#### **6.1.2.- Hipótesis específicas**

a) Se indicó que conociendo los métodos actuales para reducir el nivel de los armónicos sería posible consolidar las bases teóricas para el diseño del nuevo filtro, lo cual queda demostrado ya que el nuevo filtro para armónicos está basado en el mismo principio de funcionamiento que un filtro pasivo serie convencional ya que se utilizó el concepto de resonancia condensador/bobina para lograr el objetivo.

b) Se indicó también que al determinar la potencia disipada por un filtro pasivo se podría conocer la cantidad de energía que es posible aprovechar con el nuevo filtro.

La evaluación de la potencia disipada por un filtro pasivo fue fundamental para poder conocer hasta donde se puede llegar con este experimento. Podemos observar dicha evaluación en la Tabla N° 4.8 donde se muestra una cantidad finita de combinaciones de condensadores e inductancias sintonizados a 180 Hz.

En el gráfico de la figura N° 5.1 podemos observar que a medida que se incrementa la capacidad del condensador también se incrementa la potencia disipada en el filtro. Luego, mediante las pruebas realizadas se pudo demostrar que se puede recuperar una parte de aquella potencia, lo cual se muestra en la tabla N° 4.7.

c) La tercera hipótesis específica indicaba que la cantidad de potencia que se podría obtener de la distorsión armónica determinaría la viabilidad técnica y económica del nuevo filtro.

Existe una diferencia entre un proyecto que se realiza exclusivamente para obtener una ganancia y un proyecto que se ejecuta para solucionar un problema existente. La investigación realizada acerca de este nuevo tipo de filtro para armónicos nos permite obtener una ganancia de donde no la había al solucionar un problema existente. Esto fue determinado en la evaluación técnica y económica del proyecto.

## **6.2.- Contrastación de resultados con otros estudios similares.**

En la actualidad los filtros pasivos no tienen la opción de “reciclar” energía, es decir no aprovechan la energía, tan solo la disipan. Lo cual

nos lleva a determinar que toda ganancia obtenida por este nuevo tipo de filtro es superior a la ofrecida por la tecnología existente en ese rubro.

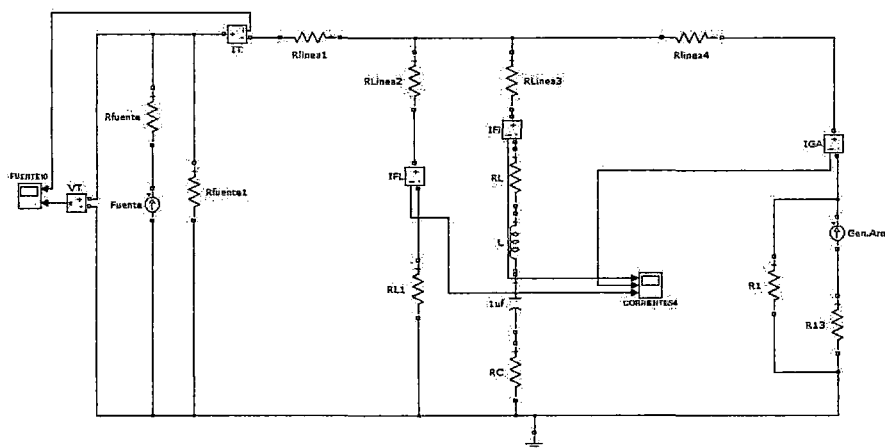
Sin embargo, es importante ver el comportamiento del filtro pasivo para armónicos y su influencia en una red eléctrica para así tener una comparación del funcionamiento con el nuevo tipo de filtro y al final el agregado que le ofrece este último.

A modo de contrastación se mostrará a continuación una simulación del filtro en una red afectada por el tercer armónico.

