

UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA

CARRERA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA

***EFÉCTOS DEL ACORTAMIENTO DE PASO EN UN MOTOR
TRIFÁSICO DE INDUCCIÓN CON ESTATOR PLÁSTICO.***

**TESIS PREVIA A LA OBTENCIÓN DEL
TÍTULO DE INGENIERO ELÉCTRICO**

AUTOR:

John Paúl Díaz Yépez

DIRECTOR:

Ing. Flavio Quizhpi

CUENCA-ECUADOR

2014

Ingeniero FLAVIO QUIZHPI Director de Tesis

CERTIFICA: Que la tesis con el título “EFÉCTOS DEL ACORTAMIENTO DE PASO EN UN MOTOR TRIFÁSICO DE INDUCCIÓN CON ESTATOR PLÁSTICO”, ha sido desarrollada por el estudiante John Paúl Díaz Yépez, ha sido revisada y asesorada de acuerdo a los requerimientos establecidos en la propuesta inicial, por lo que después de reunir los requisitos estipulados en los Documentos Generales e Instructivos de Graduación de la Universidad, autorizo su presentación para los fines legales consiguientes.

Cuenca, Noviembre del 2014

A handwritten signature in blue ink, appearing to read 'Flavio Quizhpi', is written over a faint, large, light-blue oval watermark or background shape.

Ing. Flavio Quizhpi

DECLARACIÓN DE RESPONSABILIDAD

Los conceptos desarrollados, análisis realizados y las conclusiones del presente trabajo, son de exclusiva responsabilidad de los autores, con trabajo y obtención de los materiales y herramientas facilitados por el taller de electricidad perteneciente a la Universidad Politécnica Salesiana Sede Cuenca, y autorizo la utilización de la misma con fines académicos.

Cuenca, Noviembre del 2014

A handwritten signature in blue ink, appearing to read 'John Paúl Díaz Yépez', with a stylized flourish at the end.

John Paúl Díaz Yépez

Dedicatoria

A mis queridos padres Mateo y Beatriz que con su esfuerzo, dedicación y apoyo incondicional siempre me incentivarón a conseguir todos los objetivos que me he propuesto en la vida, en especial la culminación de la carrera universitaria y del presente trabajo de tesis

A mi querida hermana Katty que me apoyó en todo momento con el ánimo necesario para continuar y completar los estudios.

Agradecimientos

Al Ingeniero Flavio Quizhpi, director de tesis, por su colaboración en el planteamiento, desarrollo y dirección del presente trabajo.

A todos los que de una u otra manera colaborarán para que la presente tesis se la realice de forma clara y consisa.

Índice general

1. DISEÑO DEL MOTOR DE INDUCCIÓN TRIFÁSICO CON ESTATOR PLÁSTICO.	14
1.1. CÁLCULO DEL PASO ACORTADO DE LAS BOBINAS DEL MOTOR DE INDUCCIÓN.	14
1.1.1. NÚMERO DE RANURAS.	16
1.1.2. PASO POLAR.	16
1.1.3. CÁLCULO DEL PASO DE BOBINADO.	16
1.1.3.1. PASO DIAMETRAL.	16
1.1.3.2. PASO ACORTADO.	17
1.1.3.3. PASO ALARGADO.	17
1.1.3.4. RANURA POR FASE.	17
1.1.4. BOBINADO TRIFÁSICO DE DOBLE CAPA.	18
1.2. DISEÑO DE LAS BOBINAS DE PASO ACORTADO DEL MOTOR DE INDUCCIÓN	18
1.3. CONSTRUCCIÓN DE LAS BOBINAS DE PASO ACORTADO DEL MOTOR DE INDUCCIÓN SEGÚN LA NORMA IEEE STD 519 DE 1992	24
1.3.1. RECOMENDACIONES PRÁCTICAS Y REQUERIMIENTOS DE LA IEEE PARA EL CONTROL DE ARMÓNICOS EN SISTEMAS ELÉCTRICOS DE POTENCIA.	24
2. PRUEBAS DE LABORATORIO	27
2.1. Pruebas de corriente continua.	27
2.2. Pruebas de rotor bloqueado.	29
2.3. Pruebas de Vacío.	30
2.4. Circuito Equivalente.	33
2.5. Cálculo de la eficiencia del motor de inducción.	36
2.5.1. Comportamiento del motor con la carga del edificio Mario Rizzini	37
3. ANÁLISIS DE ARMÓNICOS	42
3.1. ANÁLISIS MEDIANTE EL MÉTODO LINEAL.	42

3.1.1.	LÍMITES DE LA DISTORSIÓN ARMÓNICA	55
3.2.	Análisis mediante un software como el Matlab.	56
3.2.1.	Torque vs Tiempo	59
3.2.2.	Velocidad vs Tiempo	59
3.2.3.	Corriente vs Tiempo	60
3.2.4.	Impedancia vs Tiempo	61
3.3.	Análisis técnico de los armónicos del motor de inducción de paso entero y de paso acortado.	61
3.4.	Evaluación de las ventajas y desventajas del motor de inducción de paso acortado.	61
3.4.1.	Ventajas	61
3.4.2.	Desventajas	62
3.5.	Análisis de resultados y aplicaciones factibles para un sistema eléctrico. . .	62
4.	Conclusiones y Recomendaciones	63
4.1.	Conclusiones	63
4.2.	Recomendaciones	64
	Bibliografía	64

Índice de figuras

1.1. Bobina	15
1.2. Bobinado de paso acortado	17
1.3. Bobinado trifasico de doble capa	18
1.4. Motor de inducción trifásico	19
1.5. Datos en la placa del motor	20
1.6. Esquema básico simplificado del devanado trifásico de paso acortado en re- presentación lineal (a) y circunferencial (b) para un parde polos	23
1.7. Bobinado final	26
2.1. Fasores de la I_o	32
2.2. Equivalente Thevenin.	33
2.3. Tensión y corriente a lo largo de 24 horas.	37
2.4. Corriente Máxima L1.	37
2.5. Corriente Máxima L2.	38
2.6. Corriente Máxima L3.	38
2.7. Tensión Máxima L1.	39
2.8. Tensión Máxima L2.	39
2.9. Tensión Máxima L3.	40
2.10. Forma de onda L1.	40
2.11. Forma de onda L2.	41
2.12. Forma de onda L3.	41
3.1. Corrientes aguas arriba-aguas abajo L1.	43
3.2. (a)Armónicas aguas arriba-(b)Armónicas aguas abajo	44
3.3. Corrientes aguas arriba-aguas abajo L2.	45
3.4. (a)Armónicas aguas arriba-(b)Armónicas aguas abajo	46
3.5. Corrientes aguas arriba-aguas abajo L3.	47
3.6. (a)Armónicas aguas arriba-(b)Armónicas aguas abajo	48
3.7. Tensiones aguas arriba-aguas abajo L1.	49
3.8. (a)Armónicas aguas arriba-(b)Armónicas aguas abajo	50
3.9. Tensiones aguas arriba-aguas abajo L2.	51

3.10. (a)Armónicas aguas arriba-(b)Armónicas aguas abajo	52
3.11. Tensiones aguas arriba-aguas abajo L3.	53
3.12. (a)Armónicas aguas arriba-(b)Armónicas aguas abajo	54
3.13. Limites de armónicos.[1]	55
3.14. Torque vs Tiempo.	59
3.15. Velocidad vs Tiempo.	59
3.16. Corriente vs Tiempo.	60
3.17. Impedancia vs Tiempo.	61

Índice de cuadros

1.1. Placa del motor de inducción	19
1.2. Medidas del Estator.	20
2.1. Valores medidos de la prueba con corriente continua.	27
2.2. Valores medidos de la prueba con rotor bloqueado.	29
2.3. Valores medidos de la prueba de vacío.	31
3.1. Parámetros del motor de inducción	57

Algoritmos

3.1. Programación en Matlab para análisis de armónicos.[2]	56
3.2. Programación del cálculo de parámetros del motor de inducción. [2]	57
3.3. Programación de simulación del motor de inducción.[2]	58

INTRODUCCIÓN

La presente tesis se la realiza a partir del análisis de armónicos, cuáles son los problemas que producen, identificar los armónicos que presentan un mayor número de perturbaciones en la red eléctrica: a partir de estos planteamientos buscar soluciones que permitan eliminar o reducir el nivel de afectaciones que provocan como son el funcionamiento incorrecto de equipos que fueron diseñados y construidos para operar en condiciones normales, es decir, con poca distorsión armónica, los motores de inducción son sensibles a los armónicos y se ven sometidos a todas las variaciones de la fuente de potencia, lo que afecta su funcionamiento y las características propias de trabajo.

Partiendo del trabajo ya realizado por los Ingenieros Eduardo Valle y Gonzalo Contreras[2], se procede a modificar el paso de las bobinas que se encuentran en el filtro pasivo instalado en la red eléctrica de la Universidad Politécnica Salesiana Sede Cuenca, para éste fin se realiza los cálculos para el diseño de las nuevas bobinas que contendrá el motor, se analiza cuantos grados eléctricos es lo que se va a recortar las bobinas y una vez obtenidos los resultados de los cálculos, se procede a construir el motor para armónicos con el nuevo bobinado, se verifica que se encuentre correctamente construido, se realizan las pruebas pertinentes basadas en las recomendaciones de la IEEE std 4[3], éstas son las pruebas de vacío, pruebas de corriente continua y prueba de rotor bloqueado, en cada una de estas pruebas se verifica diferentes aspectos del funcionamiento del motor, una vez comprobado el mismo, se procede a instalarlo en la red eléctrica de la Universidad.

El proceso para comprobar el comportamiento del motor consiste en realizar mediciones constantes en el periodo de mayor carga a la red eléctrica, para este fin en primer lugar se utiliza el medidor de calidad de energía eléctrica marca FLUKE modelo 1735 POWER LOGGER ANALYST para determinar cuál es el período de tiempo donde se presenta mayor carga.

Con los datos obtenidos en las mediciones se puede identificar los lapsos de tiempo con mayor carga y realizar mediciones para comparar las gráficas obtenidas en las mediciones y determinar si se obtuvo mejoras o perjuicios al cambiar el tipo de devanado a paso acortado.

Para éste propósito se utiliza el osciloscopio digital Marca: GwINSTEK Modelo: GDS-1102A-U, y los datos se los obtiene utilizando el software libre FREEWAVE V3.23, las sondas que se utilizan para medir la corriente estan atenuadas y multiplicadas por un factor de 100X para obtener la medición en Amperios. Ésta medición se realiza colocando las sondas de corriente atenuadas simultaneamente en los terminales de la bobina al ingreso y a la salida de la misma para comparar el comportamiento de las corrientes al mismo tiempo aguas arriba y aguas abajo del motor.

Para verificar como es el comportamiento de las tensiones se debe tomar mediciones entre líneas, para éste propósito se utiliza el osciloscopio digital Marca: GwINSTEK Modelo:

GDS-1102A-U, y los datos se los obtiene utilizando el software libre FREEWAVE V3.23, las sondas que se utilizan para medir la tensión están atenuadas y multiplicadas por un factor de 500X para obtener la medición en Voltios, como se está trabajando con sistema trifásico se toma las mediciones con la combinación de todas las líneas.

Mediante la utilización de simuladores matemáticos, en la presente tesis se utiliza el Matlab se puede calcular y graficar la distorsión armónica total (THD), que es un parámetro muy utilizado para el análisis de los armónicos.

El objetivo a verificar es comprobar cuál es el comportamiento de los armónicos cuando se modifica el paso del bobinado en la construcción de un filtro pasivo para armónicos, con los datos obtenidos se comprueba si se mejora en la disminución de los armónicos y el análisis final correspondiente.

Capítulo 1

DISEÑO DEL MOTOR DE INDUCCIÓN TRIFÁSICO CON ESTATOR PLÁSTICO.

1.1. CÁLCULO DEL PASO ACORTADO DE LAS BOBINAS DEL MOTOR DE INDUCCIÓN.

Un bobinado es un conjunto de alambres generalmente de cobre que se encuentran formando varias vueltas en la parte interior de un motor eléctrico. Las bobinas están compuestas por éstas vueltas de alambres que se las denomina espiras las cuales son conductores cerrados, es decir completan un circuito. Dentro de la espira ocurre un fenómeno llamado campo magnético, el cual adquiere una aceleración angular con lo que gira en el sentido de su momento magnético y tiende a colocarse en paralelo con el campo magnético. Éste es el principio del funcionamiento de los motores eléctricos. La bobina figura 1.1 almacena energía en forma de campo magnético, su característica es que se oponen a los cambios bruscos de la corriente que circula entre las mismas, en otras palabras cuando se modifica la corriente que circula por las bobinas al momento de conectar o desconectarlas éstas tratarán de mantener su condición anterior.



Figura 1.1: Bobina

La unidad con la que se mide la capacidad magnética de la bobina, medida en líneas de flujo (Wb) producidas por un amperio es el Henrrio (H), los valores más comunes de las bobinas están en el orden de los miliHenrrios (mH), esta medida depende de algunos aspectos como:

- El número de espiras que tenga la bobina, es decir, a más vueltas mayor inductancia, por consiguiente mayor valor en Henrrios.
- El diámetro de las espiras, a mayor diámetro mayor inductancia, es decir, mayor valor en Henrrios.
- La longitud del cable que conforman las espiras de la bobina.
- El material que conforma el núcleo si lo tuviese.

Las aplicaciones de las bobinas generalmente son en transformadores para reducir o elevar la tensión, en los motores eléctricos, éstos pueden ser en corriente continua CC o en corriente alterna CA, se los usa también en reactores, solenoides, contactores o en bobinas para filtrar o bloquear los componentes de corriente alterna, etc. Las bobinas se las construye con alambres de cobre esmaltado, cobre forrado en algodón, alambres de aluminio forrado, barras de cobre desnudas o forradas, barnices aislantes al aire o al horno, cartón piedra, espaguetis (tela, algodón, poliéster, pvc con adhesivo, papel con adhesivo), borneras, etc.

Para poder realizar el cálculo de una bobina debemos comprender algunos términos que se usan, entre los cuales tenemos:

1.1.1. NÚMERO DE RANURAS.

Es el número total de agujeros o ranuras en el cuerpo del estator donde debemos insertar el arrollamiento de alambres.

Existe un parámetro denominado el número de grados geométricos, es la separación entre dos ranuras consecutivas, cuya fórmula 1.1 es siempre:

$$\alpha = \frac{360 * p}{Nr} \quad (1.1)$$

p = pares de polos

Nr = número de ranuras

Ésta fórmula se debe a que el número de ranuras Nr están uniformemente distribuidas en los 360 grados que tiene la circunferencia del estator.

1.1.2. PASO POLAR.

Se denomina paso polar a la cantidad de ranuras que contiene cada polo, la ecuación 1.2 representa el cálculo.

$$\tau p = \frac{Nr}{2p} + 1 \quad (1.2)$$

τp = paso polar

Nr = número de ranuras

$2p$ = número de polos

1.1.3. CÁLCULO DEL PASO DE BOBINADO.

En algunos bobinados el paso de la bobina es constante para todas las bobinas y grupos de devanados, en otros arrollamientos existen pasos de bobinas diferentes, esto depende de las formas de las bobinas que conforman un grupo de bobinas, los principales son:

Paso diametral

Paso acortado

Paso alargado.

1.1.3.1. PASO DIAMETRAL.

Es el paso normal de un devanado. Por ejemplo una maquina de $Nr = 36$ ranuras y $2p = 4$ polos, tiene un paso diametral de 1.2:

$$\tau p = \frac{Nr}{2p} + 1 = \frac{36}{4} + 1 = 10 \text{ ranuras, es decir ,como resultado tenemos 1:10}$$

1.1.3.2. PASO ACORTADO.

Se logra un paso acortado 1.2 cuando se toma un paso que contenga menos ranuras intermedias de las que requiere el paso diametral, por ejemplo un motor de $Nr = 30$ ranuras y $2p = 2$ polos, el paso diametral será 1.2:

$$\tau p = \frac{Nr}{2p} + 1 = \frac{30}{2} + 1 = 16 \text{ ranuras, es decir, como resultado tenemos } 1:16$$

Un paso acortado en una ranura, si toma el valor de 1:15 ,que es el resultado de restar una ranura de las 16 originales.

Un paso acortado en dos ranuras si se toma 1:14 ,que es el resultado de restar dos ranuras de las 16 originales.

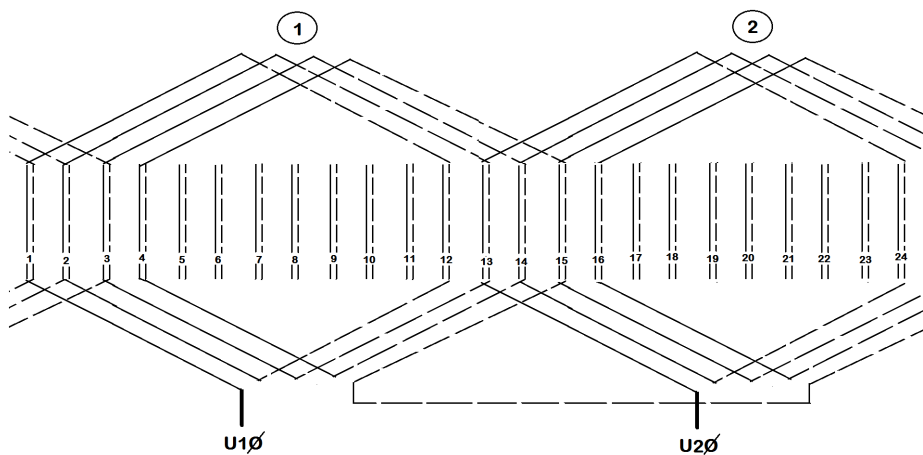


Figura 1.2: Bobinado de paso acortado

1.1.3.3. PASO ALARGADO.

En éste caso se tomará un paso que contenga más ranuras intermedias de las que requiere el paso diametral, por ejemplo un motor de $Nr = 30$ ranuras y $2p = 6$ polos, el paso diametral será 1.2:

$$\tau p = \frac{Nr}{2p} + 1 = \frac{30}{6} + 1 = 6 \text{ ranuras, es decir, como resultado tenemos } 1:6$$

Un paso alargado en una ranura da al tomar 1:7 ,que es el resultado de aumentar una ranura a las 6 originales.

