

UNIVERSIDAD NACIONAL DE CÓRDOBA

FACULTAD DE CIENCIAS EXACTAS, FÍSICAS Y NATURALES



**ESTUDIO DE LA DISTORSIÓN ARMÓNICA
GENERADA AGUAS ARRIBA DE UN VARIADOR DE
VELOCIDAD MONOFÁSICO CON SALIDA TRIFÁSICA**

Autores:

Mondino, Marcelo Micael
Ugarte Verazain, Nicolás Santiago

Carrera:

Ingeniería Mecánica Electricista

Director:

Ing. Fioravanti, Marcelo

Co - Director:

Suarez, Roberto

Córdoba, 2018



*Estudio de la Distorsión Armónica Generada
Aguas Arriba de un Variador de Velocidad
Monofásico con Salida Trifásica*

PRÓLOGO

El desarrollo del proyecto integrador pretende evaluar el fenómeno de la distorsión armónica generada en la red eléctrica aguas arriba de un variador de velocidad, analizar la atenuación de este fenómeno al añadir una bobina de línea a la red y dar un análisis global de la situación.

Se presenta como base teórica en el presente trabajo una investigación de los temas involucrados, con una profundidad relativa y/o acorde a la intensidad de fondo. Los temas a los que referimos son: los variadores de velocidad, el fenómeno de distorsión armónica y las bobinas o inductancias de línea.

En lo referente a la experimentación, en los ensayos efectuados se modifica la frecuencia de salida del variador de velocidad, seleccionando la frecuencia fundamental (50 Hz), y dos valores de frecuencia por debajo de la fundamental, 20 Hz y 35 Hz.

Las mediciones se realizaron con el motor eléctrico trifásico trabajando a un 50 % de plena carga. En estas circunstancias se hicieron mediciones de armónicos de tensión y de corriente.

A posteriori se efectuaron las mediciones anteriormente mencionadas, después de haber sido instalada una inductancia de línea a la red, aguas arriba del variador de velocidad.

En este caso la inductancia de línea es marca Siemens, y es la inductancia recomendada por el fabricante para el variador de velocidad que será empleado, también de la misma marca. Se realizaron comparaciones entre el antes y el después de ser instalado dicho elemento, indicando la reducción de porcentajes de distorsión armónica total (THD%).

En una siguiente instancia se realizaron nuevamente las mediciones en cuestión, pero en este caso instalando una inductancia de línea diseñada en este proyecto, conectándola en serie con el variador de velocidad y aguas arriba de mismo.

Finalmente, el trabajo culmina con el procesamiento de los registros de datos obtenidos en las diferentes mediciones y un enfoque analítico, teniendo presente las normativas correspondientes, dando por último una conclusión al tema.

Índice

PRÓLOGO	iii
ÍNDICE DE TABLAS	vi
ÍNDICE DE FIGURAS	vi
AGRADECIMIENTOS.....	ix
CAPÍTULO 1	10
EL PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN	10
1.1. TEMA DE INVESTIGACIÓN	10
1.2. PLANTEAMIENTO Y CONTEXTUALIZACIÓN DEL PROBLEMA	10
1.3. JUSTIFICACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN.....	11
1.4. OBJETIVOS	12
1.4.1. Objetivo General	12
1.4.2. Objetivos Específicos	12
1.5. MARCO TEÓRICO.....	13
1.6. METODOLOGÍA.....	14
1.6.1. Modalidad y Tipo de Investigación.....	14
1.6.2. Plan de recolección de información.....	14
1.6.3. Procesamiento y análisis de la información	15
CAPÍTULO 2	16
VARIADOR DE VELOCIDAD	16
2.1. SISTEMAS DE VELOCIDAD VARIABLE	16
2.2. CONCEPTOS ELECTROTÉCNICOS	17
2.3. FUNDAMENTOS TECNOLÓGICOS DE LA REGULACIÓN ELECTRÓNICA DE VELOCIDAD EN MOTORES.....	22
2.4. EL MOTOR ASÍNCRONO ALIMENTADO POR UN CONVERTIDOR DE FRECUENCIA.....	25
2.5. SELECCIÓN	28
2.6. SINAMICS G110	30
Modos de puesta en servicio	32
Panel De Operaciones Básico (BOP).....	32
CAPÍTULO 3	33
ARMÓNICOS	33
3.1. DEFINICIÓN.....	33
3.2. INDICADORES DE LA DISTORSIÓN ARMÓNICA.....	35



3.3.	ESTÁNDARES EN ARMÓNICOS	40
3.4.	EFFECTOS DE LAS CORRIENTES ARMÓNICAS	47
3.5.	REPERCUCIÓN DE LA DISTORSIÓN DE LA TENSIÓN SOBRE EL SISTEMA DE DISTRIBUCIÓN..	49
3.6.	ELIMINACIÓN DE LOS ARMÓNICOS.....	50
3.7.	EVALUACIÓN DE COSTOS	51
CAPÍTULO 4		52
REACTOR DE LÍNEA.....		52
4.1.	CONCEPTO Y CARACTERÍSTICAS DEL REACTOR DE LÍNEA	52
4.1.1.	FACTOR DE CALIDAD	53
4.2.	EL REACTOR DE LÍNEA Y LOS ARMÓNICOS.....	53
4.3.	MEDICIÓN DE INDUCTANCIA	55
4.4.	CONSTRUCCIÓN DE LA BOBINA.....	61
CAPÍTULO 5		65
MEDICIÓN DE LA EMISIÓN ARMÓNICA EN VARIADORES DE VELOCIDAD		65
5.1.	INTRODUCCIÓN	65
5.2.	ENSAYOS REALIZADOS.....	66
5.3.	MEDICIÓN, ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS.....	67
5.3.1.	PROCEDIMIENTO DE MEDICIÓN.....	69
5.3.1.1.	EQUIPOS UTILIZADOS.....	70
5.3.2	REPRESENTACIÓN DE LOS RESULTADOS	71
5.3.3.	COMPARACIÓN DE RESULTADOS.....	98
5.3.3.1.	Modalidad	98
5.3.3.2.	Análisis e interpretación de los resultados de corriente.....	110
5.3.3.3.	Análisis e interpretación de los resultados de tensión	115
5.3.4	SOLUCIONES PARA ATENUAR LOS ARMÓNICOS.....	115
CONCLUSIÓN		120
ANEXOS		121
BIBLIOGRAFÍA.....		138

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2.1: Parámetros que pueden cambiarse para variar velocidad de motor.....	20
Tabla 3.1: Límites de voltaje de distorsión armónica individual y total.	42
Tabla 3.2: Límites de corriente de distorsión armónica individual y total.....	42
Tabla 3.3: Niveles de compatibilidad para voltajes armónicos individuales en la red pública de Baja Tensión según IEC 61000-2-2.....	45
Tabla 3.4: Límites de corrientes armónicas para equipos de Clase A.....	46
Tabla 4.1: Cálculo de inductancia del Reactor de línea.....	54
Tabla 4.2: Resumen de valores de inductancia obtenidos en Reactancia Siemens.....	60
Tabla 4.3: Valor medio, mínimo y máximo de inductancia L calculado.....	60
Tabla 4.4: Cálculo núm. de vueltas de Reactor de línea.	63
Tabla 5.1: Resumen de armónicos de corriente impares.	99
Tabla 5.2: Resumen de armónicos de corriente pares.	100
Tabla 5.3: Resumen de armónicos de tensión impares.	111
Tabla 5.4: Resumen de armónicos de tensión pares.....	111
Tabla A.I.1: Cómputo de materiales para tablero.....	124

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1: Flujo de potencia de un motor.....	17
Figura 2.2: Efecto de campo giratorio sobre una espira en cortocircuito.....	17
Figura 2.3: Sistema magnético de la máquina asíncrona.....	18
Figura 2.4: Variación lineal de la relación Tensión - Frecuencia.....	21
Figura 2.5: Curva característica Par - Frecuencia.....	21
Figura 2.6: Etapas de la regulación electrónica de velocidad.....	22
Figura 2.7: Diagrama de bloques de variador de velocidad.....	24
Figura 2.8: Curvas de Par - Velocidad de motor asíncrono alimentado a flujo constante.....	25
Figura 2.9: Curvas de Par - Velocidad de motor asíncrono alimentado con tensión y frecuencia variable de forma no proporcional.....	26

Figura 4.1: Circuito RLC serie.....	56
Figura 4.2: Frecuencia de resonancia f_0	57
Figura 4.3: Respuestas con diferentes factores de calidad Q.....	57
Figura 4.4: Medición de frecuencia de resonancia en FCEFyN.....	58
Figura 4.5: Generador de onda y osciloscopio.....	58
Figura 5.1: Representación de placa del motor.....	70
Figura 5.2: Fotografía de generador utilizado como carga del motor.....	70
Figura 5.3: Espectro Armónico Ensayo N°1 (50 Hz).....	72
Figura 5.4: Espectro Armónico Ensayo N°2 (35 Hz).....	74
Figura 5.5: Espectro Armónico Ensayo N°3 (20 Hz).	76
Figura 5.6: Espectro Armónico Ensayo N°4 (50 Hz).....	81
Figura 5.7: Espectro Armónico Ensayo N°5 (35 Hz).....	83
Figura 5.8: Espectro Armónico Ensayo N°6 (20 Hz).....	85
Figura 5.9: Espectro Armónico Ensayo N°7 (50 Hz).....	90
Figura 5.10: Espectro Armónico Ensayo N°8 (35 Hz).....	92
Figura 5.11: Espectro Armónico Ensayo N°9 (20 Hz).....	94
Figura 5.12: Nivel de componentes armónicas en Esquema de Conexión N°1 a diferentes frecuencias de salida del variador de velocidad.....	101
Figura 5.13: Nivel de componentes armónicas en Esquema de Conexión N°2 a diferentes frecuencias de salida del variador de velocidad.....	102
Figura 5.14: Nivel de componentes armónicas en Esquema de Conexión N°3 a diferentes frecuencias de salida del variador de velocidad.....	103
Figura 5.15: Espectro de armónicos de orden impar respecto a límites de la Norma IEC 61000-3-2 (Frecuencia de salida 50 Hz).....	104
Figura 5.16: Espectro de armónicos de orden par respecto a límites de la Norma IEC 61000-3-2 (Frecuencia de salida 50 Hz).....	105
Figura 5.17: Espectro de armónicos de orden impar respecto a límites de la Norma IEC 61000-3-2 (Frecuencia de salida 35 Hz).....	106
Figura 5.18: Espectro de armónicos de orden par respecto a límites de la Norma IEC 61000-3-2 (Frecuencia de salida 35 Hz).....	107
Figura 5.19: Espectro de armónicos de orden impar respecto a límites de la Norma IEC 61000-3-2 (Frecuencia de salida 20 Hz).....	108

Figura 5.20: Espectro de armónicos de orden par respecto a límites de la Norma IEC 61000-3-2 (Frecuencia de salida 20 Hz).....	109
Figura 5.21: Espectro de armónicos impares de tensión respecto a la Norma (Frecuencia de salida 50 Hz).....	112
Figura 5.22: Espectro de armónicos impares de tensión respecto a la Norma (Frecuencia de salida 50 Hz).....	113
Figura 5.23: Espectro de armónicos impares de tensión respecto a la Norma (Frecuencia de salida 50 Hz).....	114
Figura 5.24: Cargas no lineales colocadas lo más aguas arriba posible (Disposición recomendada).....	115
Figura 5.25: Agrupación de cargas no lineales y conexión lo más aguas arriba posible (disposición recomendada).....	116
Figura 5.26: Principio de funcionamiento de un filtro pasivo.....	117
Figura 5.27: Principio de funcionamiento de un filtro activo.....	118
Figura 5.28: Principio de funcionamiento de un filtro híbrido.....	119
Figura A.II.1: Esquema eléctrico de tablero.....	125
Figura A.II.2: Esquema del comando del variador de velocidad.....	126
Figura A.III.1: Hoja de datos de la inductancia Siemens.....	130
Figura A.IV.1: Fotografía de analizador de armónicos Metrel MI 2092.....	132

AGRADECIMIENTOS

A la Universidad Nacional de Córdoba por la posibilidad que nos brindó para crecer, formándonos como profesionales; a todos sus docentes por transmitirnos sus conocimientos.