### 6.2.1.- Simulación del funcionamiento del filtro en una red eléctrica.

El circuito de la Figura N° 6.1 muestra la conexión de una carga lineal representada por RL1, una carga no lineal generadora de una corriente armónica de tercer orden representada por Gen. Arm, R1 y R13, una fuente de onda fundamental a 60 Hz representada por Fuente, Rfuente y Rfuente1, y un filtro pasivo sintonizado a 180 Hz que corresponde al armónico de tercer orden, representado por L,RL,C(1uf) y RC. También están presentes las resistencias de los conductores RLinea1, RLinea2, RLinea3 y RLinea4, que representarán las caídas de tensión en los conductores.

Figura N° 6.1: topología del circuito para simulación



Fuente: Elaboración propia

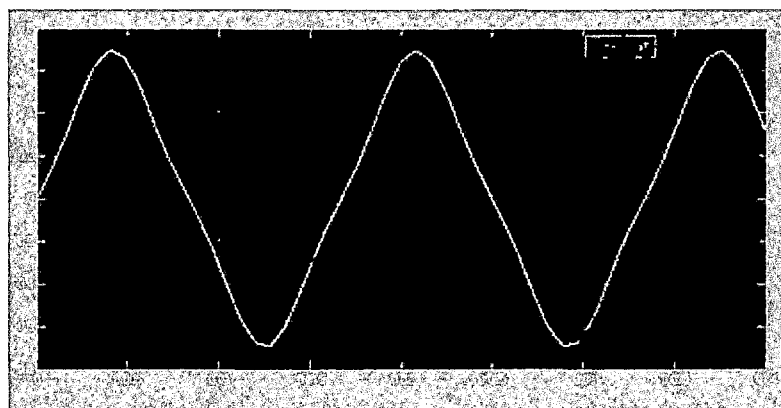
La fuente principal (la que crea la onda fundamental) representa a la tensión nominal de la red eléctrica, que en el Perú es de 220V a 60Hz. La carga lineal RL1 al ser alimentada con un voltaje cuya onda tiene forma senoidal origina una corriente también senoidal a la misma frecuencia, pero la carga no lineal representada por el Gen. Arm hace que una corriente de 180 Hz circule por el circuito hacia la fuente, provocando una distorsión en la onda de voltaje.

Veamos

- **SIN FILTRO**

Si se desconecta el filtro, la onda de corriente que proviene de la fuente se distorsiona, tal como se muestra en la Figura N° 6.2, ya no es una onda senoidal, ésta variación en la forma de onda dependerá de que armónicos y que cantidad afectan en ese instante al sistema.

**Figura N° 6.2: Onda de corriente total (sin filtro)**

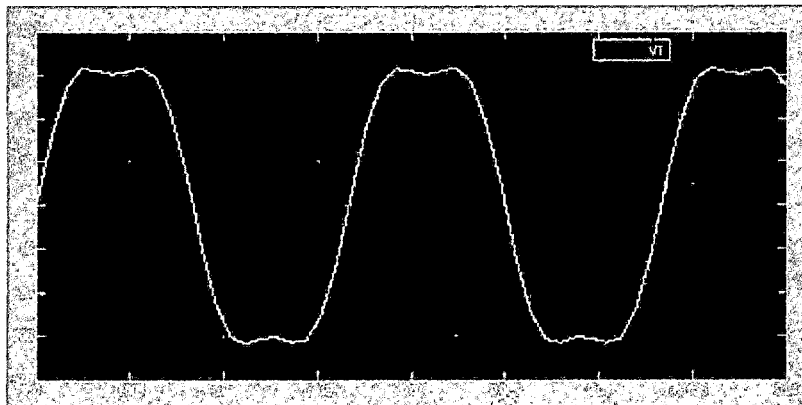


**Fuente: Elaboración propia**

Al circular la corriente armónica en el circuito e incidir en la impedancia de los conductores y la fuente, origina una variación en la forma de onda de tensión, generando así los armónicos de tensión, otra vez, estos varían la forma de onda de tensión dependiendo de la intensidad de la corriente

armónica que los origina. En la figura N° 6.3 se observa la onda fundamental afectada por el armónico de tercer orden.