También será un paso alargado en dos ranuras si se toma 1:8 ,que es el resultado de aumentar dos ranura a las 6 originales.

1.1.3.4. RANURA POR FASE.

La ecuación 1.3 para el cálculo de las ranuras por polo y fase expresa la cantidad de ranuras que formarán los polos del estator.

$$q = \frac{Nr}{4 * Nf} \tag{1.3}$$

1.1.4. BOBINADO TRIFÁSICO DE DOBLE CAPA.

Se define como capa doble 1.3 cuando en cada ranura hay dos lados de bobina y están separadas por un material aislante, en un bobinado como éste, el número total de bobinas es igual al número de ranuras del núcleo estatórico.

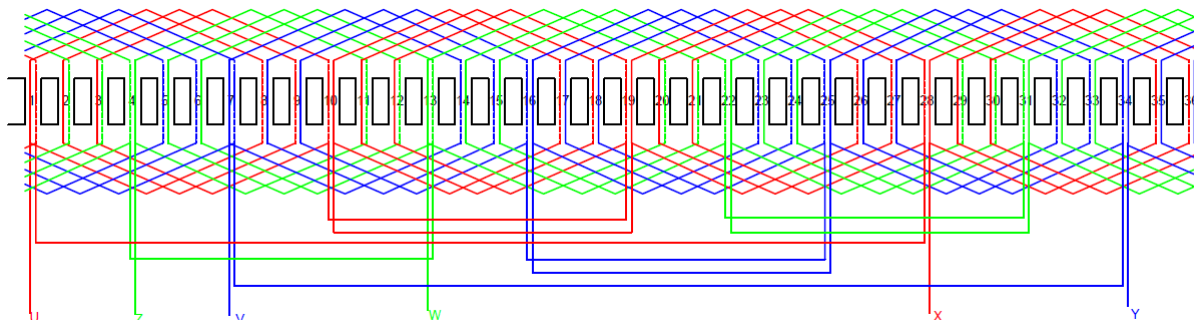


Figura 1.3: Bobinado trifásico de doble capa

La figura 1.3 demuestra como queda el diagrama del bobinado que se procede a armar en la presente tesis, y se la puede describir como:

Número de ranuras: 36

Velocidad Nominal en Revoluciones por minuto: 1800

Series:

U - ranura 1

V - ranura 7

W- ranura 13

Se tienen 9 puentes:.

9-18, 11-19, 27-36, 15-24, 17-25, 33-6, 21-30, 23-31, 3-12

Paso concentrico:

6 bobinas 2 elementos

1-8 / 1-10 (activo 1-9)

6 bobinas 1 elemento paso 1-8

1.2. DISEÑO DE LAS BOBINAS DE PASO ACORTADO DEL MOTOR DE INDUCCIÓN

Entre los diferentes tipos de motores de corriente alterna tenemos el motor asíncrono o de inducción, éstos son motores eléctricos en los que el rotor jamás llega a girar en la misma frecuencia con la que lo hace el campo magnético del estator. Cuanto mayor es el par motor mayor es ésta diferencia de frecuencias.

El motor de inducción trifásico a utilizar es el que se encuentra funcionando en el sótano de la Universidad Politécnica Salesiana sede Cuenca.



Figura 1.4: Motor de inducción trifásico

Los datos de placa del motor de inducción se presentan en la siguiente tabla 1.1:

DATOS	
Número de fases	3
Voltaje	220/440V
Velocidad	3450rpm
Frecuencia	60Hz
Corriente	2.2/3.8A
Potencia	3Hp

Tabla 1.1: Placa del motor de inducción



Figura 1.5: Datos en la placa del motor

Las características y medidas del estator 1.2 son las siguientes:

Medidas del Estator	
Largo geométrico	$l_g = 92mm$
Diámetro interno	$\phi_{int} = 97,9mm$
Diámetro externo	$\phi_{ext} = 164,5mm$
Numero de ranuras	36

Tabla 1.2: Medidas del Estator.

Para comenzar a diseñar el bobinado del motor de inducción se considera cuáles son las dimensiones del estator 1.2, luego se establece la velocidad que se puede seleccionar dependiendo del número de polos, para el presente caso la velocidad nominal es de 1800 rpm que nos da el equivalente a 4 polos, la característica que debe tener el motor es que las bobinas sólo contienen una espira, las fórmulas que se utilizan son las que se encuentran en el libro de Giorgio Crisci[4].

Con lo mencionado anteriormente los parámetros de que disponemos son:

Número de ranuras $Nr = 36$

Número de polos $2p = 4$

Polos $p = 4/2 = 2$

Número de fases $Nf = 3$

Iniciamos calculando el número de grados eléctricos 1.1 que tiene el estator:

$$\alpha = \frac{360 * p}{Nr}$$

obtenemos p de:

$$2p = 4$$

$$p = \frac{4}{2}$$

$$p = 2$$

entonces se tiene:

$$\alpha = \frac{360 \cdot 2}{36}$$

$$\alpha = 20^\circ \text{ grados eléctricos}$$

Éste valor de 20° grados eléctricos es un valor de desplazamiento de una ranura a otra, por lo que representa los grados que se puede recortar el paso de cada bobina para poder comprobar si es que existe una mejora o no en reducir el número de armónicos motivo de la presente tesis.

El paso polar 1.2 que tiene el filtro originalmente es:

$$\tau p = \frac{Nr}{2p} + 1$$

$$\tau p = \frac{36}{4} + 1$$

$$\tau p = 9 + 1$$

$$\tau p = 10$$

La relación es 1:10 que es el paso entero de bobina y que es igual al paso polar.

Como el objetivo es trabajar con paso acortado y de acuerdo a los cálculos anteriores se reduce el paso en dos ranuras:

$$\text{Paso entero } \tau p = 10$$

Se realiza un paso acortado en dos ranuras, por lo tanto:

$$10 - 2 = 8$$

Entonces se toma la relación 1:8

El número de ranuras por polo y fase 1.3 que se tiene es:

$$q = \frac{Nr}{4 \cdot Nf}$$

$$q = \frac{36}{4 \cdot 3}$$

$$q = 3rpf$$

Como es un devanado doble capa, el número de bobinas elementales por par de polos y fase tiene el valor de:

$$b = 2 \cdot q$$

donde b es el número de bobinas elementales

calculando tenemos:

$$b = 2 * 3 = 6$$

Ahora debemos calcular el factor de devanado 1.4:

$$K_w = K_p * K_d \quad (1.4)$$

donde:

K_w =factor de devanado

K_p =factor de paso de un devanado 1.6

K_d =factor de distribución 1.5

Para calcular el factor de distribución K_d se utiliza la siguiente ecuación:

$$K_d = \frac{\text{sen} \left[q * \left(\frac{\alpha}{2} \right) \right]}{q * \text{sen} \left(\frac{\alpha}{2} \right)} \quad (1.5)$$

donde:

q : número de ranuras por polo fase

α : número de grados eléctricos

$$K_d = \frac{\text{sen} \left(3 * \frac{20}{2} \right)}{3 * \text{sen} \left(\frac{20}{2} \right)}$$

$$K_d = \frac{\text{sen}(30^\circ)}{3 \text{sen}(10^\circ)}$$

$$K_d = 0,96$$

Con el factor de paso de un devanado K_p se tiene:

$$K_p = \text{sen} \frac{\rho}{2} \quad (1.6)$$

donde:

ρ : paso polar en grados eléctricos

El paso eléctrico 1.7 se lo obtiene de los datos del motor, éste es de 2 polos entonces:

$$\rho = \frac{180^\circ}{p} \quad (1.7)$$

$$\rho = \frac{180^\circ}{2}$$

$$\rho = 90^\circ$$

por lo tanto:

$$Kp = \text{sen} \frac{\rho}{2}$$

$$Kp = \text{sen} \frac{90^\circ}{2}$$

$$Kp = 0,707$$

Para éste caso “el factor de paso de un devanado es diferente para cada frecuencia armónica”[5]

El factor de devanado 1.4 es:

$$K = 0,707 * 0,96$$

$$K = 0,679$$

Donde:

$N_{cr} = 1$ Conductor por ranura

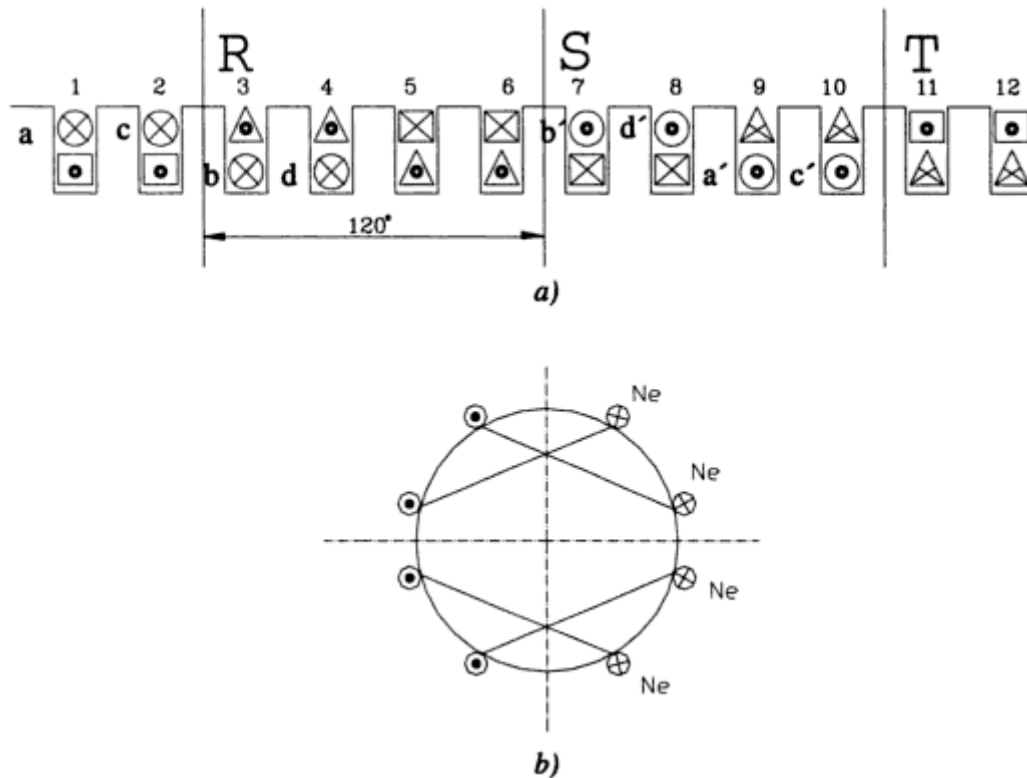


Figura 1.6: Esquema básico simplificado del devanado trifásico de paso acortado en representación lineal (a) y circunferencial (b) para un par de polos

También se puede determinar el número de conductores que se tendrá en cada fase Z_f , para ello se utiliza la ecuación del número de conductores por ranura 1.8:

$$N_{cr} = 3 * \frac{Z_f}{N_r} \tag{1.8}$$

de donde se despeja la Z_f de 1.8 y se obtiene:

$$Zf = \frac{Ncr * Nr}{3}$$

reemplazando valores resulta:

$$Zf = \frac{1 * 36}{3}$$

$$Zf = 12 \text{ conductores}$$

Para conocer con cuantos voltios se va a trabajar en cada fase 1.9 se tiene:

$$v = \frac{Zf * C * Kp * \phi_{int} * lg * B}{p} \quad (1.9)$$

donde:

p : polos

Zf : número de conductores por fase

C : constante de la frecuencia de 60Hz $C = 133$

Kp : factor de paso de un devanado

ϕ_{int} : diámetro interno del estator [m]

lg : largo geométrico del estator [m]

B : densidad de flujo magnético $B = 0.8$ [Wb/m²]

$$v = \frac{12 * 133 * 0,707 * 0,098 * 0,092 * 0,8}{2}$$

$$v = \frac{8,139}{2}$$

$$v = 4 \text{ voltios por media fase}$$

Se debe considerar que son dos grupos de bobinas por fase y cada grupo de bobinas conformadas por 3 devanados.

En el caso de la corriente nominal se procede con el mismo tipo de conexión, es decir, para una fuente de 100 A se conectara en estrella simple y 200 A se conectara en doble estrella.

1.3. CONSTRUCCIÓN DE LAS BOBINAS DE PASO ACORTADO DEL MOTOR DE INDUCCIÓN SEGÚN LA NORMA IEEE STD 519 DE 1992

1.3.1. RECOMENDACIONES PRÁCTICAS Y REQUERIMIENTOS DE LA IEEE PARA EL CONTROL DE ARMÓNICOS EN SISTEMAS ELÉCTRICOS DE POTENCIA.

Estas recomendaciones engloban varios limites en los cuales se pueden realizar el control de armónicos, y brindan tablas, gráficas, estadísticas con las cuales podemos realizar medi-

ciones mediante instrumentos de uso general en la mayoría de las pruebas o de uso específico cuando se necesita mayor detalle en las pruebas o mediciones.

A continuación se cita el alcance que pretenden estas recomendaciones:

“Alcance.. Está recomendación práctica pretende establecer los principios para el diseño de sistemas eléctricos que incluyan cargas lineales y no lineales. Son descritas las formas de onda de tensión y corriente que pueden existir en todo sistema, y se establecen los principios de distorsiones de formas de onda para el diseño de sistemas. Es descrita la interfaz entre fuentes y cargas como el punto de acoplamiento común; y la observación de los principios de diseño para minimizar la interferencia entre los equipos eléctricos. Está recomendación práctica está dirigida a limitaciones de estado continuo. Se pueden encontrar condiciones transitorias que excedan estas limitaciones. Este documento establece la calidad de potencia que será proporcionada al punto de acoplamiento común. Este documento no cubre los efectos de interferencia en radio-frecuencia; sin embargo, incluye la interferencia electromagnética con los sistemas de comunicación” [1].

En referencia a los armónicos la norma limita la distorsión armónica de tensión total a 5 %, e individual a 3 %, donde nos presenta límites para evitar calentamientos y pérdidas de vida útil en los motores cuyos límites para los armónicos de secuencia negativa son muy altos, los niveles de armónicos individuales pares y de secuencia negativa se deben limitar a menos del 3 %, sobre todo los de menor orden.

La norma nos brinda una medición llamada distorsión armónica total (THD) que es usada para definir el efecto de los armónicos al voltaje del sistema de potencia que es usada en sistemas de baja tensión, media tensión, y alta tensión, se la expresa como un porcentaje de la fundamental y usa la siguiente fórmula[1]:

$$THD = \sqrt{\frac{\text{sumad todos los cuadrados de las amplitudes de todos los voltajes armónicos}}{\text{cuadrado de la amplitud del voltaje fundamental}}} * 100 \%$$
$$THD = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{50} V^2 h}}{V_1} * 100 \%$$

Los pasos a seguir para armar las bobinas son:

1. En la construcción de las bobinas se tomará en cuenta los cálculos previos que se realizaron en el punto 1.2, de donde se realizarán 6 devanados con una longitud de 3,6 metros en cada fase .
2. Al no poder realizar el devanado con un sólo conductor, a éste se lo reemplaza con su equivalente que son 10 alambres de cobre por media fase del calibre especificado en los cálculos.
3. Se va dando forma dentro del estator plástico a los devanados que forman cada fase y en los extremos de las bobinas colocamos espaguetis que sirven como aislantes y nos permiten señalar las entradas y las salidas existentes, esto lo repetimos hasta completar las tres fases.

4. Entre las bobinas se debe colocar papel aislante para evitar que se unan las bobinas, éste proceso se lo repite hasta completar todo el bobinado.
5. Procedemos de la misma forma para completar la otra media fase y se las asegura realizando un amarre simple en cada bobina,.
6. Se etiquetan las entradas y las salidas como dictan las normas americanas.
7. Como comprobación se mide la resistencia de aislamiento de fase-fase y fase-tierra para verificar el nivel del dieléctrico, si el valor cumple con las normas de la IEEE procedemos a barnizar las bobinas.
8. Por último se introduce el rotor en el estator plástico y se vuelve a armar el motor para ponerlo en funcionamiento.



Figura 1.7: Bobinado final

Capítulo 2

PRUEBAS DE LABORATORIO

En las pruebas de laboratorio se determina parámetros nominales de la máquina de inducción, se aplica las normas de la IEEE 112[6] y la IEEE 115[7], las cuales indican la forma en que se deben realizar éste tipo de pruebas y cuáles son los parámetros de medida.