Al Ing. Marcelo Fioravanti, director del proyecto, por estar presente y dedicar parte de su tiempo, guiándonos y aportando sus conocimientos a este trabajo.

Al Sr. Roberto Suarez y al Sr. Oscar Marchi, quienes colaboraron en las mediciones e instalación de los elementos y equipos eléctricos en el Laboratorio de Baja Tensión.

Al director de la escuela, el Ing. Eloy Villafañe, por orientarnos en todo momento de una manera muy práctica y alentar el desarrollo de este trabajo.

A las personas que desde otro lugar apoyaron incondicionalmente, nuestros padres y familiares, quienes hicieron posible cumplir este enorme logro.

CAPÍTULO 1

EL PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN

1.1. TEMA DE INVESTIGACIÓN

Generación de distorsión armónica por parte de un variador de velocidad conectado a un motor eléctrico asíncrono con carga.

1.2. PLANTEAMIENTO Y CONTEXTUALIZACIÓN DEL PROBLEMA

Sin duda alguna, los accionamientos a base de motores eléctricos son los más numerosos en la mayoría de las aplicaciones, y dentro de ellos los basados en motores de corriente continua han gozado de una total hegemonía en el campo industrial durante décadas.

Sin embargo los motores con menor nivel de exigencias en el mantenimiento son los motores asíncronos de jaula de ardilla, debido a que carecen de colector, tienen una relación peso-potencia mucho menor que los de corriente continua, y por tanto un costo significativamente más bajo. Por estas razones, dada su capacidad de soportar sobrecargas y su elevado rendimiento, es el motor más utilizado en la industria.

Desde hace aproximadamente 20 años, el elevado desarrollo de la electrónica de potencia y los microprocesadores ha permitido variar la velocidad de estos motores, de una forma rápida, robusta y confiable, mediante los reguladores electrónicos de velocidad.

Con la intervención de gran cantidad de equipamiento electrónico en nuestra vida cotidiana, ha comenzado a tener relevancia la presencia de armónicos en las instalaciones de distribución de energía. Los equipos con electrónica de potencia más comunes son: televisores, computadoras, equipos de audio, equipos de comunicaciones, balastos electrónicos para iluminación, etc.

También en la industria aparecieron los variadores de velocidad que mencionábamos, arrancadores suaves, máquinas de soldar con fuentes switching, cargadores de baterías y gran

cantidad de aparatos que, si no han sido cuidadosamente diseñados, introducen una importante distorsión en la forma de la onda de corriente que absorben de la red.

Este trabajo está enfocado principalmente en el estudio de la distorsión armónica generada aguas arriba de un variador de velocidad monofásico con salida trifásica que está alimentando y controlando a un motor eléctrico trifásico con carga.

Se analiza este tema de forma teórica indagando en la bibliografía existente y de forma experimental se efectúa la medición de los parámetros necesarios para desarrollar el trabajo y llegar a las respectivas conclusiones.

Dentro de las posibles soluciones y/o mejoras a la problemática existente nos concentraremos en particular en la aplicación de una inductancia de línea o bobina de línea.

1.3. JUSTIFICACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN

El interés en este tema de investigación se debió a que se trata de un equipo que encontraremos a menudo en la industria y nos será de gran utilidad en nuestro futuro desempeño como profesionales.

El tema de investigación es de gran importancia en la actualidad y lo será más aún en el futuro, ya que la implementación de variadores de velocidad en la industria se está incrementando notablemente y debe tenerse presente los efectos que los mismos generan en la instalación eléctrica de la cual se alimentan.

Además el desarrollo de este tema se justifica en la propuesta por parte del Laboratorio de Baja Tensión (LBT) de la Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales para instalar un tablero de tipo didáctico para controlar la velocidad de un motor trifásico, ya que le han sido donados los equipos necesarios. Esto será realizado de manera complementaria en este trabajo.

1.4. OBJETIVOS

1.4.1. Objetivo General

- Analizar distorsión armónica en corriente y tensión causada por el variador de velocidad.

1.4.2. Objetivos Específicos

- Medir el valor de inductancia (L) de la bobina de línea indicada por el fabricante.
- Diseñar una bobina de línea para atenuar las distorsiones armónicas y llevarla a límites aceptables.
- Verificar la atenuación de la distorsión utilizando la bobina de línea de la marca Siemens.
- Verificar la atenuación de la distorsión utilizando una bobina de línea diseñada.

1.5. MARCO TEÓRICO

Este proyecto se encuadra y tiene como sustento, cuadernos técnicos, guías de diseño de instalaciones eléctricas, catálogos de productos y manuales de marcas reconocidas, referentes al estudio de armónicos. Estos son citados en la bibliografía al final de este documento.

Las normativas aplicadas en el desarrollo del proyecto integrador sobre la generación de distorsión armónica por parte de un variador de velocidad conectado a un motor con carga, son mencionadas en el capítulo correspondiente a armónicos en la sección "Estándares en armónicos".

La investigación elaborada por el autor Egdo. Darwin Abraham López Ati es un antecedente del presente proyecto integrador y a continuación se presentan el tema y sus conclusiones:

"DISTORSIÓN ARMÓNICA PRODUCIDA POR VARIADORES DE FRECUENCIA PARA MEJORAR EL DESEMPEÑO DE MOTORES ELÉCTRICOS TRIFÁSICOS EN EL LABORATORIO DE AUTOMATIZACIÓN INDUSTRIAL DE LA FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA".

En esta tesis se determina que la distorsión armónica es menor al trabajar el motor a la frecuencia fundamental; a esta frecuencia la presencia de armónicos tiene menor preponderancia. Corrobora que para mejorar el desempeño de motores eléctricos trifásicos y reducir la distorsión armónica se requiere la utilización de un limitador de armónicos (reactancia trifásica) realizando mediciones después de haber sido instalado el limitador y obteniendo resultados favorables.

1.6. METODOLOGÍA

El presente tema de investigación asumió un enfoque cuantitativo, debido a que se basa en la toma o registro de datos de la red aguas arriba del variador de frecuencia.

1.6.1. Modalidad y Tipo de Investigación.

Modalidad.

La investigación abarcó diferentes modalidades. La modalidad de campo ya que se obtuvo información en el Laboratorio de Baja Tensión. Además una modalidad bibliográfica ya que se basó en información que se encontró en diferentes libros, documentos, catálogos, etc., relacionados con el tema de investigación. Y por último una modalidad histórica ya que se basó en investigaciones realizadas con anterioridad por otros autores.

Tipo.

Para dar inicio a este trabajo se realizó una indagación previa al tema para obtener un primer conocimiento de la magnitud de la situación y plantear el tema de investigación, para después profundizar con bases y normas establecidas vigentes.

La investigación fue de tipo descriptiva, experimental y comparativa ya que se dedicó a la descripción de los fenómenos que se encuentran en el tema, se obtuvieron datos de manera práctica y se analizó comparativamente las diferentes experiencias.

1.6.2. Plan de recolección de información.

Se utilizó catálogos, libros y cuadernos técnicos bibliográficos referentes al tema de investigación.

1.6.3. Procesamiento y análisis de la información

Para el correcto procesamiento de la información se siguieron varios lineamientos entre los cuales podemos mencionar los siguientes:

- Se revisó críticamente la información bibliográfica recolectada, es decir, se seleccionó la información más clara, concisa y necesaria.
- Se procesó en la plataforma “Excel” los registros exportados desde el Software “PowerLink” perteneciente al instrumento analizador de armónicos utilizado.
- Proponiendo un criterio de comparación se analizó el contenido armónico generado por el variador de velocidad a diferentes frecuencias de salida.
- Teniendo presente la normativa vigente se comparó los registros obtenidos con los límites de contenido armónico establecidos por la reglamentación.
- La información fue presentada en tablas y gráficos comparativos.

CAPÍTULO 2

VARIADOR DE VELOCIDAD

2.1. SISTEMAS DE VELOCIDAD VARIABLE

En la industria en una variedad de procesos es común encontrar sistemas de velocidad variable modernos, esto es, un sistema capaz de convertir energía eléctrica en energía mecánica manteniendo controlado el proceso de conversión.

Este sistema está compuesto por un conjunto de dispositivos eléctricos y electrónicos que entrega y controla la energía eléctrica al motor. El más importante es el variador de velocidad, acompañado de elementos de maniobra tales como interruptor de potencia, contactores asociados, elementos de comando y señalización, un motor eléctrico trifásico de inducción tipo jaula de ardilla, un sistema de transmisión mecánica que transmite la energía desde el motor hacia la carga. Es importante tener en cuenta que en ocasiones a pesar de que el variador de velocidad logra operar el motor a bajas velocidades, la transmisión no puede obviarse pues ésta no solamente baja la velocidad sino que aumenta el torque en la salida.

Como resultado de esta conversión, se produce movimiento controlado de un proceso industrial determinado. Algunos ejemplos son: bombas centrífugas, ventiladores, bandas transportadoras, compresores, etc.

2.2. CONCEPTOS ELECTROTÉCNICOS

Para hablar de variadores de velocidad sería conveniente recordar algunos conceptos básicos relacionados al control de la velocidad de los motores asíncronos de jaula de ardilla.

En general las máquinas eléctricas sirven para transformar la energía mecánica en eléctrica (generadores) o, inversamente, para transformar la energía eléctrica en mecánica (motores); es decir que las máquinas eléctricas son reversibles y pueden trabajar como generador o como motor.

Los motores eléctricos son aquellos que proporcionan potencia para realizar un trabajo.

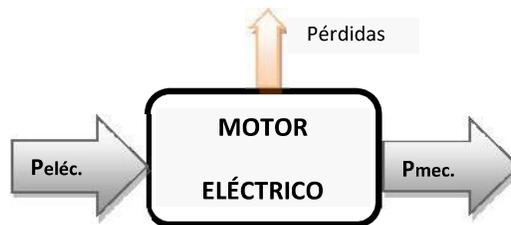


Figura 2.1: Flujo de potencia de un motor.

El sistema magnético de una máquina asíncrona consta de 2 núcleos: el núcleo exterior fijo que tiene la forma de un cilindro hueco y el núcleo cilíndrico interior giratorio.