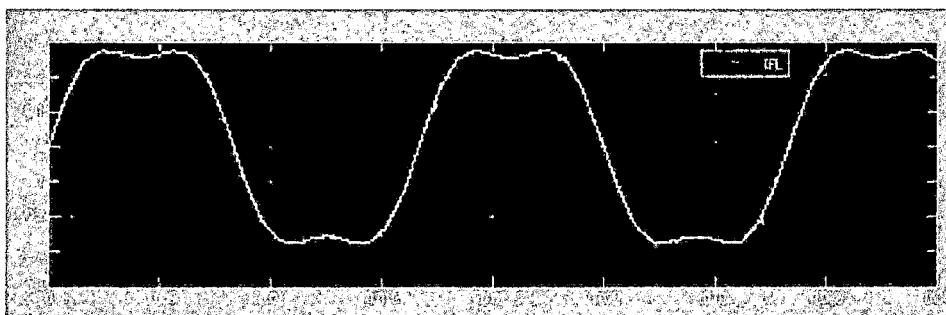
**Figura N° 6.3: Onda de voltaje total (sin filtro)**



**Fuente: Elaboración propia**

Inicialmente se indicó que una carga lineal al ser alimentada con una onda senoidal daba origen a una corriente senoidal a la misma frecuencia, pero al tener una tensión con una onda distorsionada, la corriente generada también será distorsionada, lo cual puede ocasionar diferentes problemas si es una carga sensible. En la figura N° 6.4 que se muestra a continuación podemos observar la corriente que consume la carga lineal ante la presencia de una onda armónica de tercer orden en el sistema.

**Figura N° 6.4: Onda de corriente de carga (sin filtro)**

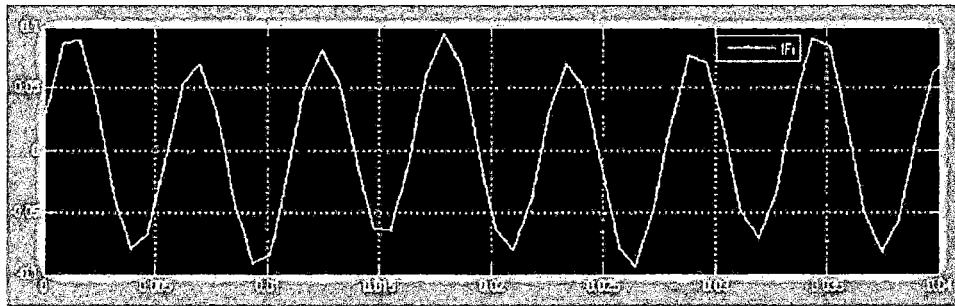


**Fuente: Elaboración propia**

## □ CON FILTRO

Ahora bien, al conectar el filtro sintonizado en 180 Hz, se observa que este ofrece una pequeña impedancia al paso de la corriente a esa frecuencia. Ante la onda distorsionada que contiene tanto la fundamental como la armónica el filtro consumirá una corriente según se muestra en la Figura N° 6.5, nuevamente la forma de esta onda dependerá de la cantidad de armónicos presentes en el sistema.