2.1. Pruebas de corriente continua.

Un voltaje directo es igual a 1.7 veces el valor de las rms del voltaje que se aplica a la bobina a probar, para ello se aplican las normas IEEE Std 4-1995[3] y IEEE Std 95-1977[8], a ésta prueba se le conoce como el método de la resistencia amperométrica y es una prueba estándar para las medidas de voltaje directo. En ésta prueba de alto-voltaje directo, a la bobina probada se conecta a una puesta a tierra, el grado de aislamiento de la bobina y el nivel de la prueba del voltaje aplicado determinan el periodo de tiempo requerido para disipar la carga[9]. La siguiente tabla 2.1 muestra los valores medidos en condiciones normales con una temperatura de 21.7° centígrados y una humedad del orden del 49%.

Descripción	Medida
Voltaje DC(4-3)	1V
Corriente DC(4-3)	95.37A
Voltaje DC(10-9)	1V
Corriente DC(10-9)	92A

Cuadro 2.1: Valores medidos de la prueba con corriente continua.

Utilizando la Ley de Ohm se calcula la resistencia total 2.1 del estator debido a que los devanados para la prueba son conectados en serie y como éstos están en doble capa se tiene:

$$R_T = \frac{V_{DC}}{I_{DC}} \quad (2.1)$$

$$R_{4-3} = \frac{1V}{95,37A}$$

$$R_{4-3} = 0,010485\Omega$$

$$R_T = \frac{V_{DC}}{I_{DC}}$$

$$R_{10-9} = \frac{1}{92}$$

$$R_{10-9} = 0,010869\Omega$$

La resistencia del estator 2.2 es:

$$R_{sdc} = \frac{R_T}{3} \quad (2.2)$$

$$R_{s4-3dc} = \frac{0,010485}{3}$$

$$R_{s4-3dc} = 0,003495\Omega$$

$$R_{sdc} = \frac{R_T}{3}$$

$$R_{s10-9dc} = \frac{0,010869}{3}$$

$$R_{s10-9dc} = 0,003623\Omega$$

La resistencia del estator en conjunto 2.3 es:

$$R'_s = R_{4-3} \parallel R_{10-9} \quad (2.3)$$

$$R'_s = \frac{R_{4-3} * R_{10-9}}{R_{4-3} + R_{10-9}}$$

$$R'_s = \frac{0,003495 * 0,003623}{0,003495 + 0,003623}$$

$$R'_s = 0,001778924\Omega$$

La resistencia del estator en corriente alterna se ve afectada por el efecto Kelvin por lo que se aumenta en un 10 %, entonces 2.4:

$$R_s = 1,1 * R'_s \quad (2.4)$$

$$R_s = 1,1 * 0,001778924$$

$$R_s = 0,00195681\Omega$$

2.2. Pruebas de rotor bloqueado.

El rotor de un motor jaula de ardilla es una bobina simétrica de la barra; por lo tanto, la impedancia del motor es prácticamente igual para cualquier posición del rotor relativa al estator. Para las máquinas que tienen un número integral de ranuras por polo, por fase en el rotor y estator, ésta distancia debe ser igual a dos tercios de un polo para las máquinas trifásicas. Para las máquinas que tienen ranuras para bobinas fraccionarias, la distancia angular puede ser tanto como un polo completo. El rotor debe ser bloqueado de modo que no pueda moverse y la diferencia de voltaje será elevará gradualmente hasta obtener una corriente de valor especificado, en éste caso se asume que el deslizamiento del rotor es $s = 1$, los valores del ensayo son presentados en la tabla 2.2.

Valores Medidos					
$V_{cc} = 0,4V$					
$I_{cc} = 180A$					
$f_{pcc} = 0,99$					
P_{c1}	112.4W	P_{c2}	107W	P_{c3}	114W
$P_{cT} = 333,4W$					
Q_{c1}	56VAR	Q_{c2}	59VAR	Q_{c3}	56VAR
$Q_{cT} = 171VAR$					
S_{c1}	125.6VA	S_{c2}	122.18VA	S_{c3}	127VA
$S_{cT} = 374,69VA$					

Cuadro 2.2: Valores medidos de la prueba con rotor bloqueado.

Para poder calcular la resistencia y las reactancias se utiliza las ecuaciones del reporte experimental de Ríos [10]de donde 2.5:

$$P_{cc} = 3 * I_{cc}^2 (R_s + R_r) \quad (2.5)$$

La Resistencia del Rotor R_r es 2.6:

$$R_r = \frac{P_{cT}}{3 * I_{cc}^2} - R_s \quad (2.6)$$

$$R_r = \frac{333,4W}{3 * 180^2} - 0,00195681\Omega$$

$$R_r = 0,00014732\Omega$$

Se obtiene la impedancia de corto circuito Z_{cc} 2.7 de:

$$Z_{cc} = \frac{V_{cc}}{I_{cc}} \quad (2.7)$$

$$Z_{cc} = \frac{0,4V}{180A} = 0,0022222\Omega$$

Ahora se calcula la reactancia de dispersión del estator $X\sigma_e$ y la reactancia de dispersión del rotor $X\sigma_r$ de 2.8:

$$Z_{cc}^2 = (R_s + R_r)^2 + (X\sigma_e + X\sigma_r)^2 \quad (2.8)$$

Al sustituir se aplica la fórmula 2.9:

$$X\sigma_e = X\sigma_r \quad (2.9)$$

Despejando $X\sigma_e$ de 2.8 y reemplazando 2.9 resulta lo siguiente:

$$2 * X\sigma_e = \sqrt{Z_{cc}^2 - (R_s + R_r)^2}$$

$$2 * X\sigma_e = \sqrt{0,0022222^2 - (0,00195681 + 0,00014732)^2}$$

$$X\sigma_e = \frac{0,000714709}{2}$$

$$X\sigma_e = X\sigma_r = 0,000357354\Omega$$

2.3. Pruebas de Vacío.

Este tipo de prueba en un motor de inducción, mide las pérdidas rotacionales del motor y nos proporciona medidas de la corriente de magnetización. Podemos deducir que la única carga en el motor son las pérdidas por fricción y por rozamiento con el aire, por lo que toda la potencia del motor se consume en pérdidas mecánicas y el deslizamiento s del motor es muy pequeño porque depende únicamente de la velocidad del eje ya que no se coloca ninguna clase de carga al rotor, por lo que la resistencia que corresponde a la potencia del motor es mucho mayor que la resistencia que corresponde a las pérdidas en el cobre del rotor y mucho mayor que la reactancia del mismo. En condiciones de vacío, la potencia de entrada medida por los watímetros debe ser igual a las pérdidas en el motor, las pérdidas en el cobre del rotor son despreciables ya que la corriente es muy pequeña.

Los valores de las mediciones obtenidas son presentadas en la tabla 2.3:

Valores Medidos					
Velocidad del eje $n = 1124rpm$					
$V_o = 0,5V$					
$I_o = 162A$					
$p = 4$			$f = 60Hz$		
$fp_o = 0,98$					
P_{o1}	80.7W	P_{o2}	79.2W	P_{o3}	78W
$P_{oT} = 237,9W$					
Q_{o1}	24VAR	Q_{o2}	25VAR	Q_{o3}	18.9VAR
$Q_{oT} = 67,9VAR$					
S_{o1}	82VA	S_{o2}	82.2VA	S_{o3}	80VA
$S_{oT} = 247,4VA$					

Cuadro 2.3: Valores medidos de la prueba de vacío.

Con los datos obtenidos en las mediciones se calcula los siguientes parámetros.

Primero se calcula el valor de la velocidad nominal ns 2.10:

$$ns = \frac{120 * f}{p} \quad (2.10)$$

$$ns = \frac{120*60}{4}$$

$$ns = 1800rpm$$

El deslizamiento se calcula con la fórmula 2.11 teniendo en cuenta el valor medido de n es de 1124 rpm.

$$s = \frac{ns - n}{ns} \quad (2.11)$$

$$s = \frac{1800-1124}{1800}$$

$$s = 0,3755$$

Ahora se calcula el ángulo 2.12 entre los vectores resultado de la descomposición de la corriente a vacío I_o

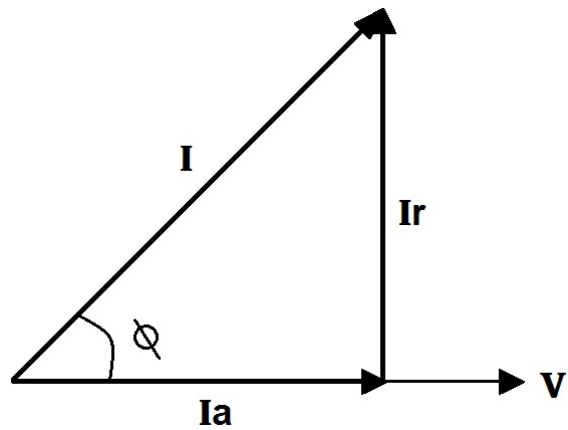


Figura 2.1: Fasores de la I_o .

El ángulo de la corriente de vacío I_o se calcula con 2.12:

$$\phi = \cos^{-1}(fp_o) \quad (2.12)$$

$$\phi = \cos^{-1}(0,98) = 0,2003rad$$

Los componentes fasoriales de la I_o se los calcula de la siguiente forma:

$$I_r = I_o * \text{sen}(\phi) \quad (2.13)$$

$$I_r = 162 * \text{sen}(0,2003)$$

$$I_r = 32,2321A$$

$$I_a = I_o * \text{cos}(\phi) \quad (2.14)$$

$$I_a = 162 * \text{cos}(0,2003)$$

$$I_a = 158,76A$$

El valor de la resistencia R_m 2.15:

$$R_m = \frac{V_O}{I_a} \quad (2.15)$$

$$R_m = \frac{0,5}{158,76} = 0,0031494\Omega$$

La reactancia X_m 2.16 de magnetización es:

$$X_m = \frac{V_O}{I_r} \quad (2.16)$$

$$X_m = \frac{0,5}{32,2321} = 0,015512\Omega$$

El valor de la reactancia del rotor 2.17 desde el punto de vista del estator X_{er} .

$$X_{er} = X_m - X_{\sigma e} \quad (2.17)$$

$$X_{er} = 0,015512\Omega - 0,000357354\Omega$$

$$X_{er} = 0,0151546\Omega$$

2.4. Circuito Equivalente.

Al basarse en los estudios del libro del Dr. Aller [11], se encuentran recomendaciones para calcular las características eléctricas del motor mediante un circuito equivalente, figura 2.2.

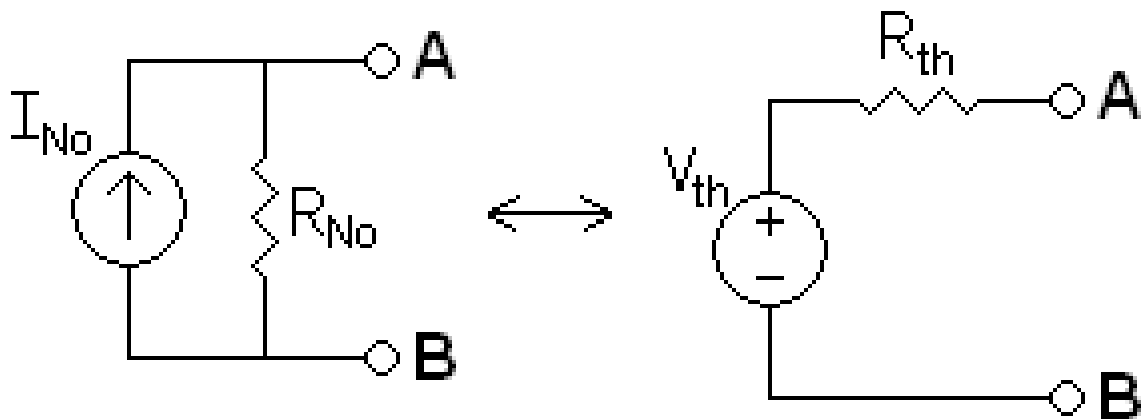


Figura 2.2: Equivalente Thevenin.

Basados en los cálculos anteriores se determinan los valores de los siguientes parámetros:
Impedancia del estator 2.18

$$Z_s = R_s + jX_{\sigma e} \quad (2.18)$$

$$Z_s = 0,00195681 + j0,000357354$$

Impedancia del rotor

$$Z_r = jX_{\sigma r}$$

$$Z_r = j0,000357354\Omega$$

Impedancia de magnetización 2.19

$$Z_m = \frac{R_m * jX_m}{R_m + jX_m} \quad (2.19)$$

$$Z_m = \frac{0,0031494 * j0,015512}{0,0031494 + j0,015512}$$

$$Z_m = 0,003024 + j0,0006141$$

Impedancia de carga 2.20

El valor del deslizamiento en el vacío para el caso de la máquina construida es 0.3755, por lo tanto:

$$Z_{Load} = \frac{R_r}{s} \quad (2.20)$$

$$Z_{Load} = \frac{0,00014732}{0,3755} = 0,00039233\Omega$$

Voltaje Thévenin 2.21

$$V_{th} = Z_m * \frac{V_o}{Z_m + Z_s} \quad (2.21)$$

$$V_{th} = 0,003024 + j0,0006141 * \frac{0,5}{(0,003024 + j0,0006141) + (0,00195681 + j0,000357354)}$$

$$V_{th} = 0,304023 + 0,002350j$$

$$\|V_{th}\| = 0,304032V$$

Impedancia Thévenin 2.22

$$Z_{th} = \left(\frac{Z_s * Z_m}{Z_s + Z_m} \right) + Z_r \quad (2.22)$$

$$Z_{th} = \left(\frac{(0,00195681 + j0,000357354) * (0,003024 + j0,0006141)}{(0,00195681 + j0,000357354) + (0,003024 + j0,0006141)} \right) + (j0,000357354)$$

$$Z_{th} = 0,001188 + 0,0005838j$$

$$R_{th} = 0,001188\Omega$$

$$X_{th} = j0,0005838\Omega$$

Corriente del rotor 2.23.

$$I_r = \frac{V_{th}}{Z_{th} + Z_{load}} \quad (2.23)$$

$$I_r = \frac{(0,304023+0,002350j)}{(0,001188+0,0005838j)+(0,00039233)}$$

$$I_r = 169,76164 - 61,225724j$$

$$\|I_r\| = 180,464965A$$

Potencia en el eje 2.24

$$P_{eje} = \frac{3 * \|V_{th}\|^2 * R_r * \left(\frac{1-s}{s}\right)}{\left(R_{th} + \frac{R_r}{s}\right)^2 + X_{th}^2} \quad (2.24)$$

$$P_{eje} = \frac{3 * 0,304032^2 * 0,00014732 * \left(\frac{1-0,3755}{0,3755}\right)}{\left(0,001188 + \frac{0,00014732}{0,3755}\right)^2 + j0,0005838^2}$$

$$P_{eje} = 31,5043W \simeq 0,042hp$$

Torque eléctrico 2.25

$$T_e = \frac{3 * R_r * \|I_r\|^2}{2 * \pi * f * s} \quad (2.25)$$

$$T_e = \frac{3 * 0,00014732 * (180,464965)^2}{2 * 3,14 * 60 * 0,3755}$$

$$T_e = 0,101729$$

Voltaje de magnetización 2.26

$$V_m = (Z_{load} + jX_{\sigma r}) * I_r \quad (2.26)$$

$$V_m = (0,00039233 + j0,000357354) * 169,76164 - 61,225724j$$

$$V_m = 0,0884818 + 0,0366443j$$

$$\|V_m\| = 0,0957696V$$

Corriente de magnetización 2.27

$$I_m = \frac{V_m}{Z_m} \quad (2.27)$$

desglosando un poco más la fórmula 2.27 tenemos:

$$I_m = \frac{(Z_{load} + jX_{\sigma r})}{Z_m} * I_r$$

$$I_m = \frac{(0,00039233 + j0,000357354)}{0,003024 + j0,0006141} * (169,76164 - 61,225724j)$$

$$I_m = 30,464362 + 5,931265jA$$

$$\|I_m\| = 31,036386A$$

Corriente del Estator 2.28

$$I_e = I_m + I_r \quad (2.28)$$

desglosando un poco más la fórmula 2.28 tenemos:

$$I_e = \frac{(Z_{load} + jX\sigma_r) + Z_m}{Z_m} * I_r$$

$$I_e = \frac{(0,00039233 + j0,000357354) + 0,003024 + j0,0006141}{0,003024 + j0,0006141} * (169,76164 - 61,225724j)$$

$$I_e = 200,2260 - 55,294458j$$

$$\|I_e\| = 207,7207A$$

Potencia Eléctrica 2.29

$$P_e = 3 * V_o * I_e * 0,95 \quad (2.29)$$

$$P_e = 3 * 0,5 * 207,7207 * 0,95$$

$$P_e = 296,0019W \simeq 0,396hp$$

2.5. Cálculo de la eficiencia del motor de inducción.

Para calcular la eficiencia 2.30 del motor se utiliza la relación de la potencia del eje dividida para la potencia eléctrica, mediante ésta relación se encontrara las pérdidas totales ocasionadas en el motor.

$$Eficiencia = \frac{PotenciaEje}{PotenciaEléctrica} \quad (2.30)$$

Con los datos calculados se encuentra el valor de la eficiencia utilizando la ecuación 2.30:

$$Eficiencia = \eta = \frac{PotenciaEje}{PotenciaEléctrica}$$

$$\eta = \frac{0,042}{0,396}$$

$$\eta = 0,106 \simeq 10,6\%$$

2.5.1. Comportamiento del motor con la carga del edificio Mario Rizzini .

Con el fin de determinar la cantidad de armónicos que se encuentran en la carga del edificio Mario Rizzini de la Universidad Politécnica Salesiana sede Cuenca, se utiliza el medidor de calidad de energía Marca: FLUKE Modelo: 1735 POWER LOGGER ANALYST para determinar cuál es el período de tiempo donde se presenta la mayor carga. Según las mediciones que se realizó en el período de una semana, se aprecia que la mayor carga se presenta entre las 17h30 a 18h00, de lunes a viernes, con estos datos se determina los parámetros de índice de calidad en el sistema2.3.