Estas máquinas asíncronas se basan en la acción de un campo magnético giratorio sobre un arrollamiento en cortocircuito.

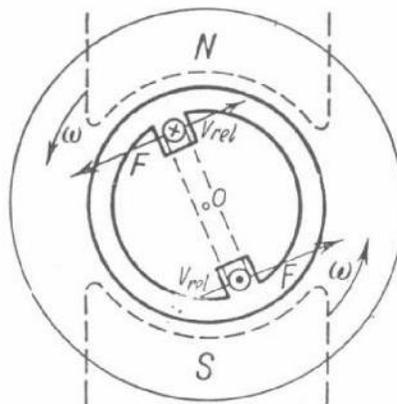


Figura 2.2: Efecto de campo giratorio sobre una espira en cortocircuito.

La parte fija de la máquina se llama **estator** y la parte giratoria **rotor**.

En las ranuras ubicadas en el lado interior del estator se coloca un arrollamiento trifásico, constituido por tres arrollamientos iguales (uno por cada fase) desplazado 120° entre sí (para un motor con un solo par de polos). Los efectos simultáneos de las tres corrientes de una red trifásica originan un campo magnético de magnitud fasorial constante que gira a velocidad síncrona (n_s).

Si en el rotor colocamos una espira en cortocircuito que pueda girar alrededor de un eje, al conectar el estator a la red se origina un campo giratorio que originará una fuerza electromotriz inducida (f.e.m). Esta f.e.m inducida, a su vez hace circular una corriente en la espira en cortocircuito del rotor; y por la acción del campo magnético se creará una cupla distribuida a lo largo de la espira haciendo que ésta trate de seguir al campo giratorio. La espira nunca podrá alcanzar al campo giratorio debido a la cupla resistente, que está compuesta en primer término por las pérdidas por rozamiento en los cojinetes y en segundo término por la carga que mueve el eje del motor; es decir que siempre habrá una diferencia entre la velocidad “ n_s ” del campo giratorio y la del rotor “ n ” igual a la del eje del motor.

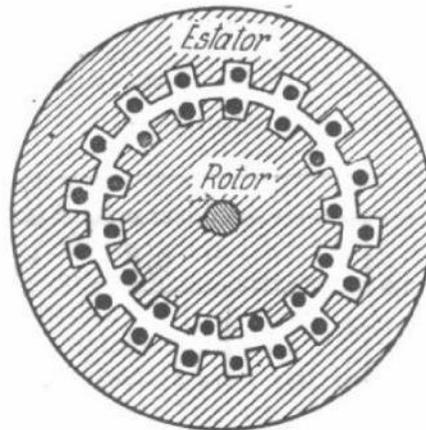


Figura 2.3: Sistema magnético de la máquina asíncrona.

Por lo tanto, llamaremos velocidad relativa a la diferencia entre n_s y n , que para el caso de motores será positiva y para el caso de generadores será negativa.

$$n_{rel} = n_s - n$$

La magnitud característica que determina las condiciones de trabajo de la máquina asíncrona es el **deslizamiento**, definido como:

$$s = \frac{n_s - n}{n_s}$$

Para ilustrar este concepto, vemos como ejemplo que para un motor de un par de polos con frecuencia de línea de 50 Hz, girando en régimen a 2866 rpm (n), se tendrá que si el motor está parado $n=0$, entonces $s=1$ (100% deslizamiento), si el motor está en régimen $n=2866$ rpm, entonces $s=0,044$ (4,4% deslizamiento). En el hipotético caso en que el rotor estuviera síncrono con el campo magnético giratorio, se tendría $n=3000$ rpm, entonces $s=0$ (0% deslizamiento).

Además:

$$n = n_s - n_s * s \quad \Leftrightarrow \quad n = n_s * (1 - s)$$

Recordando que:

$$n_s = \frac{60 * f}{p}$$

Dónde:

f : es la frecuencia de la línea (Hz).

p : es el número de pares de polos.

Luego, se tiene que la relación entre la rotación, la frecuencia de alimentación, el número de polos y el deslizamiento de un motor de inducción obedece a la siguiente ecuación:

$$n = \frac{60 * f}{p} * (1 - s)$$

Las rpm reales de un motor (n) son función del deslizamiento (s), de la cantidad de pares de polos (p) y de la frecuencia de línea (f).

El análisis de la fórmula demuestra que se puede actuar en tres parámetros, con el intento de variar la velocidad de un motor de este tipo, según se verifica en la tabla 2.1. Esta última presenta las características de cada opción.

VARIACIÓN DE VELOCIDAD	
PARÁMETRO DE VARIACIÓN	CARACTERÍSTICA
Número de polos	Variación discreta
	Sobredimensionamiento de la carcasa
Deslizamiento	Variación continua
	Pérdidas del rotor
	Rango de variación pequeña
Frecuencia de la tensión del estator	Variación continua
	Uso de Convertidores de Frecuencia**

Tabla 2.1: *Parámetros que pueden cambiarse para variar velocidad de motor.*

Sobre la opción última centraremos nuestra atención ya que los variadores de frecuencia, tomando la tensión y la frecuencia de línea, podrán variarla a su salida desde 0,01Hz hasta frecuencias por encima de la frecuencia de red, dependiendo del uso y tipo de motor a emplear.

La utilización de los variadores de frecuencia actualmente comprende el método más eficiente para controlar la velocidad de los motores de inducción. Estos transforman la tensión de la red, de amplitud y frecuencia constantes, en una tensión de amplitud y frecuencia variables. Con la variación de la frecuencia de la tensión de alimentación, se varía también la velocidad del campo girante y consecuentemente la velocidad mecánica de rotación de la máquina.

Admitiéndose, que la corriente depende de la carga y que esta es constante, se nota, que variando igualmente la amplitud y la frecuencia de la tensión de alimentación, el flujo y, consecuentemente, el par permanecen constantes. El motor entonces provee un ajuste continuo de velocidad y par con relación a la carga mecánica.

Esto se observa en las siguientes relaciones. El par desarrollado por el motor de inducción sigue la ecuación:

$$T = K_1 * \Phi_m * I_2$$

Y su flujo de magnetización

$$\Phi_m = K_2 * \frac{V_1}{f_1}$$

Donde:

T: par disponible en la punta de eje (N.m).

Φ_m : flujo de magnetización (Wb).

I_2 : corriente rotórica (A) depende de la carga.

V_1 : tensión estática (V).

K_1 y K_2 : constantes que dependen del material y del diseño de la máquina.

La variación de la relación V_1/f_1 es hecha linealmente hasta la frecuencia base o nominal del motor. Arriba de esta, la tensión es máxima (igual a la nominal) y permanece constante, habiendo entonces solamente variación de la frecuencia aplicada al devanado estático del motor, según es representado en la figura.

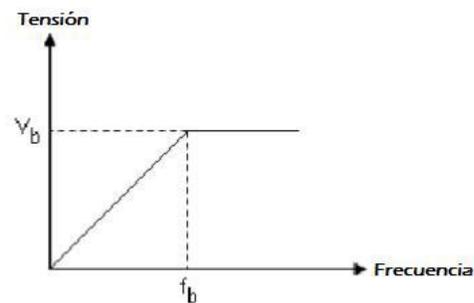


Figura 2.4: Variación lineal de la relación Tensión - Frecuencia.

Arriba de la frecuencia base se caracteriza la llamada región de enflaquecimiento de campo, pues allí el flujo decrece con el aumento de la frecuencia, causando también la disminución de par.

La curva característica par por velocidad del motor accionado por convertidor de frecuencia se representa en la siguiente imagen.

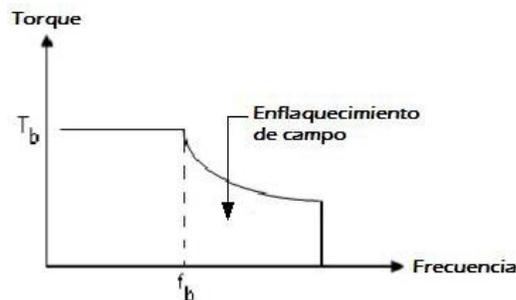


Figura 2.5: Curva característica Par - Frecuencia.

Se nota, por tanto, que el par permanece constante hasta la frecuencia base y decrece gradualmente arriba de esta.

2.3. FUNDAMENTOS TECNOLÓGICOS DE LA REGULACIÓN ELECTRÓNICA DE VELOCIDAD EN MOTORES.

Un regulador electrónico de velocidad está formado por circuitos que incorporan transistores de potencia como el IGBT (transistor bipolar de puerta aislada) o tiristores, siendo el principio básico de funcionamiento transformar la energía eléctrica de frecuencia industrial en energía eléctrica de frecuencia variable.

Esta variación de frecuencia se consigue mediante dos etapas en serie. Una etapa rectificadora que transforma la corriente alterna en continua, con toda la potencia en el llamado circuito intermedio y otra inversora que transforma la corriente continua en una onda obtenida con una modulación por ancho de pulsos, con una frecuencia y una tensión regulables, que dependerán de los valores de consigna. A esta segunda etapa también se le suele llamar ondulator.

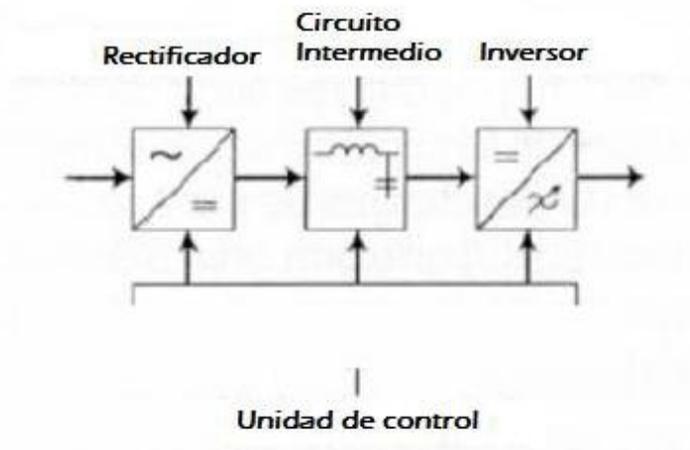


Figura 2.6: Etapas de la regulación electrónica de velocidad.

El modo de trabajo puede ser manual o automático, permitiendo hallar soluciones para un trabajo óptimo en todo tipo de procesos, pudiendo ser manejados por ordenador, PLC, señales digitales o de forma manual. Más adelante se comentan de manera más detallada los tipos de control.

La mayoría de las marcas incluyen dentro del propio convertidor protecciones para el motor, tales como protecciones contra sobre-intensidad, sobre-temperatura, fallo contra desequilibrios, defectos a tierra, etc., además de ofrecer procesos de arranque y frenados suaves mediante rampas de aceleración y de frenado, lo que redonda en un aumento de la vida del motor y las instalaciones.

El uso de convertidores de frecuencia añade un enorme potencial para el ahorro de energía disminuyendo la velocidad del motor en muchas aplicaciones.