**Figura N° 6.5: Onda de corriente del filtro**

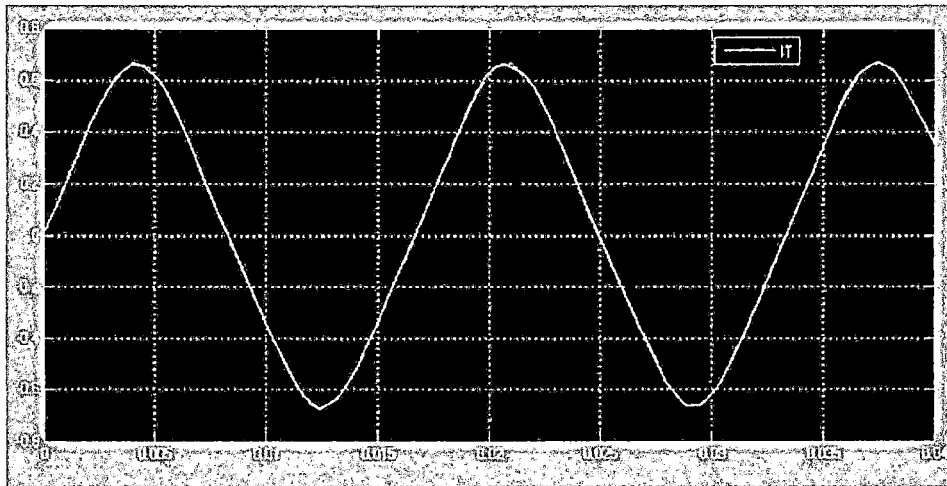


**Fuente: Elaboración propia**

De acuerdo con la primera ley de Kirchhoff, la corriente armónica que circula por RLinea4 hacia el generador de armónicos se descompondrá en corrientes que circulen por RLinea1, RLinea2 y RLinea3, cuyas intensidades dependerán de la impedancia total en cada línea. Ya que la rama formada por el filtro está sintonizada a 180Hz la impedancia a esta frecuencia es mínima, siendo el mejor camino para la onda armónica.

Como resultado se tendrá una menor distorsión en la corriente total, según se muestra en la gráfica de la Figura N° 6.6.

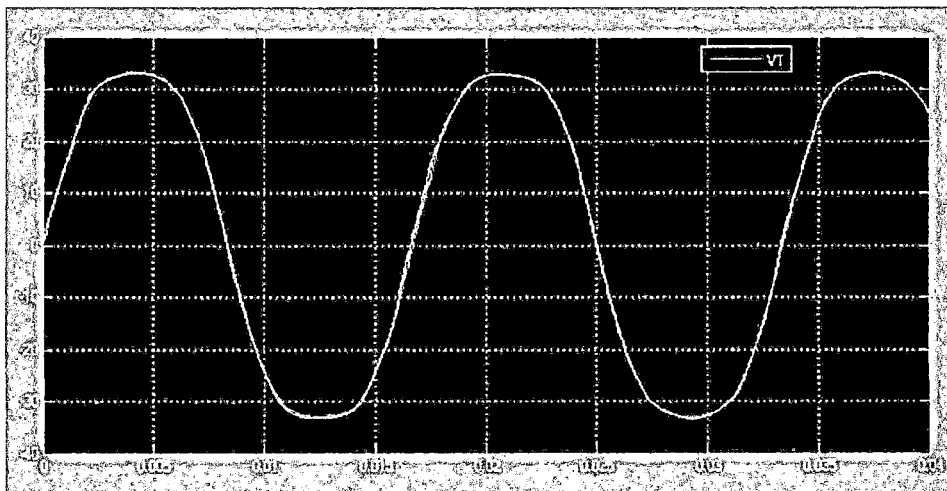
**Figura N° 6.6: Onda de corriente total (con filtro)**



**Fuente: Elaboración propia**

De la misma manera, la tensión se verá afectada en menor proporción, lo cual se muestra en la Figura N° 6.7.