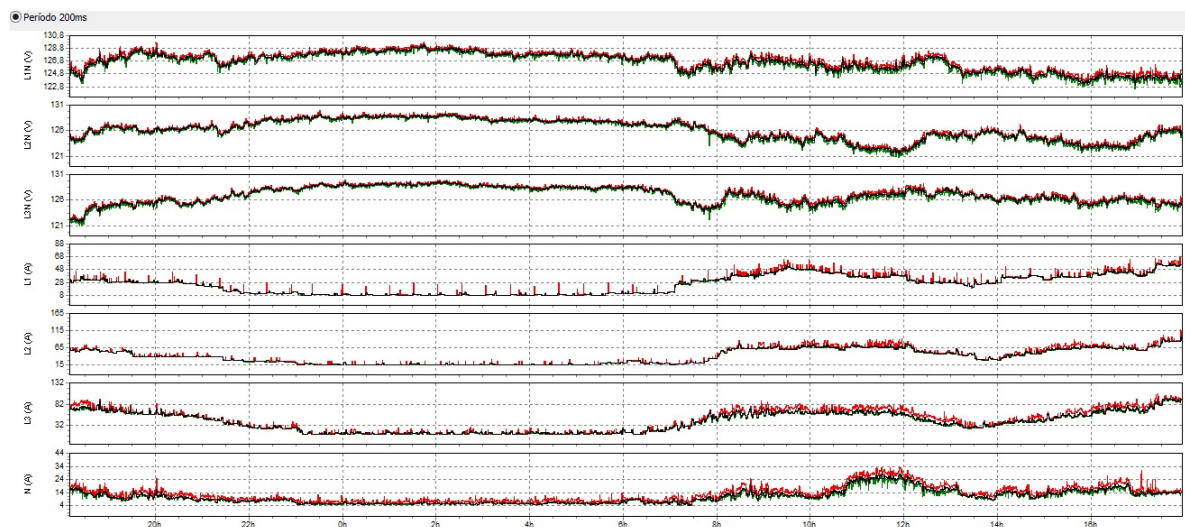


Figura 2.3: Tensión y corriente a lo largo de 24 horas.

También se verifica la corriente máxima en el periodo medido, cuyo histograma es el siguiente2.4:

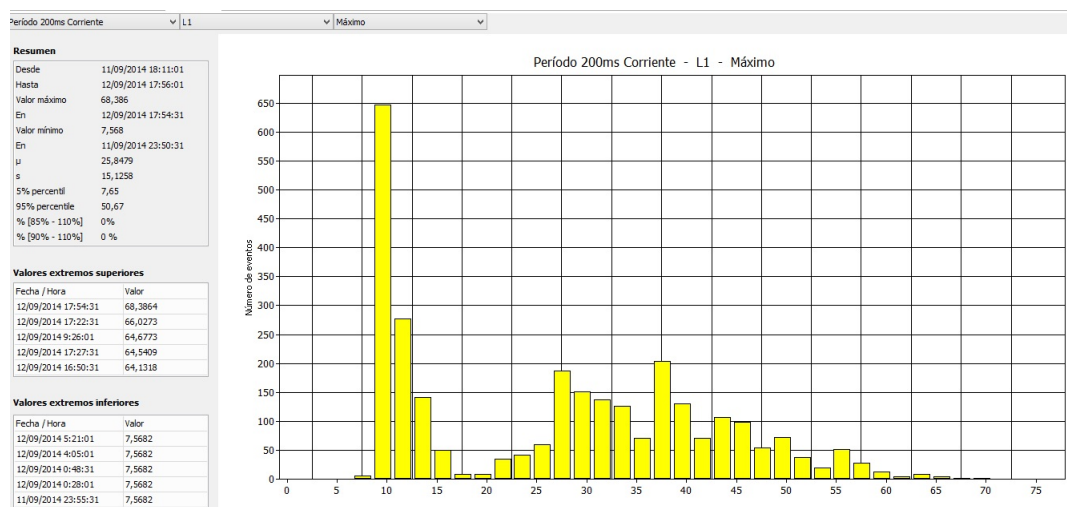


Figura 2.4: Corriente Máxima L1.

Para la línea L2 se tiene2.5:

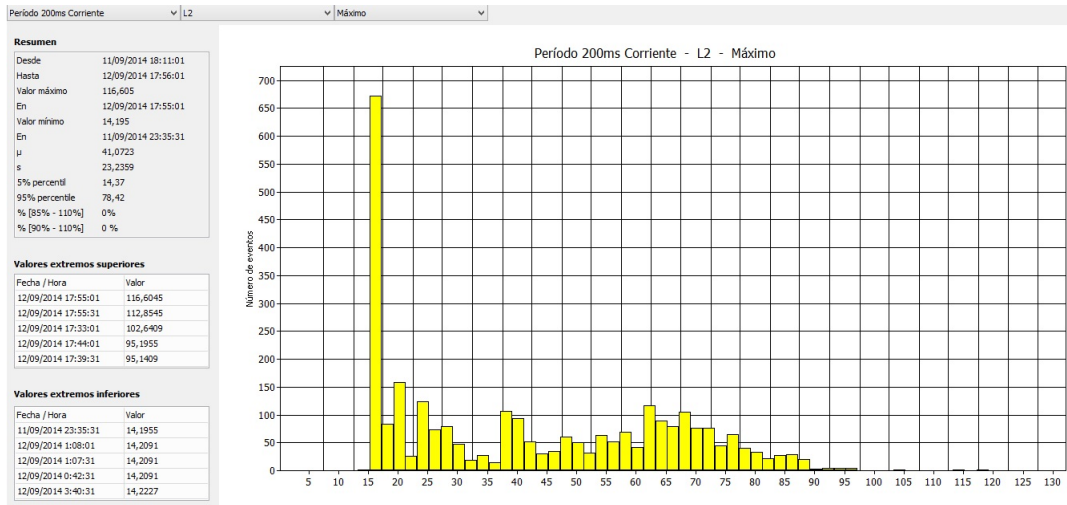


Figura 2.5: Corriente Máxima L2.

En el caso de la línea L3 se tiene2.6:

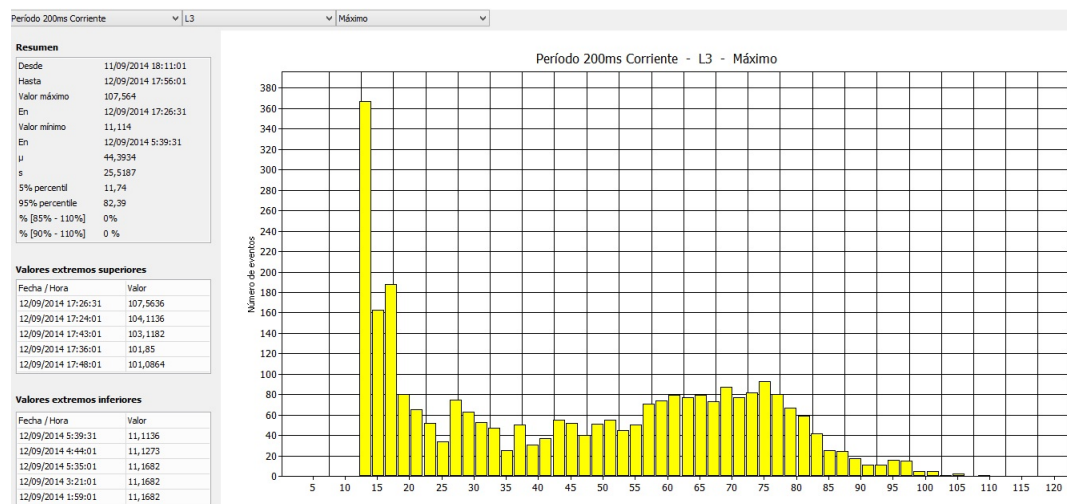


Figura 2.6: Corriente Máxima L3.

Para los niveles de tensión, las gráficas son:

En la línea L12.7:

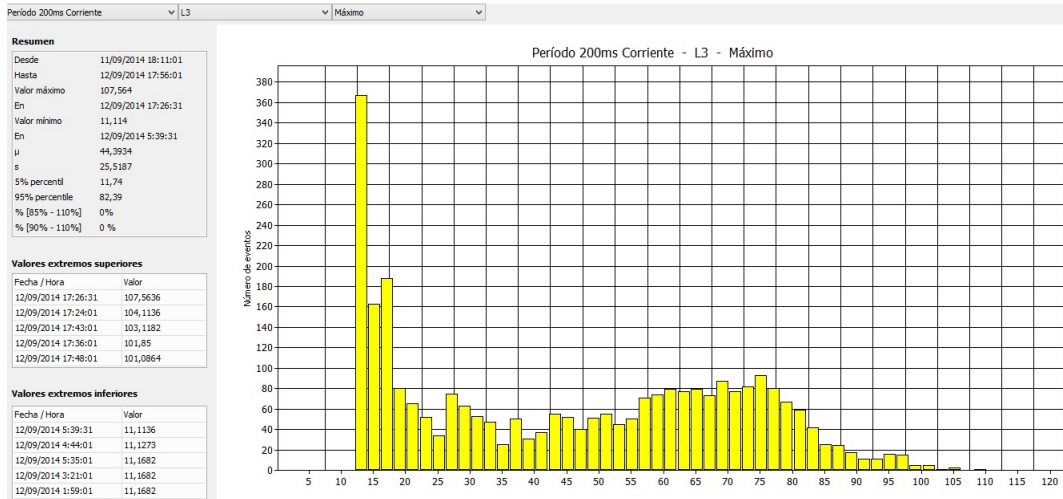


Figura 2.7: Tensión Máxima L1.

En la línea L22.8:

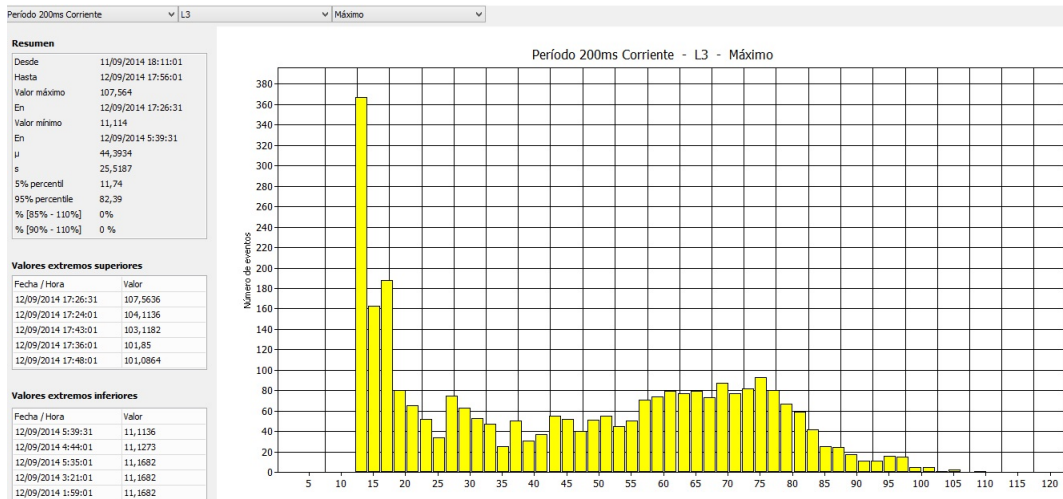


Figura 2.8: Tensión Máxima L2.

En la línea L32.9:

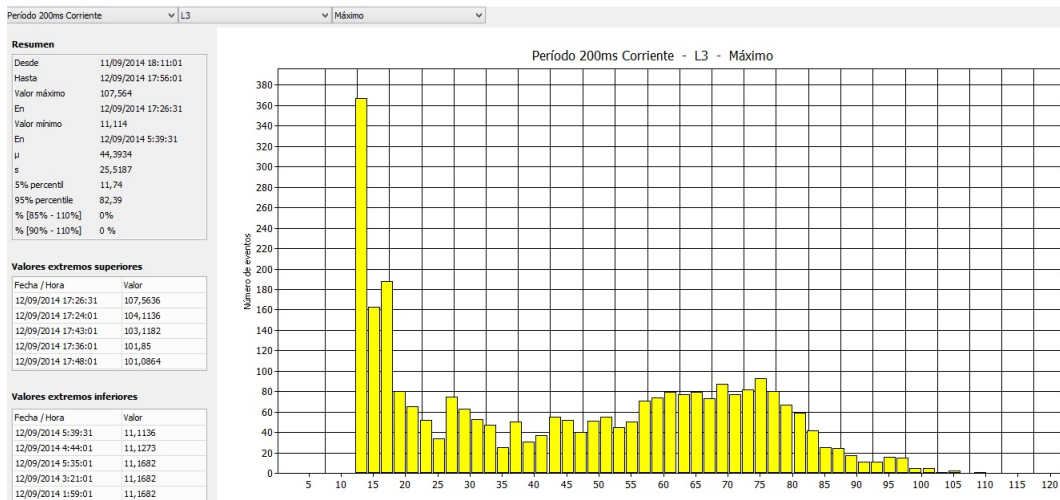


Figura 2.9: Tensión Máxima L3.

Las formas de onda que se captan en el medidor de calidad de energía son las siguientes:
 En la línea L1 se presenta de la siguiente manera 2.10:

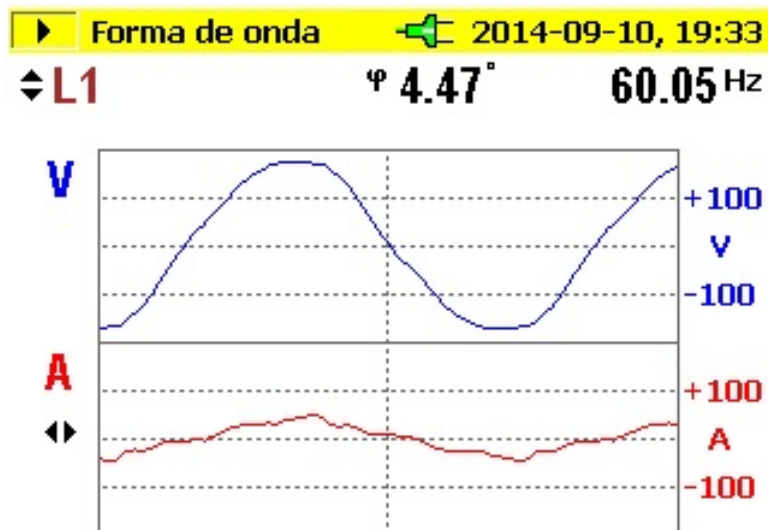


Figura 2.10: Forma de onda L1.

En el caso de la línea L2 se tiene 2.11:

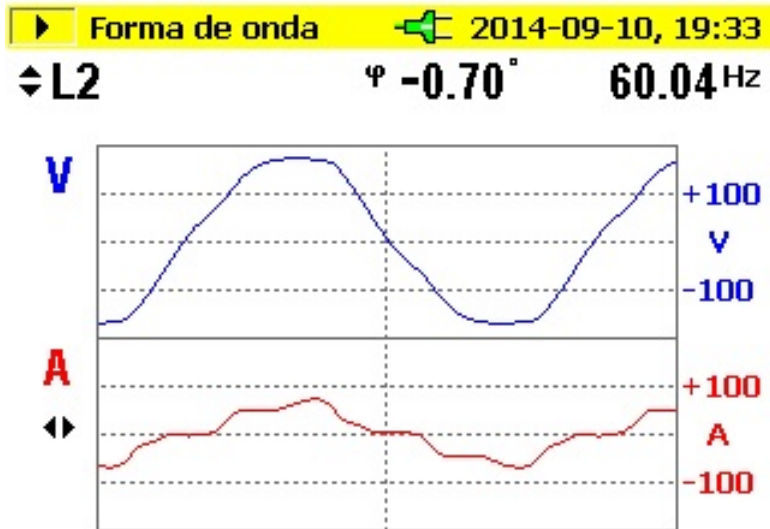


Figura 2.11: Forma de onda L2.