Otros beneficios aportados por estos equipos, son:

- Mejora el proceso de control y por lo tanto la calidad del producto.
- Se puede programar un arranque suave, parada y freno.
- Amplio rango de velocidad, par y potencia (velocidades continuas y discretas).
- Bucles de velocidad.
- Puede controlar varios motores.
- Mejora el factor de potencia.
- Brinda protección térmica al motor.
- Reducción del consumo.
- Mejor control operativo, mejorando la rentabilidad y la productividad de los procesos productivos.
- Disminuye esfuerzos mecánicos y eléctricos en el arranque del motor.

Cada familia de equipos tiene un paquete de recursos de control asociados, dentro de los que son imprescindibles las siguientes:

- Entradas digitales DI
- Salidas digitales DO
- Salidas de relé RO (capacidad de conexión en tensiones industriales como 110 ó 220 V)
- Entradas analógicas AI
- Salidas analógicas AO

Con respecto a la velocidad, los convertidores suelen permitir dos tipos de control:

Control manual de velocidad

La velocidad puede ser establecida o modificada manualmente (display de operador).
Posibilidad de variación en el sentido de giro.

Control automático de velocidad

Utilizando realimentación se puede ajustar la velocidad automáticamente. Esta solución es la ideal para su instalación en aplicaciones en las que la velocidad demandada varía de forma continua.

Además de las ventajas enumeradas anteriormente al utilizar un Variador de Frecuencia para accionar un motor, son conocidas las bondades en cuanto a los recursos de control de este equipo. Esto es, su posibilidad de conectarse con sistemas de control superiores o ser el mismo Variador el cerebro de la automatización de un proceso y ejecutar acciones basadas en órdenes externas o internas, o en realimentación del proceso. Por ejemplo, controlar la velocidad y consecuentemente el flujo de un ventilador de inyección de aire en función de la temperatura de un recinto.

En general un variador de velocidad puede verse como el siguiente diagrama de bloques:

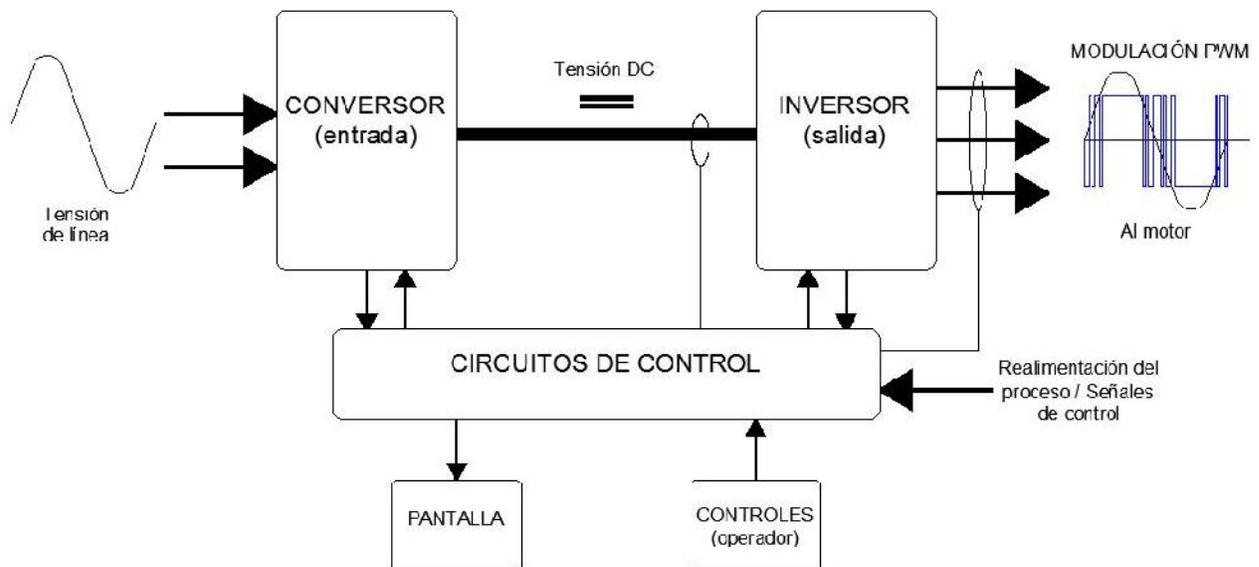


Figura 2.7: Diagrama de bloques de variador de velocidad.

El convertidor de entrada transforma corriente alterna (CA) sinusoidal en corriente continua (CC), necesaria para los transistores de potencia, controlados electrónicamente, del inversor de salida. El enlace de continua es la fuente de potencia del inversor de salida.

El inversor de salida proporciona una onda de tensión y frecuencia variables con una modulación por ancho de pulsos (PWM). La tensión (V) y la frecuencia (Hz) varían a la vez para obtener un par constante de velocidad variable, o varían en distinta proporción para obtener un par variable a distintas velocidades.

2.4. EL MOTOR ASÍNCRONO ALIMENTADO POR UN CONVERTIDOR DE FRECUENCIA.

Para aprovechar al máximo el motor hay que controlarlo de modo que el flujo se aproxime lo más posible al nominal para el cual ha sido diseñado. Cuando el motor está regulado con flujo constante e igual al nominal presenta unas curvas características como las siguientes:

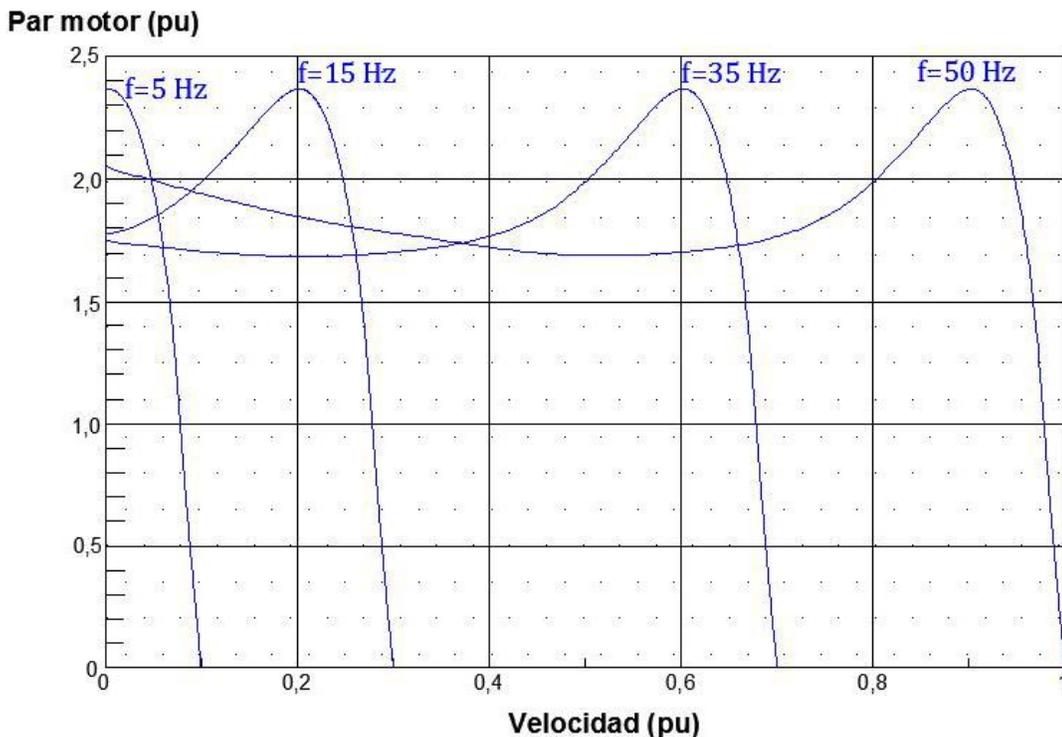


Figura 2.8: Curvas de par-velocidad de un motor asíncrono alimentado a flujo constante.

Una forma de lograr que el flujo sea constante de manera aproximada, es hacer que la tensión y la frecuencia varíen de forma proporcional.

Sin embargo esto es sólo aproximado, y a medida que las frecuencias van bajando los flujos disminuyen también por lo que el par para bajas frecuencias disminuye de forma importante.

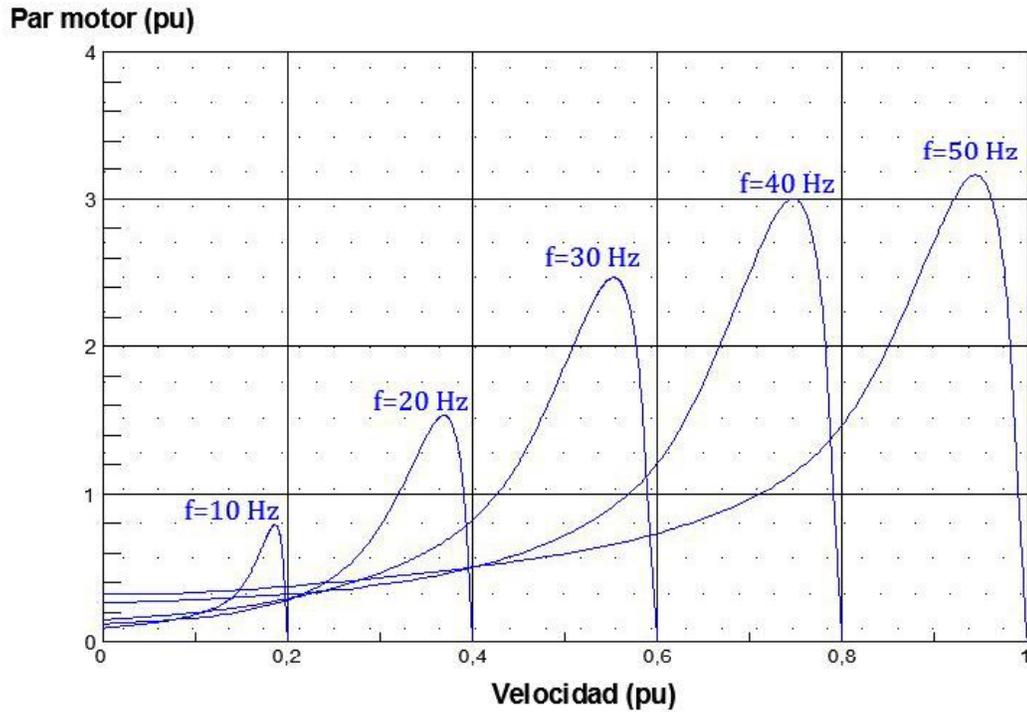


Figura 2.9: Curvas de par-velocidad de un motor asíncrono alimentado con tensión y frecuencia variable de forma no proporcional.

Para lograr el funcionamiento con flujo constante es preciso que a bajas frecuencias la tensión sea más elevada que lo que dicta la ley sencilla de la proporcionalidad.

Cuando la regulación necesaria para modificar la velocidad supera la frecuencia nominal (50 Hz), el flujo ha de disminuir, ya que la tensión no debe ser elevada para no sobrepasar las posibilidades dieléctricas del bobinado del motor. En este caso las curvas de par para frecuencias elevadas decrecen, por lo que habrá que verificar que los menores pares disponibles cumplen los requisitos de la máquina accionada a alta velocidad.

En general para el control del par electromagnético del accionamiento se emplean los siguientes métodos:

- Regular la tensión del estator en función de la frecuencia. (Control V/f).

- Regulación mediante la descomposición vectorial de la intensidad del estator sobre unos ejes orientados con el flujo magnético. (Control vectorial).