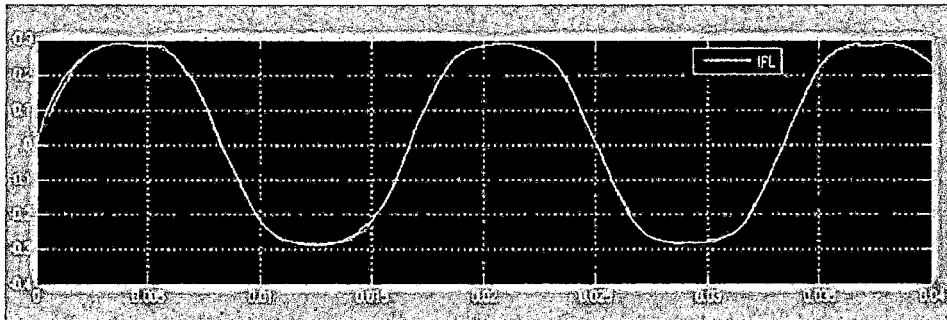
**Figura N° 6.7: Onda de voltaje total (con filtro)**



**Fuente: Elaboración propia**

En consecuencia, al tener una tensión cuya onda es casi senoidal, la onda de la corriente que circula por la carga lineal también tendrá una forma más próxima a la senoidal, tal como se muestra en la Figura N° 6.8.

**Figura N° 6.8: Onda de corriente de la carga (con filtro)**



**Fuente: Elaboración propia**

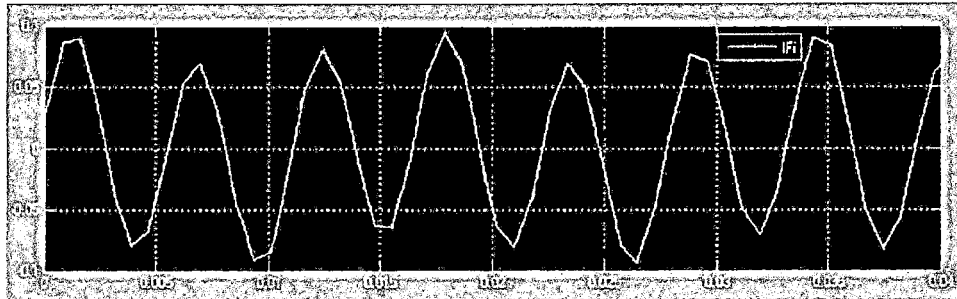
Hasta aquí es donde el estado actual de la técnica puede aportar. La diferencia con el nuevo tipo de filtro propuesto en este informe está basada en el aprovechamiento de la energía que hasta el momento es disipada por el filtro pasivo. Recordemos que el filtro pasivo consume corriente tanto de la armónica para la cual fue sintonizado como corriente proveniente de la onda fundamental (de 60 Hz).

En la Figura N° 6.5 pudimos observar que existe una corriente que circula tanto por el condensador como por la bobina del filtro pasivo. Reemplazando la bobina del filtro pasivo por un transformador, conectando en su lugar los terminales de uno de los devanados que llamaremos primario, podemos obtener en el otro par de terminales que en este caso llamaremos secundario una onda de tensión similar a la del primario, afectada por la relación de transformación que obedece al número de espiras de ambas bobinas.

Este transformador debe tener una inductancia tal que entre en armonía en combinación con el condensador a la misma frecuencia que se había logrado con la bobina. Entonces se tendrá en los terminales del secundario una onda que guarda relación con la onda que incide en el primario, tal como se muestra en la figura N° 6.9.



**Figura N° 6.9: Onda en el secundario del filtro**



**Fuente: Elaboración propia**

A esta onda se le puede dar diferentes usos, los cuales no son parte de esta investigación. Por ejemplo se puede rectificar y convertir en corriente continua, ya que puede ser almacenada en un acumulador o se puede cargar una batería.

## VII.- CONCLUSIONES

Habiendo realizado el proceso experimental y obtenido los resultados deseados se ha llegado a las siguientes conclusiones:

A.-Mediante el uso del nuevo filtro para armónicos es posible captar la onda a la cual se ha sintonizado y también parte de las otras ondas presentes en la red, entre ellas la onda fundamental, el transformador que es parte integral del nuevo filtro permite transmitir esta energía para poder darle una utilidad.

B.- El nuevo filtro para armónicos sigue el mismo principio de resonancia que utiliza un filtro pasivo paralelo, por ello fue necesario entender el funcionamiento de este último para realizar los cálculos de resonancia.