De igual manera en la línea L3 se tiene 2.12:

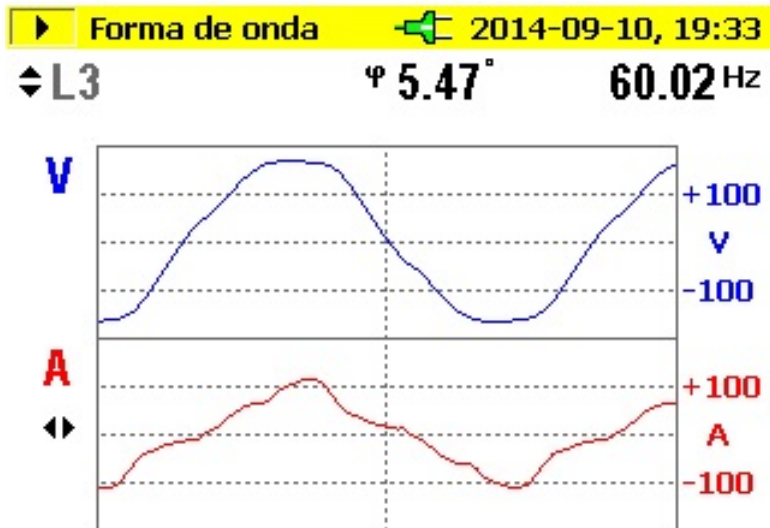


Figura 2.12: Forma de onda L3.

Capítulo 3

ANÁLISIS DE ARMÓNICOS

3.1. ANÁLISIS MEDIANTE EL MÉTODO LINEAL.

Los armónicos son corrientes, tensiones o las dos al mismo tiempo presentes en un sistema eléctrico, generalmente múltiplo de la frecuencia fundamental. Actualmente con el incremento de cargas no lineales generadas por la electrónica de potencia han ido en aumento los inconvenientes en las instalaciones eléctricas por la presencia de armónicos ya sean éstos de corriente ó tensión en el sistema eléctrico. Los problemas que provocan son: el sobrecalentamiento de cables, transformadores y motores, altas corrientes en el neutro y fenómenos de resonancia entre los elementos del circuito, los armónicos provocan un funcionamiento incorrecto de varios equipos que fueron diseñados y construidos para operar en condiciones normales es decir con poca distorsión armónica, los motores de inducción son sensibles a los armónicos y se ven sometidos a todas las variaciones de la fuente de potencia, lo que afecta su funcionamiento y las características propias de trabajo.

Los problemas que causan los armónicos se los puede evaluar usando la superposición.

Se compara las gráficas obtenidas en las mediciones y se determina si se obtuvo mejoras o perjuicios al cambiar el tipo de devanado a paso acortado. Para éste propósito se utiliza el osciloscopio digital Marca: GwINSTEK Modelo: GDS-1102A-U, y los datos se los obtiene utilizando el software libre FREEWAVE V3.23, las sondas que se utilizan para medir la corriente están atenuadas a 10mV/A y multiplicadas por un factor de 100X para obtener la medición en Amperios. Esta medición se realiza colocando las sondas de corriente atenuadas simultaneamente en los terminales de la bobina al ingreso y a la salida de la misma para comparar el comportamiento de las corrientes al mismo tiempo aguas arriba y aguas abajo del motor.

Los resultados son los siguientes:

En el caso de la medición aguas arriba y aguas abajo de la línea L1 se tiene 3.1:

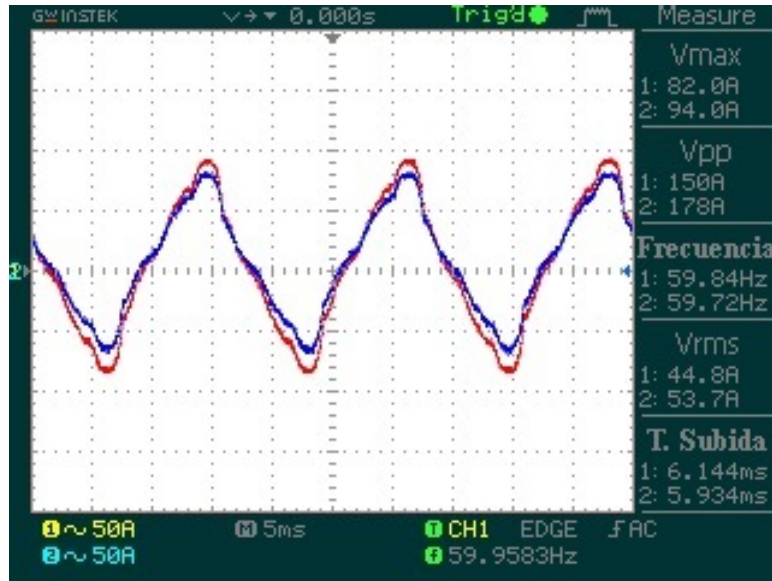


Figura 3.1: Corrientes aguas arriba-aguas abajo L1.

Como se presenta en la gráfica 3.1 en los canales 1 y 2 se mide la corriente, en el primero aguas arriba y el segundo aguas abajo del motor, donde se observa que las gráficas son similares en su totalidad entre aguas arriba y aguas abajo.

La figura 3.2 muestra el valor de los armónicos para la corriente obtenida de las mediciones en el osciloscopio y calculadas en el matlab para la L1:

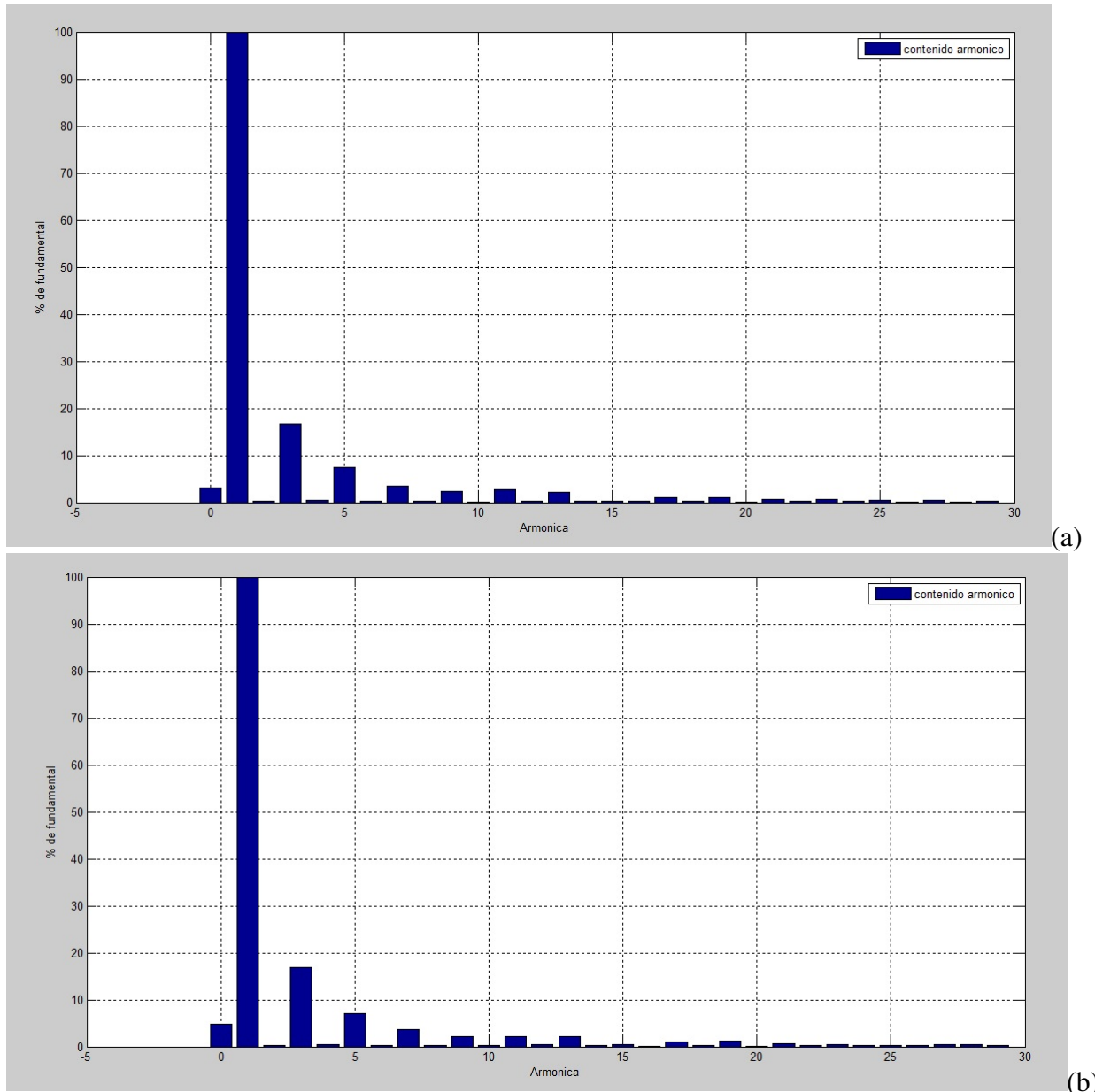


Figura 3.2: (a)Armónicas aguas arriba-(b)Armónicas aguas abajo

El valor del THD que se obtiene del matlab para la medición aguas arriba es:

$$THD = 19,3140$$

El valor del THD que se obtiene del matlab para la medición aguas abajo es:

$$THD = 19,2572$$

Como se puede observar en la gráfica3.2 no se logra tener una mejora en la reducción de los armónicos, los valores calculados del THD estan referidos al tercer armónico y si comparamos los valores del THD aguas arriba y del THD aguas abajo no representan una

reducción de los armónicos considerable ya que los valores son casi parecidos refiriéndonos al tercer armónico.

Las gráficas obtenidas para la línea L2 son3.3:

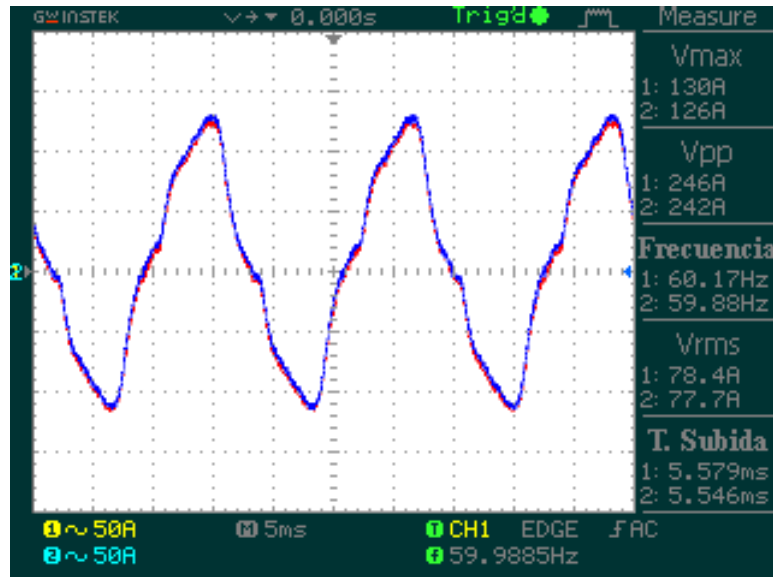


Figura 3.3: Corrientes aguas arriba-aguas abajo L2.

De igual manera en la gráfica3.3 en los canales 1 y 2 se mide la corriente, en el primero aguas arriba y el segundo aguas abajo del motor, donde se observa que las gráficas son similares en su totalidad entre aguas arriba y aguas abajo.

La figura 3.4 muestra el valor de los armónicos para la corriente obtenida de las mediciones en el osciloscopio y calculadas en el matlab para la L2:

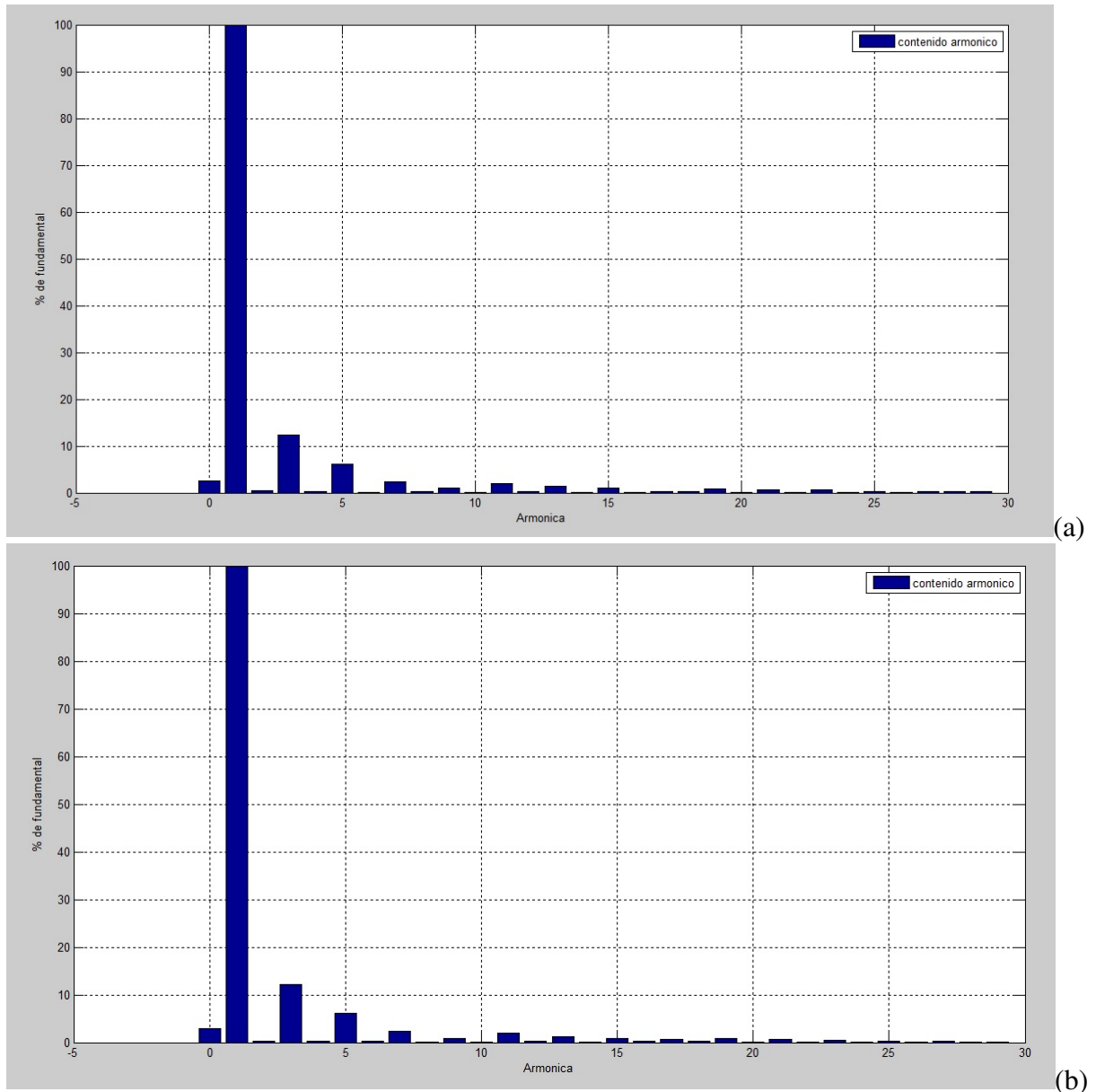


Figura 3.4: (a)Armónicas aguas arriba-(b)Armónicas aguas abajo

El valor del THD que se obtiene del matlab para la medición aguas arriba es:

$$THD = 14,4083$$

El valor del THD que se obtiene del matlab para la medición aguas abajo es:

$$THD = 14,1656$$

Como se puede observar en la gráfica3.4 no se logra tener una mejora en la reducción de los armónicos, los valores calculados del THD estan referidos al tercer armónico y si comparamos los valores del THD aguas arriba y del THD aguas abajo no representan una

reducción de los armónicos considerable ya que los valores son casi parecidos refiriéndonos al tercer armónico.

En la línea L3 se tiene3.5:

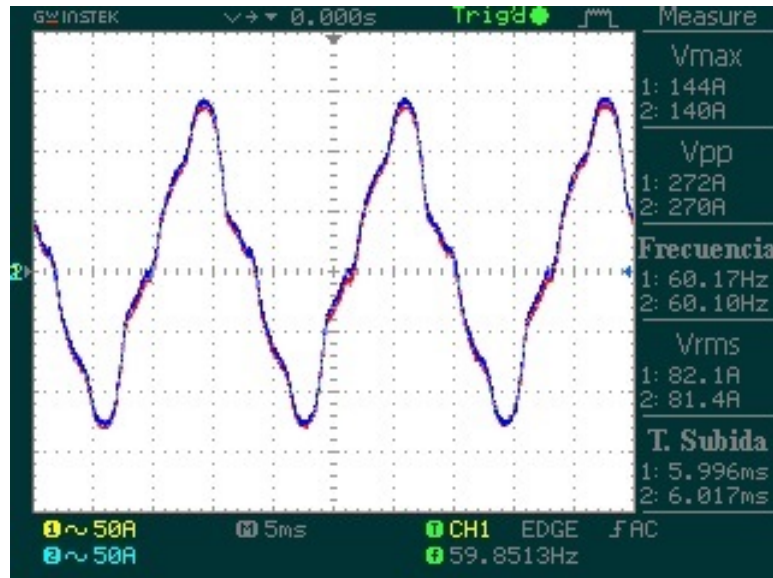


Figura 3.5: Corrientes aguas arriba-aguas abajo L3.

Finalmente en la gráfica3.5 en los canales 1 y 2 se mide la corriente, en el primero aguas arriba y el segundo aguas abajo del motor, donde se observa que las gráficas son casi parecidas en su totalidad entre aguas arriba y aguas abajo.