Control de la relación Tensión/Frecuencia.

Con este método la tensión de alimentación evoluciona proporcionalmente a la frecuencia. Cuando V/f es constante el motor funciona de forma aproximada con flujo constante en los regímenes permanentes.

Como hemos dicho anteriormente la proporcionalidad V/f desaparece en las bajas frecuencias, además la característica de la curva de par depende también de la frecuencia del rotor y de su temperatura, por lo que el dispositivo de control del convertidor ha de incluir las correspondientes correcciones.

En los convertidores con este tipo de control, uno de los parámetros más importante es la selección o ajuste de la curva V/f.

Algunos convertidores traen varias curvas ya ajustadas en su programación. Para seleccionar la curva adecuada se debe tener en cuenta las características de tensión y frecuencia del motor y la velocidad máxima a la que puede girar el rotor.

El control escalar es lo más utilizado debido a su simplicidad y debido al factor de que la gran mayoría de las aplicaciones no requiere alta precisión y/o rapidez en el control de la velocidad.

Control Vectorial.

El control vectorial posibilita un elevado grado de precisión y rapidez en el control del par y de la velocidad del motor.

El control descompone la corriente del motor en dos vectores: uno que produce el flujo de magnetización y otro que produce par, regulando separadamente el par y el flujo.

2.5. SELECCIÓN

Siempre que se habla de un Variador de Frecuencia, es importante la manera de hacer una correcta selección teniendo en cuenta algunas consideraciones, debiendo ser estudiado también el motor durante este proceso.

Debe tenerse en cuenta qué hace la máquina. Para efectos de selección de motor y de variador de velocidad, la gran mayoría de aplicaciones son consideradas como cargas de torque constante, mientras que sólo las bombas (de agua potable) y ventiladores son considerados como cargas de torque cuadrático, también definido coloquialmente como variable o parabólico.

En muchos procesos la limitación no es el variador, sino el motor, el sistema de transmisión o posiblemente el proceso mismo. Algunas cargas no soportarán el uso de variadores de velocidad en todo el rango de velocidad que el Variador de Frecuencia puede dar; en estos casos, es importante ver los detalles y tomar las precauciones adecuadas.

El rango de variación de velocidad definirá fundamentalmente el tipo de control que el Variador de Frecuencia aplicará al motor para controlar la velocidad. Cuanto más grande sea este rango, mayor cuidado deberá tenerse en el motor. Abajo del 50% de la velocidad nominal el motor estándar reduce su capacidad de refrigeración por disminuir el caudal de aire; si la carga asociada es estrictamente de torque constante, muy posiblemente se hará necesario dar al motor un medio de ventilación independiente de su eje. Abajo del 10% de la velocidad nominal, el torque producido por el conjunto variador-motor se ve reducido en variadores convencionales que solo ofrecen control escalar. Los Variadores de Frecuencia de tecnología más avanzada ofrecen control vectorial, mediante el cual el equipo sabe por cálculo o por medición directa la necesidad de torque dependiendo del requerimiento de la carga.

Con respecto a los datos nominales del motor, hay que tener en cuenta los siguientes parámetros:

- Potencia en kilovatios (kW) o en caballos de potencia (HP)
- Tensión nominal en voltios (V)
- Frecuencia nominal en ciclos por segundo (Hz)
- Corriente nominal en amperios (A)
- Velocidad nominal en revoluciones por minuto (rpm)

Debemos conocer los datos nominales de la red eléctrica. En nuestro caso la principal tensión en redes industriales en baja tensión es 220V/380V. Por la manera en que está construido un variador de velocidad no puede conectarse indistintamente en cualquier red.

Al igual que los motores eléctricos convencionales, los variadores de velocidad tienen un sistema de refrigeración que depende del aire de ventilación. De esta manera, las condiciones de altura sobre el nivel del mar y temperatura ambiente afectarán positiva o negativamente la refrigeración del variador. Usualmente deberá hacerse una disminución de potencia efectiva del equipo si se sobrepasan las condiciones de norma (1000 msnm y 40°C). También tenemos otros aspectos asociados como son las características propias del aire ambiente.

Cómo será controlado y monitoreado el equipo es otro punto muy importante a considerar. Dependiendo de cuántas órdenes queremos que el equipo reciba y ejecute y de cuántas variables sea necesario monitorear del equipo y del proceso, será considerada la cantidad de entradas/salidas (I/Os) del equipo.

Mediante las entradas digitales se da al Variador de Frecuencia órdenes tales como: habilitación general de funcionamiento, marcha/paro con selectores, marcha/paro con pulsadores, cambio de sentido de giro, marcha en velocidades predeterminadas, marcha en velocidad de prueba, entre otras.

Las entradas analógicas (señales de 0 a 10 V DC o de 0 a 20 mA DC) son usadas para dar referencia de velocidad al Variador de Frecuencia. Esta referencia puede provenir sencillamente de un potenciómetro como también de un PLC o directamente de un transductor de alguna variable de proceso: presión, caudal, nivel, temperatura, velocidad, etc.

Las salidas de relé o salidas digitales tienen el objetivo de visualizar el estado del Variador de Frecuencia así como ciertos eventos que se quiere visualizar. Las indicaciones que generalmente se pueden dar a través de estas salidas son convertidor listo, en marcha, con error, velocidad real igual a una velocidad predeterminada, velocidad real superior/inferior a una velocidad predeterminada.

Las salidas analógicas son proporcionales a ciertas variables del Variador de Frecuencia. Es posible dar indicación a mandos externos de los siguientes parámetros: corriente de

convertidor, velocidad de salida, tensión en el circuito intermedio, tensión aplicada a motor, potencia de salida, torque de salida, variable proporcional a la velocidad, etc.

2.6. SINAMICS G110

En este trabajo utilizamos el variador de velocidad monofásico con salida trifásica, modelo SINAMIC G110 permitiéndonos el control de la velocidad de un motor eléctrico asincrónico trifásico, por medio de la regulación de la frecuencia y tensión de alimentación suministrada al motor. Este es el método más eficiente en el manejo de la velocidad en procesos industriales.

Los variadores SINAMICS G110 son convertidores de frecuencia para regular la velocidad en motores trifásicos. Los diferentes modelos que suministra la marca Siemens cubren un margen de potencia de 120 W a 3,0 Kw en redes monofásicas.

Los convertidores están controlados por un microprocesador y utilizan tecnología IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor) de última generación. Esto los hace fiables y versátiles. Un método de modulación por ancho de pulsos con frecuencia de pulsación seleccionable permite un funcionamiento silencioso del motor.

Los valores de parámetros para el SINAMICS G110 se pueden modificar con el panel básico de operaciones BOP (Basic Operator Panel) o bien mediante la interface en serie universal (USS).

Existe en dos variantes:

- Variante analógica
- Variante USS Interface

Variante analógica

Está indicada para aplicaciones con un solo convertidor. Las órdenes y consignas se imparten con un interruptor externo y un potenciómetro utilizando las entradas digitales y la entrada analógica del SINAMICS G110.

Variante USS

Está indicada para aplicaciones con varios convertidores comunicados. Las órdenes y consignas se imparten usando la interface RS485 con protocolo USS. Se pueden operar varios SINAMICS G110 en el mismo bus.

Características principales del variador

- Fácil de instalar
- Puesta en marcha sencilla
- Puesta en servicio rápida
- Función "reposición a valores de fábrica"
- Diseño robusto en cuanto a EMC
- 1 entrada digital con separación galvánica
- 3 entradas digitales sin separación galvánica
- 1 entrada analógica AIN: 0 – 10 V se puede utilizar como cuarta entrada digital.
- Altas frecuencias de pulsación para funcionamiento silencioso del motor.
- BOP opcional con funcionalidad de copia de parámetros.

Instalación eléctrica

En la instalación se tiene que tomar en cuenta que los cables de alimentación y los del motor es necesario tenderlos separados de los cables de mando. No llevarlos a través del mismo conducto/canaleta.

Debido a los condensadores del circuito intermedio, las conexiones de los cables de red, del motor y del circuito intermedio conducen tensiones peligrosas aunque este desconectada la alimentación. Por ello debe esperarse cinco minutos para permitir que se descarguen los condensadores antes de comenzar cualquier trabajo de instalación en el equipo.

El convertidor debe ponerse siempre a tierra. Si el convertidor no está puesto a tierra correctamente se puede destruir, así como producirse altas tensiones peligrosas para las personas.

Modos de puesta en servicio

La puesta en servicio estándar para el convertidor se puede llevar a cabo con uno de los métodos que se indican a continuación:

- Usando el convertidor con los ajustes de fábrica, prescribiendo consignas y comandos por medio de entradas digitales y analógicas o por medio de la interface RS485.
- Usando el panel básico de operaciones BOP (Basic Operator Panel).

La puesta en servicio avanzada permite adaptar el SINAMICS G110 a aplicaciones específicas.

Panel De Operaciones Básico (BOP)

Cuando el ajuste de fábrica del convertidor no es adecuado a la aplicación, se puede modificar el ajuste y adaptar el convertidor a la aplicación requerida utilizando el BOP, el cual permite acceder directamente a los parámetros del SINAMICS G110.

Con el BOP se pueden ejecutar las siguientes funciones:

- › Modificación de valores de parámetros
- › Visualización de parámetros especiales
- › Transmisión de juegos de parámetros de un SINAMICS G110 a otro.

CAPÍTULO 3

ARMÓNICOS

3.1. DEFINICIÓN

El objetivo de este apartado es establecer una idea clara y precisa acerca de la naturaleza de los armónicos de corriente y tensión, los factores que los originan, sus efectos nocivos en las redes eléctricas y sobre el normal funcionamiento de los equipos terminales que se alimentan de ella, así como los límites de perturbación permitidos.

Los armónicos son fenómenos que causan problemas tanto para los usuarios como para la entidad encargada de la prestación del servicio de energía eléctrica ocasionando diversos efectos nocivos.

Cuando una carga eléctrica se conecta a una fuente alterna de suministro, absorbe corriente. Si esta corriente absorbida es senoidal, la carga se denomina lineal, pudiendo estar en fase con la tensión (carga resistiva), en adelanto (carga capacitiva) o en retraso (carga inductiva).

En otros tipos de carga, por el contrario, la corriente absorbida puede ser no senoidal, por lo que tendrá un cierto contenido de armónicos. Este tipo de cargas se denominan no lineales. Un ejemplo típico de carga no lineal es un rectificador, el cual utiliza diodos y/o tiristores para convertir la corriente alterna (AC) en corriente continua (DC). Los rectificadores pueden encontrarse en muchos dispositivos electrónicos de potencia, tales como la etapa de entrada de variadores de velocidad para motores, cargadores de baterías, sistemas de alimentación ininterrumpida, etc.

Se puede demostrar que cualquier forma de onda periódica (repetitiva) puede ser representada como una serie de ondas senoidales de diferentes frecuencias y fases, constituyendo el llamado espectro armónico de la onda. La frecuencia de la onda senoidal

predominante se denomina fundamental, y las frecuencias del resto de ondas (armónicos) son un múltiplo entero de ésta.

El análisis matemático que se utiliza para determinar el contenido armónico de una onda se denomina análisis de Fourier, en honor al matemático francés que investigó este fenómeno. Cuando más distorsionada sea una onda, comparada con la onda senoidal de 50 Hz, mayor será su contenido de armónicos.