C.- Se elaboró una tabla con diferentes combinaciones para filtros de armónicos del tercer orden, en esta tabla se calculó la potencia que disipan los filtros pasivos paralelo en función de la capacidad del condensador. Se pudo observar que la potencia disipada por un filtro convencional, así como su selectividad depende no solo de los valores de capacitancia e inductancia sino también de la resistencia interna de los elementos del filtro. El nuevo filtro permitió recuperar aproximadamente el 60% de la energía que disiparía.

D.- Mediante el uso de este nuevo filtro es posible recuperar parte de la potencia que un filtro común disiparía, esta energía puede destinarse a otros usos originando de esta manera un ahorro económico. Es imposible recuperar toda la potencia disipada por un filtro pasivo ya que siempre existen pérdidas, aun así la instalación de este nuevo tipo de filtro resulta viable técnica y económicamente.

## VIII.- RECOMENDACIONES

La presente investigación fue llevada a cabo tanto en laboratorio como en un medio virtual, se obtuvo una gran cantidad de datos que poco a poco optimizaron los resultados. Dichos datos muchas veces fueron inesperados o poco usuales. Aquí propongo una lista de recomendaciones para continuar la investigación en este tema.

A.- Los nuevos filtros deben ser probados aplicando los valores nominales de operación ya que los parámetros del filtro, incluso la resistencia interna de las bobinas varían ante diferentes niveles de tensión y frecuencia. También es necesario realizar un estudio de armónicos y un análisis de impedancia en la red donde se instalarán los filtros para armónicos, esto nos permitirá fabricarlos adecuadamente.

B.- La presente investigación se ha basado en el filtro pasivo paralelo, pero se recomienda investigar también otras topologías, entre ellas el filtro amortiguado, para encontrar una mayor eficiencia del filtro.

C.- Se ha determinado la potencia que disipa un filtro pasivo paralelo convencional mediante la simulación y el uso de fórmulas, es necesario para una mayor aproximación realizar dicha medición en un filtro físico instalado en funcionamiento.

D.- Los estudios realizados indican que la energía reciclada se puede utilizar rectificando esta onda distorsionada y cargar una batería, y esta alimentaría un circuito en DC. Se deberá probar otro tipo de usos y cargas para este filtro.

## **IX.-PERSPECTIVAS DEL TRABAJO DE INVESTIGACIÓN.**

El nuevo tipo de filtro para armónicos ha sido probado y funciona adecuadamente con cargas resistivas, también demuestra su operatividad rectificando la onda que incide sobre el filtro para poder así convertir la tensión variable en tensión continua.

Las aplicaciones para este tipo de filtro son diversas, se espera poder utilizarlo como fuente de energía para un filtro activo de armónicos, como cargador de baterías o fuente de energía para diversas aplicaciones.

## **X.-REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.**

- 1.- Chapman, S. (2012). Máquinas eléctricas. En Roig, V.P., Delgado R.A. (Eds.), (5ª Edición, pp. 51-67). McGraw-Hill/Interamericana de España. S.A.U. España.
- 2.- Fraile, J. (2008). Máquinas Eléctricas. En García (Ed.), (6ª Edición, pp.181-210). McGraw-Hill/Interamericana de España. S.A.U. España.
- 3.- López, F., Morales, O. (2007). Circuitos Eléctricos II. En Ciencias S.R. Ltda. (Ed.), (3ª Edición, pp. 29-38). Perú.
- 4.- Muñoz, A. (1999). Calidad de la Energía. Manual técnico de ProCobre. Chile.
- 5.- Noham, N., Undeland, T., Robbins, W. (2009). Electrónica de Potencia. En Roig, V.P. (Ed.), (3ª Edición, pp. 265-267, 650-658). Mc Graw-Hill/Interamericana Editores, S. A. México.
- 6.- Reyes, G. (1996). Armónicas en sistemas de distribución de energía eléctrica. Tesis para obtener el título de Maestro en ciencias de la ingeniería eléctrica con especialidad en Potencia. Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica de la Universidad de Nuevo León, Nuevo León, México.
- 7.- Salvador, M. (2001). Máquinas Eléctricas Estáticas. En Salvador Editores (Ed.), (pp. 1-18). Perú.
- 8.- Wildi, T. (2007). Máquinas Eléctricas y Sistemas de Potencia. En Guerrero, P. (Ed.), (6ª Edición pp. 484-490), Pearson Educación. México.