La figura 3.6 muestra el valor de los armónicos para la corriente obtenida de las mediciones en el osciloscopio y calculadas en el matlab para la L3:

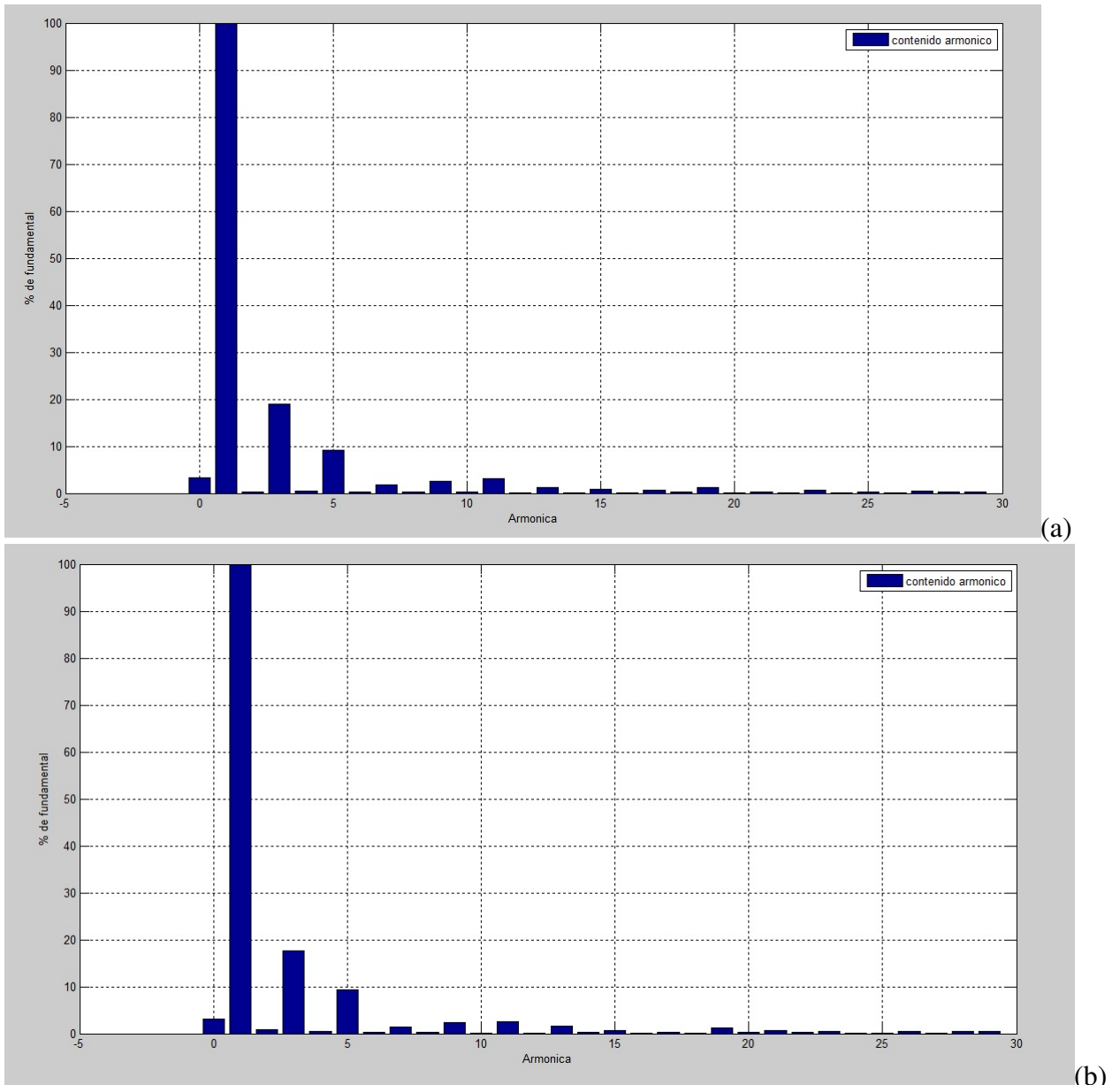


Figura 3.6: (a)Armónicas aguas arriba-(b)Armónicas aguas abajo

El valor del THD que se obtiene del matlab para la medición aguas arriba es:

$$THD = 21,5665$$

El valor del THD que se obtiene del matlab para la medición aguas abajo es:

$$THD = 20,5084$$

Como se puede observar en la gráfica 3.6 no se logra tener una mejora en la reducción de los armónicos, los valores calculados del THD están referidos al tercer armónico y si comparamos los valores del THD aguas arriba y del THD aguas abajo no representan una

reducción de los armónicos considerable ya que los valores son casi parecidos refiriéndonos al tercer armónico.

Para verificar como es el comportamiento de las tensiones se debe tomar mediciones entre líneas, para éste propósito se utiliza el osciloscopio digital Marca: GwINSTEK Modelo: GDS-1102A-U, y los datos se los obtiene utilizando el software libre FREEWAVE V3.23, las sondas que se utilizan para medir la tensión están atenuadas a 2mV y multiplicadas por un factor de 500X para obtener la medición en Voltios. como se está trabajando con sistema trifásico se toma las mediciones con la combinación de todas las líneas.

En el caso de las tensiones se tiene los siguientes resultados:

Entre la línea L1-L2:

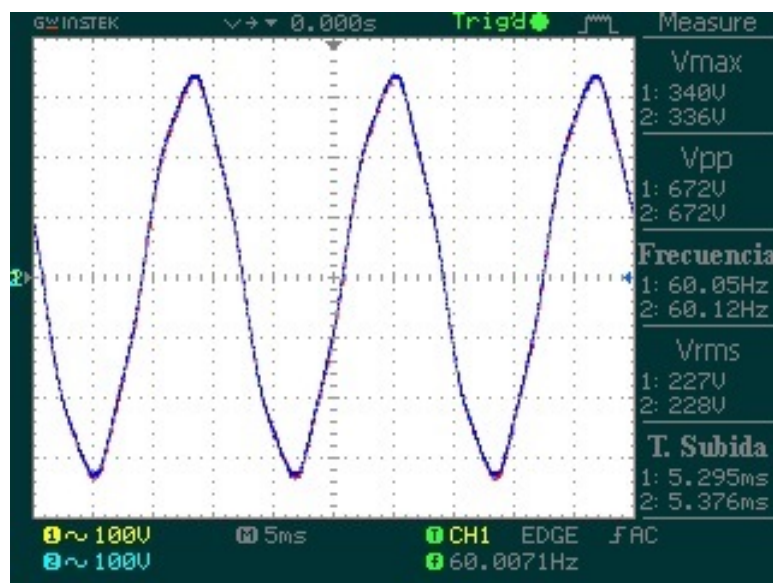


Figura 3.7: Tensiones aguas arriba-aguas abajo L1.

Como se puede ver en la figura3.7 no existe ninguna diferencia entre voltajes entre la medición de aguas arriba y aguas abajo ya que los valores que registra el osciloscopio son idénticas entre los dos canales de medición.

La figura 3.8 muestra el valor de los armónicos para la tensión obtenida de las mediciones en el osciloscopio y calculadas en el matlab para la L1-L2:

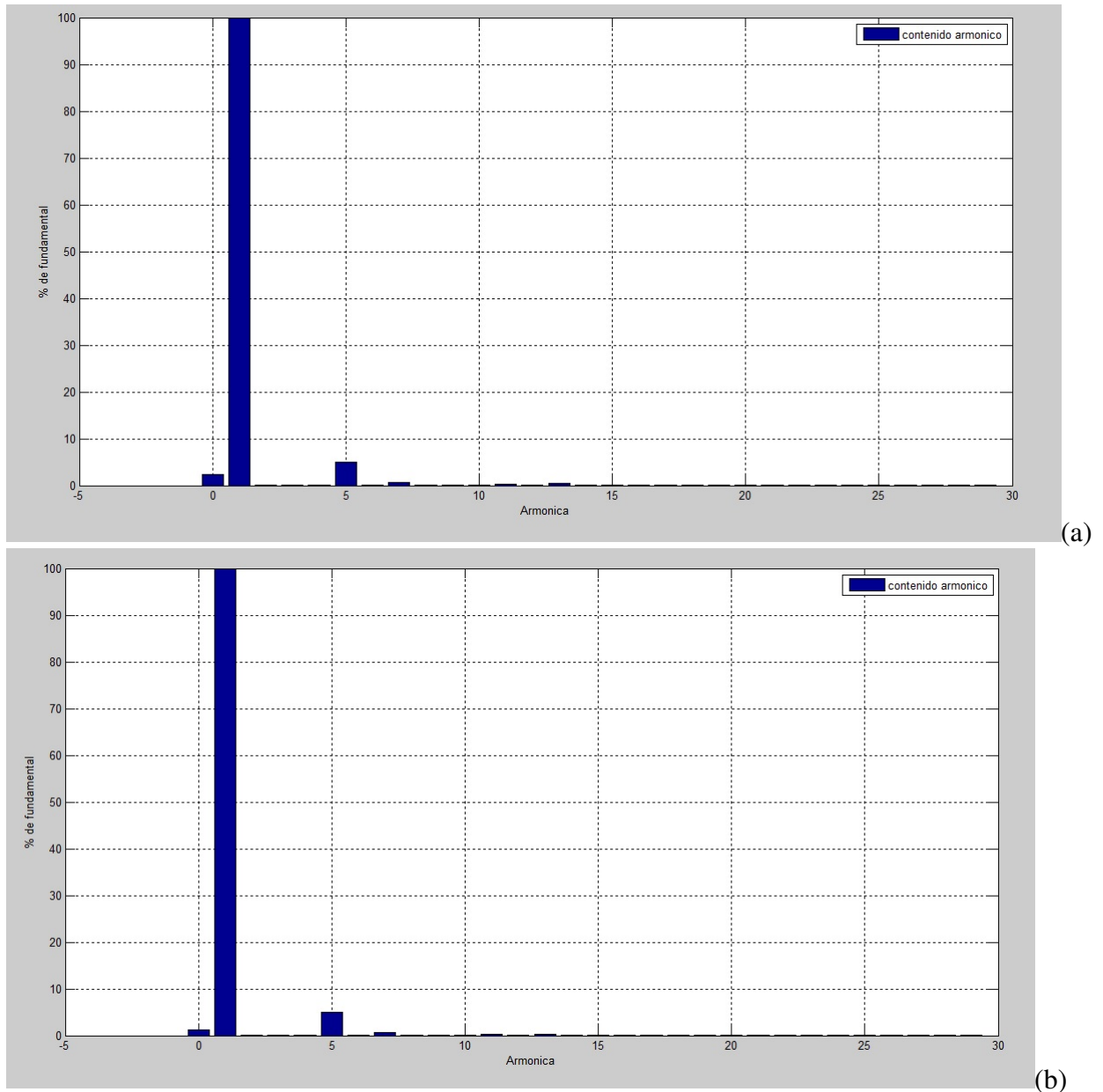


Figura 3.8: (a)Armónicas aguas arriba-(b)Armónicas aguas abajo

El valor del THD que se obtiene del matlab para la medición aguas arriba es:

$$THD = 5,0935$$

El valor del THD que se obtiene del matlab para la medición aguas abajo es:

$$THD = 4,9918$$

Como se puede observar en la gráfica3.8 no se logra tener una mejora en la reducción de los armónicos, los valores calculados del THD estan referidos al tercer armónico y si comparamos los valores del THD aguas arriba y del THD aguas abajo no representan una

reducción de los armónicos considerable ya que los valores son similares refiriéndonos al quinto armónico.

Entre la línea L1-L3:

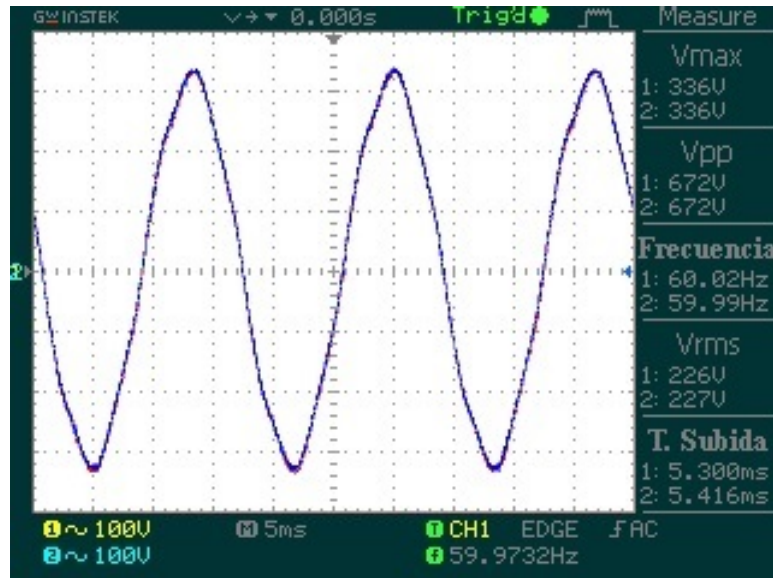


Figura 3.9: Tensiones aguas arriba-aguas abajo L2.

Como se puede ver en la figura 3.9 no existe ninguna diferencia entre voltajes entre la medición de aguas arriba y aguas abajo ya que los valores que registra el osciloscopio son muy parecidos entre los dos canales de medición.

La figura 3.10 muestra el valor de los armónicos para la tensión obtenida de las mediciones en el osciloscopio y calculadas en el matlab para la L1-L3:

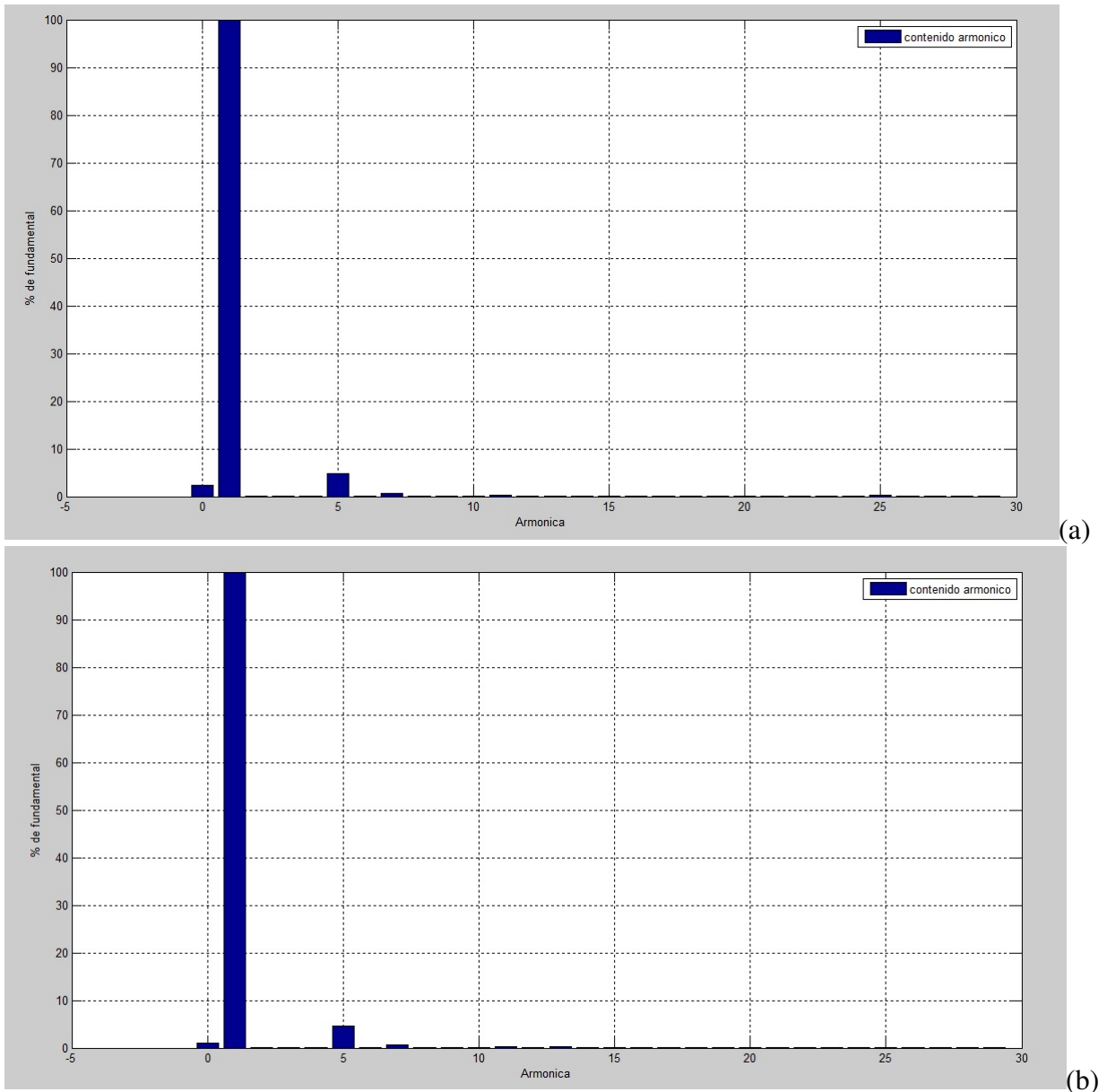


Figura 3.10: (a)Armónicas aguas arriba-(b)Armónicas aguas abajo

El valor del THD que se obtiene del matlab para la medición aguas arriba es:

$$THD = 4,9030$$

El valor del THD que se obtiene del matlab para la medición aguas abajo es:

$$THD = 4,7408$$

Como se puede observar en la gráfica3.10 no se logra tener una mejora en la reducción de los armónicos, los valores calculados del THD estan referidos al tercer armónico y si comparamos los valores del THD aguas arriba y del THD aguas abajo no representan una

reducción de los armónicos considerable ya que los valores son similares refiriéndonos al quinto armónico.