Estos armónicos de corriente circulan por las redes de distribución, y teniendo en cuenta que estas redes tienen la impedancia propia de los cables y transformadores entre el generador y el consumo, se producen alteraciones en las formas de onda de tensión, a consecuencia de la caída de tensión provocada por los picos de corriente con formas de onda distorsionadas. De allí que si tenemos un consumo importante con alto contenido de armónicos al final de una línea, los consumos conectados sobre la misma, serán alimentados con tensiones que ya no tienen una forma senoidal, sino que será alimentado por tensiones cuya forma de onda dependen de los restantes consumos.

En las últimas décadas, ha sido muy importante la incorporación de cargas no lineales. Un gran porcentaje de la energía eléctrica pasa por un dispositivo de electrónica de potencia antes que esta sea finalmente aprovechada, generando así distorsión armónica primeramente en la corriente dentro de las instalaciones y posteriormente en el voltaje de suministro.

Este trabajo tiene por objeto analizar estos efectos y brindar soluciones sencillas tendientes a la disminución de los inconvenientes que estos aparatos pudieran causar teniendo en cuenta que en un futuro inmediato su uso será mucho más frecuente. Por tal motivo se pretende realizar el diseño e implementación de un limitador de armónicos del tipo bobina de línea, con el objetivo de atenuar las corrientes armónicas presentes para reducir la distorsión cumpliendo con las normativas vigentes.

3.2. INDICADORES DE LA DISTORSIÓN ARMÓNICA

La existencia de indicadores permite cuantificar y evaluar la distorsión armónica de las ondas de tensión y de corriente. Estos son:

- Factor de potencia
- Factor de cresta
- Valores rms de corriente y de tensión
- Potencia de distorsión
- Espectro de armónicos
- Tasa de distorsión armónica

FACTOR DE POTENCIA

El factor de potencia se define como la relación entre la potencia activa P y la potencia aparente S.

$$FP = \frac{P}{S}$$

En el área eléctrica, el factor de potencia es frecuentemente confundido con el Coseno phi ($\cos\varphi$), cuya definición es:

$$\cos\varphi_1 = \frac{P_1}{S_1}$$

P1=Potencia activa de la componente fundamental.

S1=Potencia aparente de la componente fundamental.

Por tanto, el coseno phi se refiere unicamente a la frecuencia fundamental, y, en presencia de armónicos, es diferente del factor de potencia FP.

Una primera indicación de la presencia significativa de armónicos es cuando el factor de potencia medido es diferente del coseno phi. El factor de potencia será inferior al coseno phi.

FACTOR DE CRESTA

Se define como la relación entre el valor de cresta de corriente o de tensión y el valor eficaz.

$$k_i = \frac{I_{m\acute{a}x.}}{I_{RMS}} \quad ; \quad k_v = \frac{V_{m\acute{a}x.}}{V_{RMS}}$$

Para una señal senoidal el factor de cresta es igual a $\sqrt{2}$, para una señal no senoidal el factor de cresta puede tener un valor superior o inferior. Este factor es particularmente útil para detectar la presencia de valores de cresta excepcionales con respecto al valor eficaz.

El factor de cresta típico de corrientes absorbidas por cargas no lineales es mucho mayor que $\sqrt{2}$, puede tomar valores iguales a 1,5 o 2, incluso mayores en casos críticos.

Un factor de cresta muy elevado implica sobreintensidades puntuales importantes. Estas sobreintensidades, detectadas por los dispositivos de protección, pueden ser el origen de desconexiones indeseadas.

VALORES RMS DE CORRIENTE Y DE TENSIÓN

El valor rms de la tensión y la intensidad se puede calcular como una función del valor de rms de los diferentes ordenes de armónicos.

$$I_{rms} = \sqrt{\sum_{h=1}^{\infty} I_h^2}$$
$$V_{rms} = \sqrt{\sum_{h=1}^{\infty} V_h^2}$$

I_{rms} : Verdadero valor eficaz de corriente.

V_{rms} : Verdadero valor eficaz de tensión.

I_h : Verdadero valor eficaz de orden armónico h de corriente.

V_h : Verdadero valor eficaz de orden armónico h de tensión.

POTENCIA ACTIVA

La potencia activa P de una señal distorsionada por armónicos es la suma de las potencias activas correspondientes a las tensiones e intensidades del mismo orden.

$$P = \sum_{h=1}^{\infty} V_h I_h \cos \varphi_h$$

Siendo φ_h el desfase entre la tensión y la intensidad del armónico de orden h .

POTENCIA REACTIVA

La potencia reactiva se define igualmente como la suma de las potencias reactivas correspondientes a las tensiones e intensidades del mismo orden, y viene dada por la ecuación:

$$Q = \sum_{h=1}^{\infty} V_h I_h \sin \varphi_h$$

POTENCIA DE DISTORSIÓN

Consideramos la potencia aparente S:

$$S = V_{rms} \cdot I_{rms}$$

En presencia de armónicos, se puede reescribir la ecuación como:

$$S^2 = \left[\sum_{h=1}^{\infty} V_h I_h \cos \varphi_h \right]^2 + \left[\sum_{h=1}^{\infty} V_h I_h \sin \varphi_h \right]^2 + D^2$$

Como consecuencia, en presencia de armónicos, la relación $S^2 = P^2 + Q^2$ no es válida. Se define la potencia de distorsión D de tal forma que $S^2 = P^2 + Q^2 + D^2$. Luego,

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2 + D^2}$$

ESPECTRO DE ARMÓNICOS

Al representar la amplitud de cada orden armónico con respecto a su frecuencia, es posible obtener un gráfico denominado espectro de armónicos.

TASAS DE DISTORSIÓN ARMÓNICA

Si tenemos en cuenta la presencia de voltajes y corrientes armónicas en el sistema eléctrico, entonces estas señales se pueden representar por:

$$v(t) = V_1 \cos(\omega_0 t + \theta_1) + V_2 \cos(2. \omega_0 t + \theta_2) + V_3 \cos(3. \omega_0 t + \theta_3) + \dots$$

$$i(t) = I_1 \cos(\omega_0 t + \theta_1) + I_2 \cos(2. \omega_0 t + \theta_2) + I_3 \cos(3. \omega_0 t + \theta_3) + \dots$$

Puede escribirse en forma compacta como:

$$v(t) = \sum_{n=1}^k V_n \cdot \cos(n\omega_0 t + \theta_n)$$

$$i(t) = \sum_{n=1}^k I_n \cdot \cos(n\omega_0 t + \theta_n)$$

Donde:

V_n : armónica de voltaje de orden n .

I_n : armónica de corriente de orden n .

Los valores de distorsión están definidos en porcentaje (%) de cantidades eléctricas. Estos valores son muy utilizados para conocer el grado de contaminación de las redes eléctricas.

DISTORSIÓN ARMÓNICA TOTAL

THD corresponde a Distorsión Total Armónica (tasa de distorsión armónica global). La tasa de distorsión armónica es frecuentemente utilizada para definir la importancia del contenido armónico de una señal alterna.

Para una señal $y(t)$, la tasa de distorsión armónica está definida por la ecuación:

$$THD = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} y_h^2}}{y_1} * 100\%$$

Cuando se trata con armónicos de tensión, la expresión se convierte en:

$$THD_V = \frac{\sqrt{V_2^2 + V_3^2 + V_4^2 + \dots}}{V_1} * 100\%$$

Cuando se trata con armónicos de intensidad, la expresión se convierte en:

$$THD_I = \frac{\sqrt{I_2^2 + I_3^2 + I_4^2 + \dots}}{I_1} * 100\%$$

Cuando se conoce el valor eficaz total se tiene una ecuación equivalente, más directa y fácil de utilizar.

$$THD_I = \sqrt{\left(\frac{I_{RMS}}{I_1}\right)^2 - 1} * 100\%$$

Para armónicas individuales:

$$THD_n = \frac{V_n}{V_1} * 100\%$$

DISTORSIÓN TOTAL DE DEMANDA

Es la relación entre la corriente armónica y la **demanda** máxima de la corriente de carga.

$$TDD = \frac{\sqrt{I_2^2 + I_3^2 + I_4^2 + \dots}}{I_{dem\ max}} * 100\%$$

Cuando se efectúan mediciones relacionadas con armónicas en los sistemas eléctricos, es común encontrar niveles de THD altos en condiciones de baja carga que no afectan la operación de los equipos ya que la energía distorsionante que fluye es también baja. Para evaluar adecuadamente estas condiciones se define el TDD.

3.3. ESTÁNDARES EN ARMÓNICOS

Existen normas que limitan la distorsión armónica máxima en un punto de acoplamiento común. Si la distorsión resultante es superior a la autorizada, deben adoptarse las medidas oportunas para reducir el contenido de armónicos.

Si bien en nuestro país prácticamente no se aplica ninguna penalización a un consumidor que genera armónicos en las redes, (ya que no se estila colocar instrumentos que midan este parámetro) en otros países donde es habitual medir la calidad de la energía, se penaliza a los consumidores cuyos consumos contienen más de un determinado valor de THD en la onda de corriente, y de igual manera las compañías distribuidoras son penalizadas si su onda de tensión excede cierto valor de THD.

El principal objetivo de las normas es proveer una guía común a todas las partes involucradas con el fin de asegurar la compatibilidad entre los equipos de uso final y los sistemas de distribución de energía eléctrica.

Analizaremos a continuación las principales normas que gobiernan los límites de armónicos.

- IEEE 519 (2014) – “Práctica Recomendada y Requisitos para el Control Armónico en Sistemas de Energía Eléctrica”.

- IEC 61000:

-IEC 61000-2-2 (1993) - EMC Parte 2. Ambiente. Sección 2: Niveles de compatibilidad para perturbaciones dirigidas de baja frecuencia y señalización en sistemas públicos de alimentación de Baja Tensión.

-IEC 61000-3-2 (2004) - EMC Parte 3: Límites. Sección 2: Límites para emisiones de corrientes armónicas (Equipos con entrada de corriente inferior a 16A por fase).

-IEC 61000-3-4 (1998) - EMC Parte 3: Límites. Sección 4: Limitación de emisión de corrientes armónicas en sistemas de alimentación de energía de Baja Tensión para equipos con rango de corriente mayor que 16 A.

IEEE STANDARD 519-2014

Esta norma busca limitar la inyección de armónicos por parte de los usuarios de manera que no creen voltajes inaceptables de distorsión bajo las características normales del sistema y limitar la distorsión armónica total de voltaje proporcionado por el proveedor. Los límites de distorsión de voltaje y corriente deben usarse como valores de diseño de los sistemas eléctricos para el peor de los casos en condiciones de operación normales que duran más de 1 hora. Para periodos más cortos los límites pueden ser excedidos.

Este estándar divide la responsabilidad de limitar las armónicas entre los usuarios finales y las empresas de distribución. Los usuarios finales serán responsables de limitar las inyecciones de corrientes armónicas, mientras que los proveedores serán principalmente responsables de limitar la distorsión de voltaje en la red de distribución.