### **Infereferencias:**

- 1.- Ministerio de Energía y Minas (1997) Norma Técnica de Calidad de los Servicios Eléctricos, Disponible en: <http://www.osinerg.gob.pe>, Directorio:  
[/newweb/pages/GFE/Normativa/2\\_NormativaTecnicaSectorElectrico.html](http://newweb/pages/GFE/Normativa/2_NormativaTecnicaSectorElectrico.html)

## **XI.-ANEXOS**

**Anexo1: Presupuesto**

**Anexo2: Matriz de consistencia**

**Anexo2: Matriz de Consistencia**  
**UTILIZACIÓN DE LA ENERGÍA PROVENIENTE DE LA DISTORSIÓN ARMÓNICA EN UN SISTEMA ELÉCTRICO**  
**Autor: Francisco Añazgo Barrantes Asesor: Ing. Edgar del Águila Vela**

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	OBJETIVOS	HIPÓTESIS	METODOLOGÍA	POBLACIÓN Y MUESTRA
<p><b>1. Problema General</b></p> <p>Los métodos actuales utilizados para contrarrestar los efectos de los armónicos en un sistema eléctrico originan una pérdida considerable de energía, lo cual nos lleva a la siguiente interrogante:</p> <p>¿Es posible utilizar la energía proveniente de la distorsión armónica en vez de disiparla?</p>	<p><b>1. Objetivo General</b></p> <p>Diseñar un nuevo filtro capaz de captar la energía proveniente de la distorsión armónica en un sistema eléctrico para transformarla en energía utilizable.</p>	<p><b>1. Hipótesis General</b></p> <p>Diseñando un nuevo tipo de filtro para armónicos será posible aprovechar parte de la energía proveniente de la distorsión armónica en un sistema eléctrico que normalmente es disipada.</p>	<p><b>Tipo de Investigación</b></p> <p>El tipo de investigación fue experimental y aplicada. Se probaron los resultados variando los parámetros eléctricos en un laboratorio y en un software. Se diseñó un nuevo filtro para armónicos.</p> <p><b>Método</b></p> <p>El método utilizado fue el experimental.</p>	<p><b>Población</b></p> <p>El experimento se realizó en el laboratorio de máquinas eléctricas de la Facultad de Ingeniería Eléctrica y Electrónica de la Universidad Nacional del Callao, y también se simuló en el software Matlab. Se armó un circuito serie formado por un condensador y el primario de un transformador, y se conectaron los terminales a la red eléctrica buscando la frecuencia de resonancia del circuito. La población está conformada por todas las combinaciones de condensadores y transformadores en serie realizadas en esta experiencia.</p>
<p><b>2. Problemas Específicos</b></p> <p>a. ¿Qué métodos se utilizan actualmente para reducir el nivel de armónicos de potencia en nuestro país?</p>	<p><b>2. Objetivos Específicos</b></p> <p>a. Identificar los métodos más utilizados actualmente en el Perú para reducir el nivel de los armónicos en las redes eléctricas.</p>	<p><b>2. Hipótesis Específicas</b></p> <p>a. Conociendo los métodos actuales para reducir el nivel de los armónicos será posible consolidar las bases teóricas para el diseño del nuevo filtro.</p>	<p><b>Diseño de la investigación:</b> Experimental y Prospectivo.</p> <p>Se demostró la siguiente ecuación:</p> <p><math>Y=f(X)</math> Donde:</p>	<p><b>Población de Estudio:</b></p>
<p>b. ¿Cuánta potencia disipa un filtro pasivo?</p>	<p>b. Determinar la potencia que disipan los filtros pasivos de armónicos en condiciones nominales</p>	<p>b. Al determinar la potencia disipada por un filtro pasivo se puede conocer la cantidad de energía que podemos aprovechar con el nuevo filtro.</p>	<p><b>Variable Dependiente</b> Y: Energía recuperada por el nuevo filtro para armónicos.</p> <p><b>Variable Independiente</b> X: Energía disipada por un filtro pasivo para armónicos.</p>	<p>Ondas de tensión generadas en el laboratorio y simuladas en el software Matlab.</p>
<p>c. ¿Cuánto de esta potencia perdida se podría recuperar utilizando el nuevo filtro para armónicos?</p>	<p>c. Determinar la potencia que se puede obtener de la distorsión armónica mediante el uso del nuevo filtro para armónicos.</p>	<p>c. La cantidad de potencia que se puede obtener de la distorsión armónica determinará la viabilidad técnica y económica del nuevo filtro.</p>	<p><b>Indicadores</b> x1: Impedancia del circuito x2: Tensión de entrada x3: Corriente de entrada x4: Frecuencia de entrada x5: Potencia total y1: Tensión de salida y2: Corriente de salida y3: Potencia recuperada</p>	<p><b>Muestra:</b></p> <p>Debido a que el diseño de esta investigación es experimental, se ha elegido una muestra no probabilística que depende del criterio del investigador y no de la probabilidad. La validez de esta muestra se consolida con la repetición de los resultados. La muestra es la misma que la población.</p>