Entre la línea L2-L3:

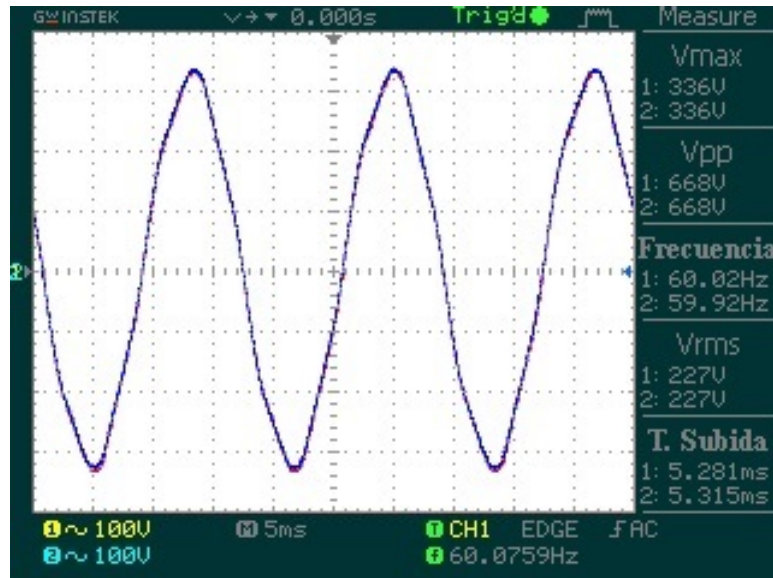


Figura 3.11: Tensiones aguas arriba-aguas abajo L3.

Como se puede ver en la figura 3.11 no existe ninguna diferencia entre voltajes entre la medición de aguas arriba y aguas abajo ya que los valores que registra el osciloscopio son idénticas entre los dos canales de medición.

La figura 3.12 muestra el valor de los armónicos para la tensión obtenida de las mediciones en el osciloscopio y calculadas en el matlab para la L2-L3:

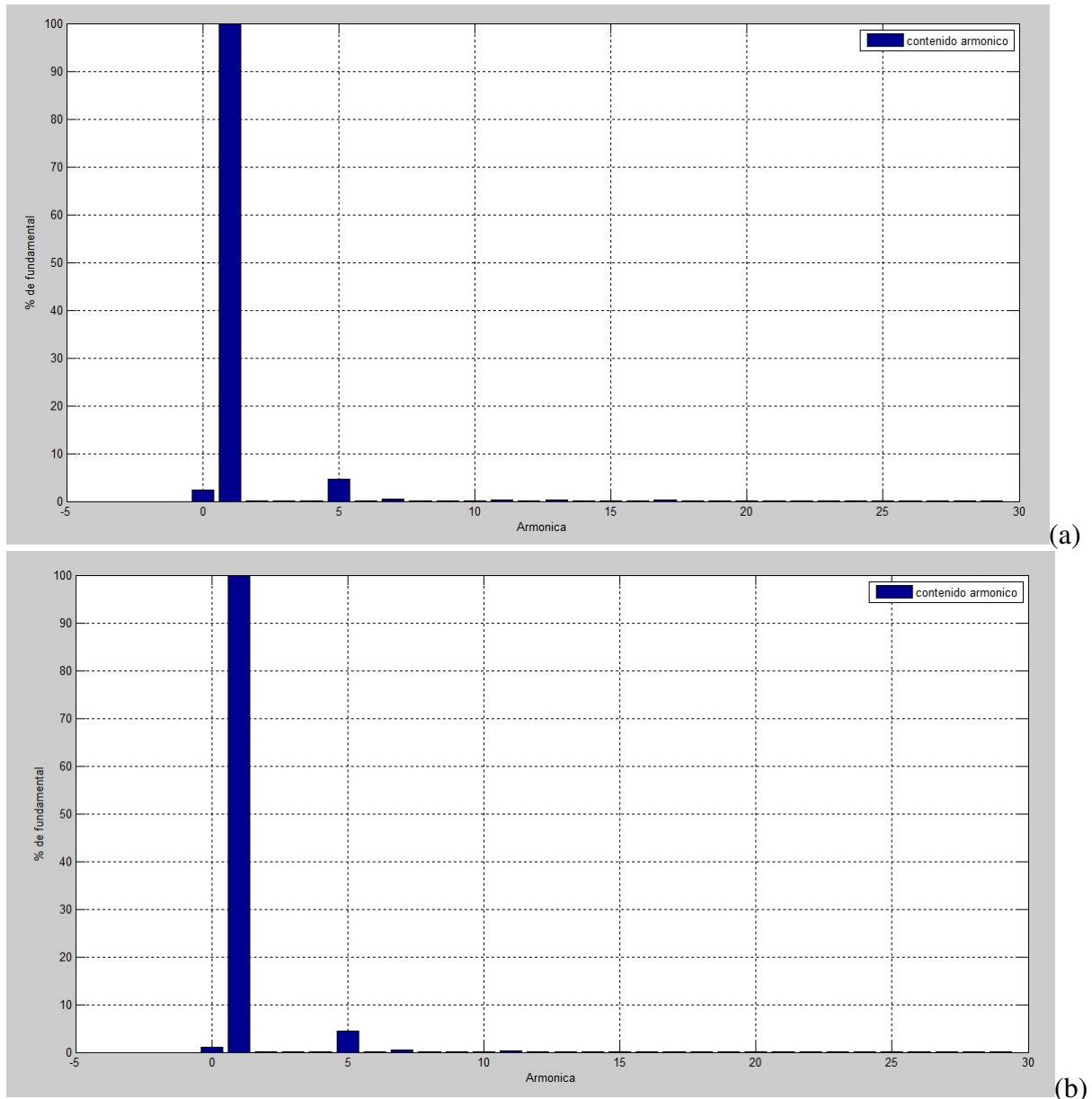


Figura 3.12: (a)Armónicas aguas arriba-(b)Armónicas aguas abajo

El valor del THD que se obtiene del matlab para la medición aguas arriba es:

$$THD = 4,6593$$

El valor del THD que se obtiene del matlab para la medición aguas abajo es:

$$THD = 4,5478$$

Como se puede observar en la gráfica3.12 no se logra tener una mejora en la reducción de los armónicos, los valores calculados del THD estan referidos al tercer armónico y si comparamos los valores del THD aguas arriba y del THD aguas abajo no representan una reducción de los armónicos considerable ya que los valores son similares refiriéndonos al quinto armónico.

3.1.1. LÍMITES DE LA DISTORSIÓN ARMÓNICA

Para realizar un análisis de la distorsión armónica la norma IEEE Std 519 de 1992[1] limita la distorsión armónica de tensión total a 5 %, e individual a 3 %, en ésta se presenta unos límites para evitar calentamientos y pérdidas de vida útil en los motores, los límites para los armónicos de secuencia negativa son muy altos; los niveles de armónicos individuales pares y de secuencia negativa se deben limitar a menos del 3 %, sobre todo los de menor orden, en la siguiente tabla se detalla entre que rangos deben limitarse los armónicos:

h	$\left[\frac{V_h(\%) }{V_{60Hz}} \right]_{1\Phi} (\%)$	$\left[\frac{(\%)_h }{V_{60Hz}} \right]_{3\Phi} (\%)$
1	100,00	100,00
2	0,50	0,50
3	4,00	2,00
4	0,30	0,50
5	3,00	5,00
6	0,20	0,20
7	2,00	3,50
8	0,20	0,20
9	1,00	0,30
10	0,10	0,10
11	1,50	1,50
12	0,10	0,10
13	1,50	1,00
14	0,10	0,05
15	0,50	0,10
16	0,05	0,05
17	1,00	0,50
18	0,05	0,01
19	1,00	0,50
Armónicos de alto orden < 0,5%		

Figura 3.13: Límites de armónicos.[1]

3.2. Análisis mediante un software como el Matlab.

Para tener una mejor idea del comportamiento del motor de inducción se utilizan diferentes softwares que ayudan a simular cuál sería el comportamiento del filtro bajo los parámetros con los cuales se realizó los cálculos, en éste caso el software que se utiliza es el Matlab, para las líneas de programación de las fórmulas y los programas la referencia es el libro del Dr. Aller [11] y la tesis de los Ingenieros John Valle y Gonzalo Contreras [2] los cuales permiten simular el comportamiento de los armónicos del motor de inducción.

Algoritmo 3.1 Programación en Matlab para análisis de armónicos.[2]

```
clc
clear all
close all
A=load('A0006CH1pru.csv');% carga el archivo de datos
% tiempo de muestreo tomado del dato del osciloscopio
Ts=0.005;
f=60;% Frecuencia del escalonamiento fundamental
np=round(1/(f*Ts));% Número de puntos para forma un ciclo
t=(0:np-1)*Ts;
q = length(A)-np+1:length(A);
% length(A) Obtiene la cantidad de datos de la matriz
%%Selección de un periodo de las señales
vab = A(q,1);
%%Cálculo del espectro armónico de las señales
%%Tensiones
ab = abs(fft(vab))*2/(np);
ab(1)=ab(1)/(2);
%%Graficas
%%Tensiones
figure(1)
n=0:27;% Numero de armónicos
bar(n,[ab(n+1)/ab(2)]*100)
legend('contenido armonico ');
grid
xlabel('Armonica ')
ylabel('% de fundamental ')
% Calculo del valor RMS y THD.
% considerando los primeros 50 armónicos.
% Se tiene que considerar que FFT,
% da los valores pico de cada componente
% Aplicando el concepto del valor rms de la serie de Fourier
valor=0;
for n=1:50
    valor=valor+(ab(n)/sqrt(2))^2;
end
rms=sqrt(valor)
THD=(sqrt(rms^2-(ab(2)/sqrt(2))^2)/(ab(2)/sqrt(2)))*100
```

También se realiza la simulación del modelo que se utilizó para obtener los valores de los parámetros del filtro.

Algoritmo 3.2 Programación del cálculo de parámetros del motor de inducción. [2]

```

% Datos
n=1439; f=60; p=4; w=2*pi*f; ns=120*f/p; s=(ns-n)/ns;
% Calculo de Re
Vdc=1; Idc=75; RT=Vdc/Idc; Re=RT/3
% Calculo a rotor bloqueado (s=1)
Pcc=900; Qcc=503; Scc=924; Icc=160; cc=3.2; fpcc=Pcc/Scc;
% Pcc=3*Icc^2 (Re+Rr)
Rr=(Pcc/(3*Icc^2))-Re; Zcc=Vcc/Icc;
% Zcc^2 = (Re+Rr)^2 +(Xde+Xdr)^2;
% XT=Xde+Xdr;
XT=sqrt(Zcc^2 -(Re+Rr)^2); Xde=XT/2; Xdr=Xde;
% Calculo a vacio (s=0)
Vo=5.5; Io=70; Po=275.8; Qo=1296.2; So=1269.6;
fpo=Po/So; a=acos(fpo); Ppce=3*Re*Io^2;
Rro=(Po/(3*Io^2))-Re; Zo=Vo/Io;
XTo=sqrt(Zo^2 -(Re+Rro)^2);
Xdeo=XTo/2; Xdro=Xdeo;
% Po=Ppce+Pmag+Proce
Proce=0.01*Po; Pmag=Po-Ppce-Proce; Iom=Io*sin(a); Ior=Io*cos(a);
Xm=Vo/Iom; Rm=Vo/Ior; Lme=Xm/w; Lde=Xde/w; Ldr=Lde; Ler=Lme-Lde;
Ze=Re+i*Xde; Zr=Rr+i*Xdr; Zm=Rm*i*Xm/(Rm+i*Xm);
% Voltaje Equivalente e Impedancia equivalente
Ve=5.5; Zr=i*Xdr; Zc=Rr/s; Vth=Zm*Ve/(Zm+Ze); Vthm=abs(Vth);
Zth=(Ze*Zm/(Ze+Zm))+Zr; Rth=real(Zth); Xth=imag(Zth);
Zth_c=Zth+Zc; Ir=Vth/Zth_c; Irabs=abs(Ir);
Peje=(3*(Vthm^2)*Rr*((1-s)/s))/(((Rth+(Rr/s))^2 + (Xth^2)))
Te=(3*Rr*(Ir^2))/(w*s); Te=abs(Te)
Vm=(Zc+i*Xdr)*Ir; Im=Vm/Zm; Ie=Im+Ir; Ieabs=abs(Ie);
Pe=3*Ve*Ieabs*0.95; Pehp=Pe/746; n=Peje/Pe;
% Valores en Por Unidad
vb=5.5; ib=70; sb=1151.2; zb=vb/(sqrt(3)*ib); Lb=zb/w;
Re_pu=Re/zb; % Resistencia del Estator en Por Unidad
% Calculo a rotor bloqueado (s=1)
Scc_pu=Scc/sb; Pcc_pu=Pcc/sb; Qcc_pu=Qcc/sb; Icc_pu=Icc/ib;
Vcc_pu=Vcc/vb; Rr_pu=abs((Pcc_pu/(3*Icc_pu^2))-Re_pu)
Zcc_pu=Zcc/zb; XT_pu=sqrt(Zcc_pu^2 -(Re_pu+Rr_pu)^2);
% Calculo a vacio
Xde_pu=XT_pu/2; Xdr_pu=Xde_pu;
Vo_pu=Vo/vb; Io_pu=Io/ib; Po_pu=Po/sb; Qo_pu=Qo/sb;
So_pu=So/sb; Ppce_pu=Ppce/sb; Proce_pu=0.01*Po_pu;
Pmag=Po_pu-Ppce_pu-Proce_pu; Iom_pu=Io_pu*sin(a);
Ior_pu=Io_pu*cos(a); Xm_pu=Vo_pu/Iom_pu; Rm_pu=Vo_pu/Ior_pu;
Ler_pu=Ler/Lb; Lde_pu=Lde/Lb; Ldr_pu=Lde_pu;

```

Los resultados obtenidos son en por unidad los cuales ayudan en el cálculo ya que se trabaja con cantidades pequeñas y los valores son 3.1:

Resultados obtenidos en por unidad [pu]
Resistencia del Estator
$R_{s_{pu}} = 1,0145132$
Resistencia del Rotor
$R_{r_{pu}} = 0,57380$
Inductancia mutua entre el estator rotor
$L_{er_{pu}} = 8,0615$
Inductancia de dispersión del estator
$L_{\sigma e_{pu}} = 0,23961$
Inductancia de dispersión del rotor
$L_{\sigma r_{pu}} = 0,23961$

Cuadro 3.1: Parámetros del motor de inducción .

Con los resultados obtenidos en la tabla 3.1 se realiza la simulación de las características que va a tener el motor de inducción.