Los límites de corriente y voltaje armónicos para este estándar son analizados en el Punto de acoplamiento común (PCC). Este es el punto donde otros clientes comparten la misma red o donde pueden conectarse nuevos clientes en el futuro. La norma asigna límites de la inyección de corriente basados en el tamaño de la carga con respecto al tamaño del sistema de potencia, el mismo que está definido por su capacidad de cortocircuito. La relación de cortocircuito está definida como la proporción de corriente de cortocircuito máximo en el PCC para la máxima demanda de corriente de carga en este punto.

La base para limitar las inyecciones armónicas de los clientes individuales es evitar niveles inaceptables de distorsiones de voltaje. Por eso los límites de corriente se establecen de tal manera que las inyecciones armónicas totales para cada cliente individual no excedan la distorsión de voltaje máxima.

Los límites de corrientes armónicas en el PCC son establecidos para limitar voltajes individuales de distorsión y distorsiones totales de voltaje THDv a los valores mostrados en Tabla 3.1.

Table 1—Voltage distortion limits

Bus voltage V at PCC	Individual harmonic (%)	Total harmonic distortion THD (%)
$V \leq 1.0$ kV	5.0	8.0
1 kV $< V \leq 69$ kV	3.0	5.0
69 kV $< V < 161$ kV	1.5	2.5
161 kV $< V$	1.0	1.5 ^a

^aHigh-voltage systems can have up to 2.0% THD where the cause is an HVDC terminal whose effects will have attenuated at points in the network where future users may be connected.

Tabla 3.1: Límites de voltaje de distorsión armónica individual y total.

Puesto que de la distorsión de voltaje depende la impedancia del sistema, la clave de controlar la distorsión de voltaje es controlar la impedancia. Dos condiciones principales que producen una impedancia alta son cuando el sistema es demasiado débil para alimentar la carga adecuadamente o cuando el sistema está en resonancia, el último es el más común. Por consiguiente, si se mantiene el voltaje de distorsión en valores reducidos aseguramos que el sistema se mantenga fuera de resonancia.

Table 2—Current distortion limits for systems rated 120 V through 69 kV

Maximum harmonic current distortion in percent of I_L						
Individual harmonic order (odd harmonics) ^{a, b}						
I_{sc}/I_L	$3 \leq h < 11$	$11 \leq h < 17$	$17 \leq h < 23$	$23 \leq h < 35$	$35 \leq h \leq 50$	TDD
$< 20^c$	4.0	2.0	1.5	0.6	0.3	5.0
$20 < 50$	7.0	3.5	2.5	1.0	0.5	8.0
$50 < 100$	10.0	4.5	4.0	1.5	0.7	12.0
$100 < 1000$	12.0	5.5	5.0	2.0	1.0	15.0
> 1000	15.0	7.0	6.0	2.5	1.4	20.0

^aEven harmonics are limited to 25% of the odd harmonic limits above.

^bCurrent distortions that result in a dc offset, e.g., half-wave converters, are not allowed.

^cAll power generation equipment is limited to these values of current distortion, regardless of actual I_{sc}/I_L .

where

I_{sc} = maximum short-circuit current at PCC

I_L = maximum demand load current (fundamental frequency component)
at the PCC under normal load operating conditions

Tabla 3.2: Límites de corriente de distorsión armónica individual y total.

Luego de leer e interpretar esta norma, podemos sintetizar que su aplicación no es adecuada para el propósito que tiene el presente estudio. Esta norma aplica a una instalación determinada, en este caso sería la de toda la facultad, y deberíamos hacer el estudio en el PCC el cual es un punto más cercano a la posible alimentación a otro usuario por parte del operador. Un estudio de este tipo analizaría las distorsiones generadas por todos los equipos que forman parte de la instalación, y no sólo las generadas por el variador de velocidad que se está analizando. Por otro lado los límites de las componentes armónicas de corriente están dados en función de la corriente de carga I_L , como un porcentaje de la misma. Además debe conocerse la corriente de cortocircuito I_{cc} .

NORMAS DE IEC PARA ARMÓNICOS

La Comisión Electrotécnica Internacional (IEC), define una categoría de normas de compatibilidad electromagnéticas (EMC) que tratan problemas de la calidad de la energía eléctrica. El término "compatibilidad electromagnética" incluye las preocupaciones tanto para interferencias radiadas como para interferencias conducidas en equipos terminales. Las normas de IEC están divididas en seis partes:

Parte 1: General. Estas normas tratan consideraciones generales como introducción, principios fundamentales, razón, definiciones y terminologías. También pueden describir la aplicación e interpretación de definiciones fundamentales y condiciones. Su número de designación es IEC 61000-1-x.

Parte 2: Ambiente. Estas normas definen las características del ambiente en donde funcionará el equipo, la clasificación de tal ambiente y sus niveles de compatibilidad. Su número de designación es IEC 61000-2-x.

Parte 3: Límites. Estas normas definen los niveles permisibles de emisiones que pueden ser generadas por el equipo conectado en el ambiente. Esta establece límites numéricos de emisión y también límites de inmunidad. Su número de designación es IEC 61000-3-x.

Parte 4: Técnicas de prueba y medida. Estas normas proporcionan pautas para el equipo de medida y procedimientos de prueba para asegurar la conformidad con otras partes de las normas. Su número de designación es IEC 61000-4-x.

Parte 5: Instalación y formas de mitigación. Estas normas proporcionan las pautas en aplicación de equipo como aterramiento y cableado de sistemas eléctricos y electrónicos para asegurar la compatibilidad electromagnética entre aparatos o sistemas eléctricos y electrónicos. Se designan con IEC 61000-5-x.

Parte 6: Misceláneos. Estas son las normas genéricas de definición de inmunidad y niveles de emisiones requeridas para equipos en categorías generales o para tipos de equipos específicos. Se designan con el número IEC 61000-6-x.

Al contrario de las normas IEEE para armónicos en donde hay una sola publicación que cubre todos los problemas relacionados a este tema, las normas IEC para armónicos están separadas en varias publicaciones.

Hay estándares que tratan acerca de los ambientes y límites que por ser muy extensos están separados, basados en los niveles de voltaje y corriente.

Las normas IEC relacionadas a las armónicas generalmente recaen en las partes 2 y 3. Estas normas son las mostradas a continuación:

IEC 61000-2-2: EMC Parte 2. Ambiente. Sección 2: Niveles de compatibilidad para perturbaciones dirigidas de baja frecuencia y señalización en sistemas públicos de alimentación de Baja Tensión.

IEC 61000-3-2: EMC Parte 3: Límites. Sección 2: Límites para emisiones de corrientes armónicas (Equipos con entrada de corriente inferior a 16A por fase).

IEC 61000-3-4: EMC Parte 3: Límites. Sección 4: Limitación de emisión de corrientes armónicas en sistemas de alimentación de energía de Baja Tensión para equipos con rango de corriente mayor que 16 A.

IEC 61000-2-2

IEC 61000-2-2 define niveles de compatibilidad para perturbaciones conducidas de baja frecuencia y señalización en redes de suministro eléctrico de Baja Tensión como sistemas monofásicos y trifásicos a 50 o 60 Hz con voltajes nominales de hasta 240 y 415 V, respectivamente. Estos niveles no son rígidos y puede excederse en algunas condiciones excepcionales. Los niveles de compatibilidad para voltajes armónicos individuales en redes de Baja Tensión son mostrados en la Tabla 3.3. Estos son determinados en porcentaje del voltaje fundamental.

No múltiplos de 3		Múltiplos de 3			
Orden impar h	Voltaje armónico (%)	Orden impar h	Voltaje armónico (%)	Orden par h	Voltaje armónico (%)
5	6	3	5	2	2
7	5	9	1,5	4	1
11	3,5	15	0,3	6	0,5
13	3	21	0,2	8	0,5
17	2	>21	0,2	10	0,2
19	1,5			12	0,2
23	1,5			>12	0,2
25	1,5				
>25	0,2+1,3*25/h				

Se considera que en el THD de la tensión de alimentación de considera que los componentes armónicos mayores a 40th son menores al 8%

Tabla 3.3: Niveles de compatibilidad para voltajes armónicos individuales en la red pública de Baja Tensión según IEC 61000-2-2.

IEC 61000-3-2 e IEC 61000-3-4

Estas normas definen límites de emisión de corrientes armónicas para equipos de corrientes de entrada de hasta 16 A y mayores a 16A por fase, respectivamente. Están destinadas a limitar las emisiones de armónicos para los equipos conectados a la red pública de Baja Tensión, de manera que conforme con los límites seguros de voltaje en la red pública satisfaga los límites de compatibilidad definidos en IEC 61000-2-2.

La IEC exige en su estándar IEC 61000-3-2 que los fabricantes limiten el consumo de armónicos de corriente de sus productos. Este estándar se aplica a todas las cargas monofásicas y trifásicas de menos de 16 A por fase.

La estándar IEC 61000-3-2 clasifica los equipos en cuatro categorías:

- Clase A: Equipos trifásicos balanceados y todos los demás equipos no pertenecientes a las clases B, C y D.
- Clase B: Herramientas portátiles.
- Clase C: Equipos de iluminación incluyendo dispositivos de atenuación (dimmer).
- Clase D: Equipo con entrada de corriente con "forma de onda especial" y con consumo de potencia activa menor de 600 W.

Los límites de corrientes armónicas acordes a IEC 61000-3-2 para equipos de Clase A se muestran en la siguiente tabla.

Table 1 – Limits for Class A equipment

Harmonic order n	Maximum permissible harmonic current A
Odd harmonics	
3	2,30
5	1,14
7	0,77
9	0,40
11	0,33
13	0,21
$15 \leq n \leq 39$	$0,15 \frac{15}{n}$
Even harmonics	
2	1,08
4	0,43
6	0,30
$8 \leq n \leq 40$	$0,23 \frac{8}{n}$

Tabla 3.4: Límites de corrientes armónicas para equipos de Clase A.

La norma proporciona niveles de compatibilidad. Se refiere a un nivel donde la afinidad entre el equipo y su ambiente se logra. El nivel de compatibilidad es normalmente establecido empíricamente para que un equipo sea compatible con su ambiente la mayoría del tiempo. Los niveles de compatibilidad generalmente son basados en el 95% del nivel de probabilidad, por ejemplo, para que el 95% del tiempo la compatibilidad se pueda lograr.

Por otro lado se tiene lo que se conoce como los niveles de planificación, que son criterios del plan o niveles especificados por la compañía de suministro. Los niveles de planificación son más severos que los niveles de compatibilidad. Así, sus niveles son más bajos que los niveles de compatibilidad.

3.4. EFECTOS DE LAS CORRIENTES ARMÓNICAS

El primer efecto de los armónicos de la corriente es el incremento del valor RMS de esta corriente. Para cargas monofásicas conectadas a una red trifásica con neutro, esto repercutirá en un aumento de la corriente eficaz que circula por el neutro, de manera que será necesario sobredimensionar este conductor.

En las redes de distribución trifásicas con cargas con bajo contenido de armónicos, el equilibrio entre las corrientes de fases disminuye la corriente por los neutros, al punto que habitualmente la sección de los conductores de neutro es menor que la sección de los conductores de las fases. En consumos con alto tenor de armónicos, las corrientes por el neutro no se cancelan mutuamente sino que, de acuerdo al armónico que se analice, pueden sumarse, incrementando notablemente la corriente sobre dicho conductor.