**Anexo1: PRESUPUESTO.**

<b>PRESUPUESTO DEL PROYECTO DE TESIS</b>					
<b>ITEM</b>	<b>DESCRIPCIÓN</b>	<b>CANT.</b>	<b>COSTO EN NUEVOS SOLES</b>		
			<b>UNIT.</b>	<b>PARCIAL</b>	<b>TOTAL</b>
<b>1</b>	<b>MATERIALES</b>				<b>17,507.00</b>
	Papel bond A-4 80 gr. (millar)	2	25.00	50.00	
	Cuadernos (unidad)	2	3.00	6.00	
	USB (Unidad)	1	37.00	37.00	
	Lapiceros (Unidad)	3	3.00	9.00	
	Fotocopias (unidad)	500	0.05	25.00	
	Tinta para impresora (glb)	1	180.00	180.00	
	Dispositivos electrónicos (glb)	1	100.00	100.00	
	Componentes eléctricos (glb)	1	300.00	300.00	
	Analizador de redes (unidad)	1	15,000.00	15,000.00	
	Pinza amperimétrica rms true (unidad)	1	1,200.00	1,200.00	
	Uso de Pc y software (glb)	1	600.00	600.00	
<b>2</b>	<b>SERVICIOS</b>				<b>13,272.00</b>
	Asesoría 1	1	1,500.00	1500	
	Asesoría 2	1	372.00	372	
	Honorarios (mensual)	2	3,000.00	6000	
	Personal técnico (mensual)	2	800.00	1600	
	Viáticos (mensual)	2	1,600.00	3200	
	Movilidad	1	600.00	600	
<b>3</b>	<b>PROPIEDAD INTELECTUAL</b>				<b>14,000.00</b>
	Costos por investigación y desarrollo	1	8,000.00	8,000.00	
	Costos de patente y anualidades	1	6,000.00	6,000.00	
	<b>TOTAL EN NUEVOS SOLES</b>				<b>44,779.00</b>
	<b>TOTAL EN DÓLARES</b>		18/02/2015 TC:3.081		<b>14,533.92</b>