Algoritmo 3.3 Programación de simulación del motor de inducción.[2]

```

% MAQUINAS DE INDUCCION:
global R Lde Ldr Ler K I S J Ve
% Datos
Re=0.0980; Rr=0.0481; Lde=0.1786; Ldr=0.1786; Ler=1.5958;
H=1; p=4; f=60; wb=2*pi*f/p; tb=1/wb; J=2*H*wb;
Ve=1; K=1; I=eye(3); R=[Re*I, zeros(3); zeros(3), Rr*I];
S=[1 -0.5 -0.5; -0.5 1 -0.5; -0.5 -0.5 1];
y0=[0 0 0 0 0 0 0]; ta=[0 3/tb];
[T,X]=ode23(@dmaqind,ta,y0);
iae=X(:,1); ibe=X(:,2); ice=X(:,3); iar=X(:,4);
ibr=X(:,5); icr=X(:,6); th=X(:,8); w=X(:,7);
% Calculo del par electrico
n=numel(T); Te=zeros(n,1);
for k=1:n,
iT=[iae(k); ibe(k); ice(k); iar(k); ibr(k); icr(k)];

dc=-[sin(th(k)), sin(th(k)+2*pi/3), sin(th(k)+4*pi/3);...
sin(th(k)+4*pi/3), sin(th(k)), sin(th(k)+2*pi/3);...
sin(th(k)+2*pi/3), sin(th(k)+4*pi/3), sin(th(k))];

Te(k)=0.5*Ler*iT'*[zeros(3),dc;dc',zeros(3)]*iT;
vae(k)=1.4142*Ve*cos(T(k));
vbe(k)=1.4142*Ve*cos(T(k)-2.09439);
vce(k)=1.4142*Ve*cos(T(k)-4.18879);
VESP(k)=sqrt(2/3)*(vae(k)+vbe(k)*exp(j*2*pi/3)+vce(k)*exp(j*4*pi/3));
IESP(k)=sqrt(2/3)*(iae(k)+ibe(k)*exp(j*2*pi/3)+ice(k)*exp(j*4*pi/3));
Z(k)=abs(VESP(k)/IESP(k));
end
figure(1)
plot(T,Te) title('Par vs Tiempo')
grid
figure(2)
plot(T,w) title('Velocidad vs Tiempo(k=1)')
grid
figure(3)
plot(T(10:n),Z(10:n)) title('IMPEDANCIA DE ENTRADA')
grid
figure(4)
plot(T(10:n),IESP(10:n)) title('CORRIENTE DE ENTRADA')
grid

```

Las gráficas obtenidas son:

3.2.1. Torque vs Tiempo

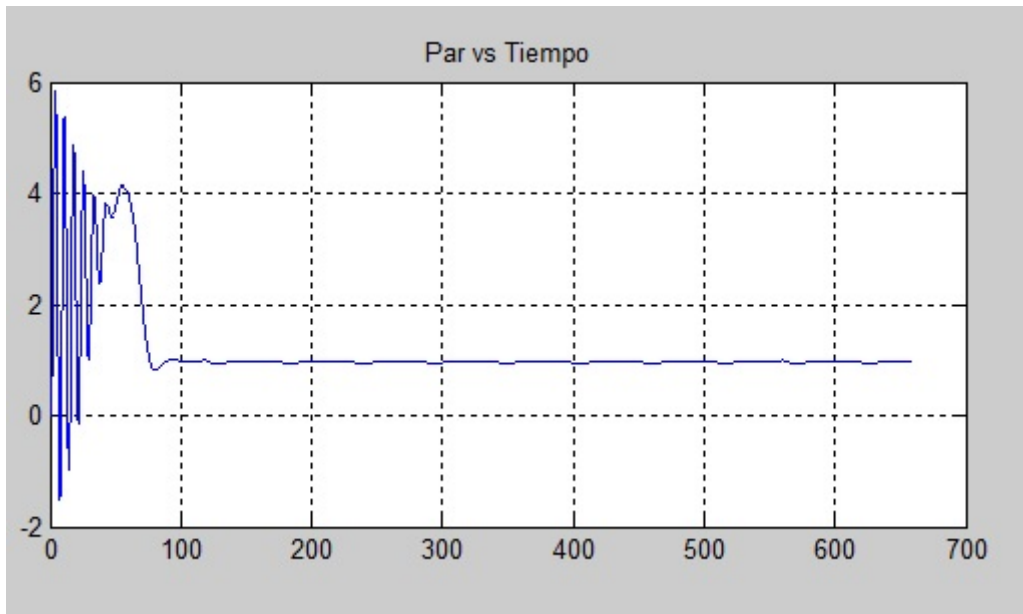


Figura 3.14: Torque vs Tiempo.

Como se ve en la gráfica 3.14 el par de arranque comienza con valores altos ya que no tiene ninguna carga porque está a vacío, luego estabilizándose la velocidad y se comienza a equilibrar el par mientras permanezca girando el rotor.

3.2.2. Velocidad vs Tiempo

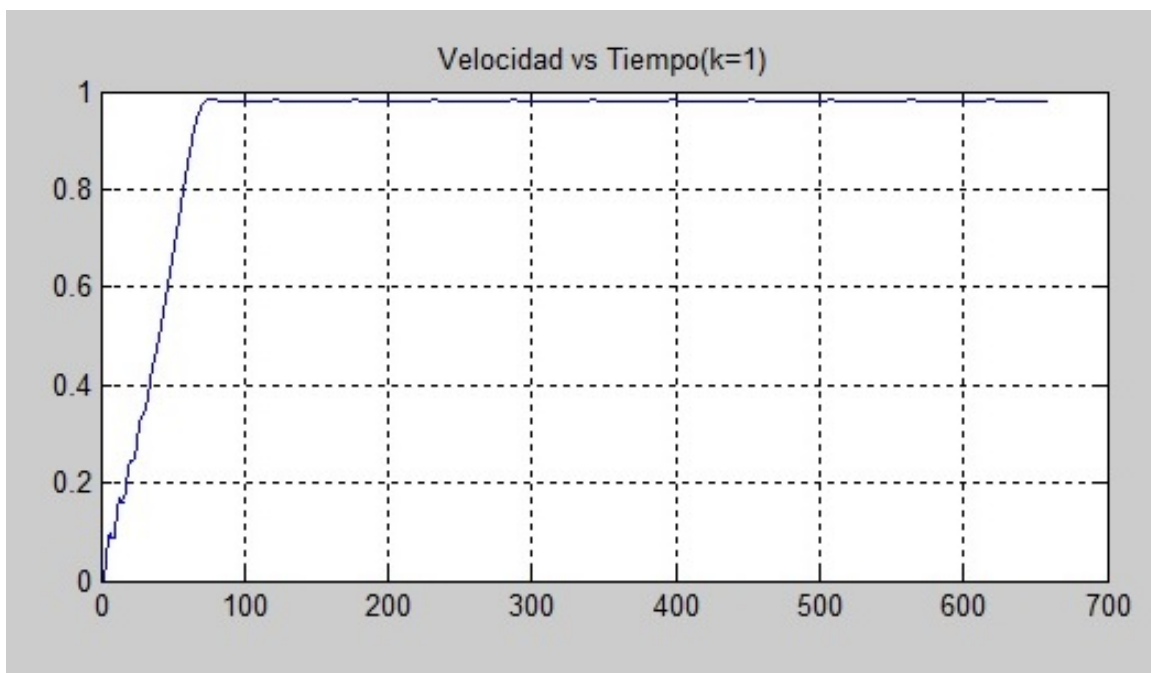


Figura 3.15: Velocidad vs Tiempo.

Se muestra en la gráfica 3.15 la velocidad que gira el rotor, notamos que acelera hasta que llega a un punto de equilibrio dependiendo de las especificaciones del motor, la velocidad está en revoluciones por minuto.

3.2.3. Corriente vs Tiempo

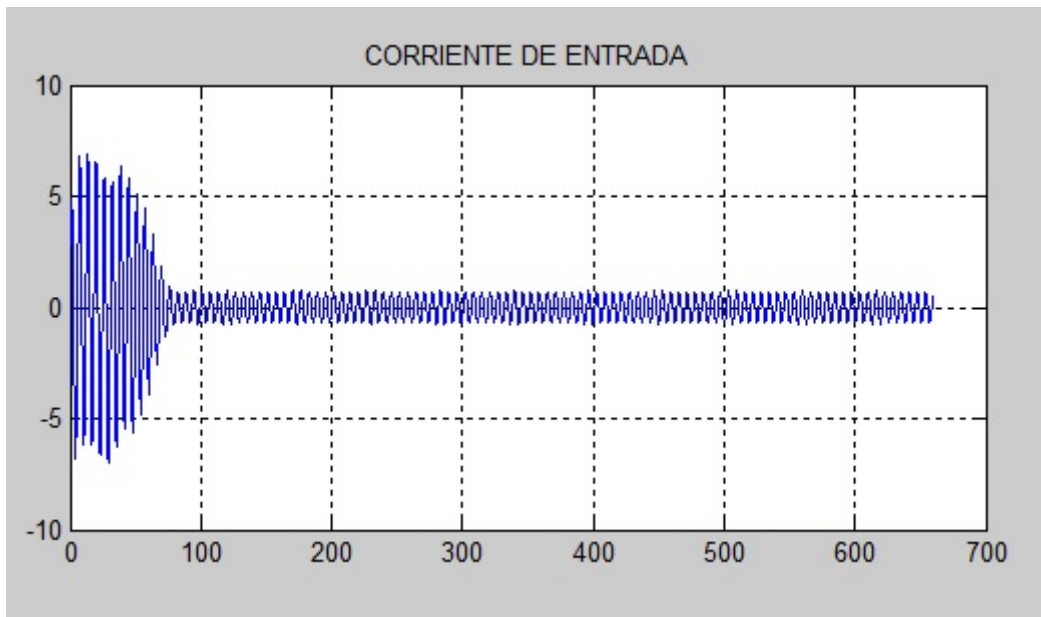


Figura 3.16: Corriente vs Tiempo.

La corriente se comporta al empezar con valores altos, pero al llegar a una velocidad de sincronismo tiende a estabilizarse.

3.2.4. Impedancia vs Tiempo

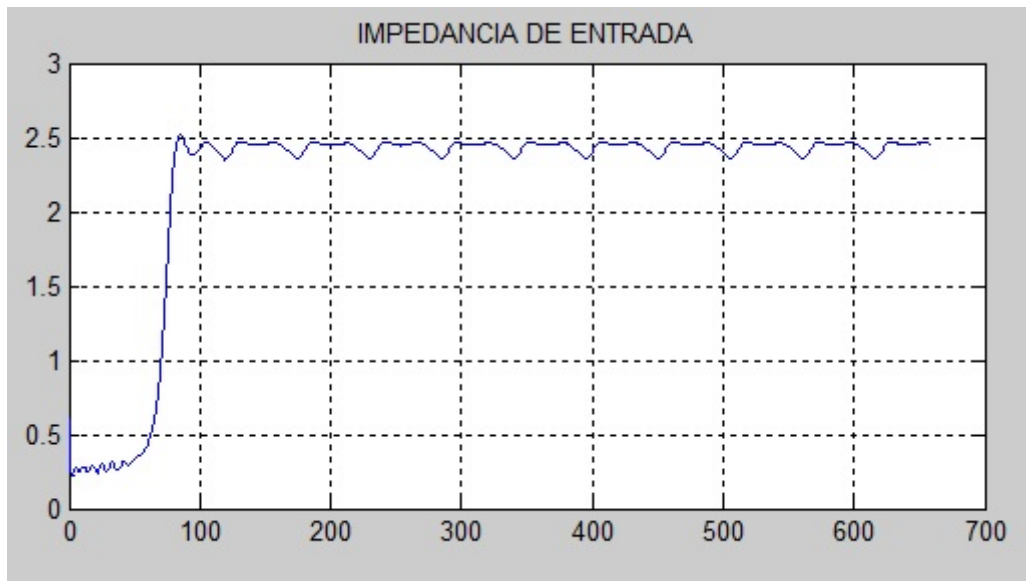


Figura 3.17: Impedancia vs Tiempo.

Cuando comienza a trabajar el motor tiene un deslizamiento $s = 1$ ya que la impedancia al arranque es pequeña debido a la resistencia propia del rotor, a medida que alcanza la velocidad de sincronismo la impedancia se estabiliza.

3.3. Análisis técnico de los armónicos del motor de inducción de paso entero y de paso acortado.

Con los resultados que se obtubieron en los cálculos y las mediciones se demuestra que reducir el paso de devanado en el motor de inducción para éste caso en particular no representa una gran ventaja con relación a un motor con devanado de paso entero, por lo que los beneficios no son mayores y su aplicación resultaría no muy práctica.

3.4. Evaluación de las ventajas y desventajas del motor de inducción de paso acortado.

3.4.1. Ventajas

Con el motor de inducción de paso acortado no se redujo en mayor medida los efectos de los armónicos en la red eléctrica de la Universidad.

En las pruebas de laboratorio se vio que el arranque del motor se logro a los 40 A, lo cuál demuestra que se necesita menos amperaje para lograr poner en funcionamiento a éste motor.

En la medida de la corriente y la tensión se logro valores menores a los de su predecesor. El motor no produce vibraciones que produzcan un mal funcionamiento del mismo. Como se vio en los cálculos y las mediciones se mejoro el torque del motor.

3.4.2. Desventajas

El recalentamiento del motor es un poco elevado cuando se lleva al nivel máximo que soporta el motor.

El diseño y el armado del devanado de doble capa se lo deber realizar con el mayor cuidado posible ya que de ello depende el buen funcionamiento del motor.

3.5. Análisis de resultados y aplicaciones factibles para un sistema eléctrico.

Como se pudo ver, medir y calcular la presencia de armónicos en la red de Universidad Politécnica Salesiana con la instalación del filtro de armónicos, se observa que existió una diferencia entre el motor con bobinado de paso entero y el motor con bobinado de paso acortado ya que en las mediciones se comprobó que no existió una mejora en la reducción de los efectos de los armónicos con el motor de bobinado de paso acortado, eso indica que no sería práctico utilizar este tipo de filtros con éste tipo de bobinado en una red de un sistema de potencia y con ello evitar la presencia de los problemas que originan los armónicos como el recalentamiento de los cables, presencia de resonancia en los circuitos eléctricos y demás problemas que causan los mismos en las redes eléctricas.

Como se demostró éste filtro tiene varias aplicaciones muy factibles si se utiliza con el bobinado de paso entero, un ejemplo de aquello es de que el filtro se lo instalo en el sótano del edificio de laboratorios de la Universidad Politécnica Salesiana en serie a la carga eléctrica y no se necesitan mayores modificaciones a los tableros en donde se encuentren los breakers que controlan la distribución eléctrica del edificio.

En el ámbito particular o residencial no tendría un uso formal ya que no existen mayores cargas eléctricas en un hogar promedio, a menos que sean edificios o lugares que utilicen aparatos eléctricos que necesiten alimentar grandes cargas o utilicen motores ya sean estos de bombas de agua, ascensores, etc, en estos casos se puede implementar un filtro de armónicos, realizando un estudio previo del nivel de armónicos presentes en la red eléctrica.

Capítulo 4

Conclusiones y Recomendaciones

4.1. Conclusiones

- De las pruebas realizadas se observa que para arrancar el motor se necesitó de 20A para comenzar a girar, luego el motor alcanza su velocidad nominal. En la corriente puede alcanzar los 200A que es el valor máximo de corriente que soporta el nuevo devanado.
- La reducción de paso ha permitido tener una mejor forma de onda de la fuerza electromotriz f.e.m. pero al final no se ve una mayor reducción de los armónicos que era el principal objetivo de la presente tesis.
- Al momento de realizar el nuevo bobinado se logra tener una reducción de la longitud de la bobina lo que permite disminuir las pérdidas en el motor.
- Este tipo de filtro es totalmente amable con el medio ambiente ya que no produce ningún tipo de ruido que perjudique a las personas que se encuentren alrededor del filtro.
- Las bobinas con las que se construyó el motor son más cortas en longitud en relación a las bobinas de paso entero.
- Cuando se calcula el valor de los grados eléctricos se puede tener una perspectiva de con cuántos grados eléctricos se puede acortar el paso de bobina.
- El paso polar ayuda a establecer cuántas ranuras tiene cada polo.
- El bobinado trifásico doble capa permite manejar varios niveles de corriente dependiendo de la conexión que se realice entre las bobinas.
- La eficiencia que se obtiene después de realizar los cálculos correspondientes es de 10.6%.

- Al establecer el valor del THD se pudo verificar que en las condiciones en que se desarrolla la tesis, no se ve una disminución de los armónicos aguas arriba.

4.2. Recomendaciones

- Como el estator es de nylon hay que tener en cuenta que el motor no se debe recalentar ya que se podría dañar permanentemente el bobinado del motor y el estator.
- Se puede seguir investigando cuáles son las ventajas o desventajas eléctricas y porque no mecánicas de éste prototipo.
- Se puede tratar de reducir el tamaño del filtro para que se realicen aplicaciones al nivel residencial.
- Entre las múltiples aplicaciones que tienen los filtros para armónicos se puede utilizar éstos en los motores monofásicos y bifásicos para comprobar su funcionamiento.
- En la actualidad se quiere implementar las cocinas de inducción en los hogares ecuatorianos y éstas generan alta presencia de armónicos en este caso se puede aplicar el filtro para armónicos y verificar su comportamiento.

Bibliografía

- [1] “Recomendaciones Prácticas y Requerimientos de la IEEE Standar 519 para el control de Armónicos en Sistemas Eléctricos dde Potencia,” 1992.
- [2] G. M. C. M. y John Eduardo Valle de la Cruz, “Construcción de un motor trifásico de inducción Jaula de Ardilla con estator de Plástico ,” p. 77, 2013.
- [3] “IEEE Standard 4 Techniques for Higt-Voltaje Testing,” 1995.
- [4] G. Crisci, “COSTRUZIONE SCHEMI E CALCOLO DECGLO AVVOLGIMENTI DELLE MACCHINE ELETTRICHE ROTANTI,” vol. Quarta Edizione, 1956.
- [5] S. J. Chapman, “Máquinas Eléctricas,” vol. Tercera Edición, 2000.
- [6] “IEEE 112 Standard Test Procedure for Polyphase Induction Motors and Generators,” 2004.
- [7] “IEEE 115 Standard Test Procedures for Synchronous Machines,” 1995.
- [8] “Norma IEEE 95 Ensayos de Alta Tensión Continua (Máquinas nuevas y usadas) ,” 2002.
- [9] P. S. O. Gutiérrez, “Protocolo de pruebas para máquinas rotativas de baja potencia fundamentadas en normas IEEE,” p. 163, 2012.
- [10] A. R. A. Strauss and R. Terán, “Determinación Experimental de los Parámetros Eléctricos de una Máquina de Inducción,” vol. Primera Edición, no. 1, p. 17, 2007.
- [11] J.M.Aller, “Máquinas Eléctricas Rotativas: Introducción a la Teoría General,” vol. Primera Edición.
- [12] J. M. Aller, “Principios de Básicos de la Máquina de Inducción. Apuntes del Curso de Conversión de Energía Eléctrica III. Universidad Simón Bolívar (documento electrónico).”
- [13] F. Q. F. Breasciani, “Motor de Inducción de una sola espira,” vol. Edición 9, 2013.

- [14] G. E. P. Solano and M. M. Sánchez, “Análisis de los parámetros de comportamiento de un sistema tetrafásico mediante el modelamiento y construcción del sistema de generación electrónico y su aplicación a un motor de inducción tetrafásico,” p. 134, 2011.