También, el elevado contenido de armónicos puede generar excesivas corrientes en capacitores utilizados en las redes para mejorar el factor de potencia, observándose hasta fenómenos de resonancias, con excesivas corrientes, sobretensiones y daños sobre dichos componentes. Presentan sobre temperatura y en casos más severos riesgo de explosión debido a la rotura del dieléctrico.

Los armónicos pueden causar sobrecalentamiento en conductores afectando su nivel de aislamiento. En los devanados de los motores se puede originar incrementos de temperatura generando ruido y oscilaciones de torque en el rotor lo cual puede conducir a resonancias y vibraciones mecánicas.

Las pantallas electrónicas y la iluminación sufren intermitencias, interruptores automáticos pueden dispararse, fallo en computadores y falsas lecturas de medidores.

Otro efecto es la distorsión de la onda de tensión de entrada. Cuantificar esta distorsión no es fácil ya que se requiere conocer las impedancias del transformador y de la línea de distribución. La distorsión de la tensión ocasionada por una onda de corriente distorsionada está en función de las impedancias del circuito.

En la gran mayoría de los casos cuando un transformador alimenta cargas no lineales, este transformador presenta sobrecalentamiento aun cuando no ha alcanzado su potencia nominal.

Se estima que el calentamiento de los transformadores debido a las armónicas es directamente proporcional al cuadrado de la armónica multiplicado por las pérdidas que esta produce; de esta manera aparece un factor K aplicado a transformadores.

Este factor K viene especificado en los datos de placa de algunos transformadores, indicando la capacidad del transformador para alimentar cargas no lineales sin exceder la temperatura de operación a la cual están diseñados.

$$\text{Factor } K_{IEEE} = \sum_{h=1}^{\infty} \left(\frac{I_h}{I_{RMS}} \right)^2 h^2$$

Los factores más comunes de transformadores son K=4 y K=13, los cuales son utilizados para alimentar cargas que utilizan rectificación principalmente.

Para la definición de IEEE el factor k sirve para calcular las pérdidas adicionales en un transformador con cargas no lineales denominadas P_{EC-R} , pero en el caso de transformadores en aceite también se especifica otras pérdidas adicionales:

$$P_{OSL} = P_{OSL-R} \sum_{h=1}^{h_{m\acute{a}x}} \left(\frac{I_h}{I_R} \right)^2 h^{0,8}$$

Existe otra definición dada por la IEC:

$$\text{Factor } K_{IEC} = \left[1 + \frac{e}{1+e} * \left(\frac{I_1}{I} \right)^2 * \sum_{h=2}^{h=N} \left(h^q * \left(\frac{I_h}{I_1} \right)^2 \right) \right]^{0,5}$$

I_h : Valor de la corriente del h-ésimo armónico.

I_1 : Valor de la corriente fundamental.

q : Constante exponencial que depende del tipo de arrollamiento y de la frecuencia. Los valores típicos son 1,7 para transformadores con conductores de sección circular o rectangular en ambos arrollamientos y 1,5 para transformadores con arrollamientos de conductor de lámina en baja tensión.

e : Cociente de las pérdidas por corrientes parásitas divididas por las pérdidas óhmicas, ambas a la temperatura de referencia.

h : Orden armónico.

I : Valor eficaz de la corriente sinusoidal conteniendo todos los armónicos.

3.5. REPERCUSIÓN DE LA DISTORSIÓN DE LA TENSIÓN SOBRE EL SISTEMA DE DISTRIBUCIÓN

La deformación de la onda de tensión puede ocasionar efectos importantes.

En primer lugar, pueden verse afectadas aquellas cargas que necesitan la amplitud correcta de la tensión para funcionar. Por ejemplo, puede verse afectada la alimentación monofásica de ordenadores y otros dispositivos de bajo consumo.

Esta distorsión de la tensión puede incrementar las pérdidas en motores y otros dispositivos magnéticos.

Así mismo, la impedancia de los condensadores para la corrección del factor de potencia disminuye a medida que aumenta la frecuencia. Como la tensión distorsionada contiene armónicos a frecuencias que son múltiplos de la fundamental, la corriente puede ser mayor de la esperada, lo que sobrecarga los condensadores, produciendo sobrecalentamientos e incluso puede llegar a destruirlos.

En las redes de distribución, pueden producirse fenómenos no deseados de resonancia entre sistemas capacitivos e inductivos. Por ejemplo, se puede producir este fenómeno entre las inductancias de la red (inductancias de fuga de transformadores y de las propias líneas) y los condensadores para la corrección del factor de potencia. Si la frecuencia de resonancia coincide con alguna de las frecuencias armónicas, puede darse este fenómeno, ocasionando un incremento de la corriente a esa frecuencia, lo que a su vez aumenta la distorsión de la tensión y sobrecarga los condensadores y el sistema de distribución. El efecto de resonancia puede ser en serie o en paralelo.

Luego, pueden sintetizarse los efectos generados por los armónicos como sigue:

- Fallos y avería en equipos electrónicos.
- Sobrecalentamiento y avería en transformadores y cables.
- Sobrecarga y avería en baterías de condensadores.
- Bajo aprovechamiento de transformadores y cables de la propia instalación.
- Disparo de protecciones sin causa aparente.
- Sobrecarga y averías en motores.
- Mal funcionamiento y paradas extrañas en máquinas.

3.6. ELIMINACIÓN DE LOS ARMÓNICOS

Para eliminar la influencia de los armónicos el método más idóneo es corregirlos en los sitios donde se originan. Fuentes de alimentación, cargadores de baterías, balastos electrónicos y electrodomésticos con adecuados filtros evitarán corrientes con alto tenor de armónicos en las redes.

Como mencionamos más arriba, un alto contenido de armónico en la onda de corriente genera una distorsión en la onda de tensión, que puede afectar a otros consumos conectados sobre la misma línea de distribución.

Cuando la existencia de una elevada THD no puede evitarse en los consumos, existen elementos que nos permiten disminuir su influencia. Así, pueden colocarse inductores en serie con las líneas, filtros pasivos con inductores y capacitores resonantes a las frecuencias que se desean eliminar; mientras que la colocación de transformadores trifásicos de relación 1:1 con el primario o el secundario conectado en triángulo permitirán anular principalmente la 3° armónica y sus múltiplos.

La industria suministra en la actualidad también filtros activos, construidos con combinaciones de inductores y capacitores y componentes como transistores, tiristores y triacs que conectan o desconectan en distintos momentos a los componentes pasivos, generando una onda de corriente cuya forma es opuesta a la onda distorsionada de la carga, anulando sus efectos.

La incorporación de cualquier forma de corrección de armónicos requiere un estudio minucioso, analizando el comportamiento de las redes en distintas condiciones de cargas, y eligiendo el método que brinde la corrección necesaria con un costo aceptable.

Un filtro en general puede actuar de una de las siguientes formas:

- Introducir una alta impedancia en serie para bloquear el paso de las corrientes armónicas.
- Derivar a tierra las corrientes armónicas a través de caminos de baja impedancia.
- Inyectar armónicos en oposición de fase a los presentes en la red para cancelarlos.

El enfoque de este trabajo presenta principal interés en los llamados reactores de línea, que actúan introduciendo una alta impedancia en serie para bloquear el paso de las corrientes armónicas.

3.7. EVALUACIÓN DE COSTOS

Existen muchas soluciones para mitigar la distorsión armónica. A la hora de evaluar la mejor solución para una aplicación determinada, debemos considerar que el costo de la misma también involucra la instalación y mantenimiento.

Las perturbaciones generadas por los armónicos se traducen en costos que difícilmente podemos apreciar o valorar. Estos costos podemos diferenciarlos como:

Costos Técnicos

Los costos técnicos son todos aquellos que comportan una pérdida de rendimiento de la instalación. Es decir: pérdida de capacidad en líneas de distribución de energía, sobrecarga de transformadores, sobrecarga de conductores, caídas de tensión, desclasificación de los transformadores, pérdidas por efecto Joule en líneas y máquinas, pérdidas magnéticas en máquinas eléctricas.

Normalmente, todos los costos técnicos derivan en costos económicos.

Costos Económicos

Son aquellos que podemos cuantificar económicamente, aunque en algunos casos puede ser difícil. Estos costos generalmente se manifiestan en:

- Un mayor consumo eléctrico, recargo o pago de energía reactiva.
- Pérdidas de distribución, pérdidas de potencia y energía, ampliación de instalaciones, paradas de procesos productivos.

CAPÍTULO 4

REACTOR DE LÍNEA

4.1. CONCEPTO Y CARACTERÍSTICAS DEL REACTOR DE LÍNEA

La bobina o reactor de línea es en principio un componente muy simple y puede presentarse en la práctica en dos configuraciones básicas: como un arrollamiento de hilo conductor al aire, es decir, sin núcleo, o bien como un arrollamiento devanado sobre un núcleo ferromagnético. Este último a su vez puede estar formado por un paquete de láminas o bien por un bloque de material macizo. Cuando se desea aumentar la inductancia de una bobina sin hacer crecer el número de las espiras, o bien cuando es necesario concentrar mucha inductancia en poco espacio, es preciso usar núcleo de material ferromagnético.

La magnitud característica de una bobina es la inductancia; a menudo se habla del elemento en sí como una inductancia cuando debería aplicarse este término a la magnitud específica de aquel.

La inductancia se indica con el símbolo L y se mide en Henrios (H) o en sus submúltiplos (mH, μ H, pH).

El valor de inductancia define la oposición que el elemento presenta al paso de la corriente alterna. No se trata, sin embargo, de una oposición indiscriminada, sino de un filtrado selectivo en función de la frecuencia. La bobina actúa como un filtro pasa-bajo: atenúa las ondas de frecuencia de valor por encima de un cierto umbral, determinado por el valor de la inductancia. En un circuito dado, si el valor de la inductancia es bajo, será alta la frecuencia de corte; es decir, este componente recorta menos frecuencias altas y deja pasar más frecuencias bajas. Si el valor de la inductancia es alto, será baja la frecuencia de corte, la bobina corta más frecuencias altas y deja pasar menos frecuencias bajas.

4.1.1. FACTOR DE CALIDAD

Junto con el valor de la inductancia existe otra característica de la bobina que es necesario conocer. El hilo de cobre de la bobina presenta una resistencia a la corriente continua CC determinada por su diámetro y su longitud. La relación entre la reactancia a la corriente alterna CA con la resistencia a la CC se conoce como factor de calidad, o factor Q.

Más adelante se observa como varía el comportamiento de una bobina con la variación de este factor Q.

4.2. EL REACTOR DE LÍNEA Y LOS ARMÓNICOS

La función principal de los reactores de línea es reducir las corrientes armónicas. Este se añade en serie y aguas arriba a la carga no lineal.

La reactancia inductiva de reactores de línea permiten que la corriente a 50 Hz pase fácilmente a través de ellos, pero presenta una impedancia mayor para las frecuencias armónicas. De esta forma, las corrientes armónicas son atenuadas por la reactancia inductiva de la bobina.

En el caso de este proyecto integrador, conocemos la carga no lineal que debe estudiarse y contamos con la inductancia de línea recomendada por el fabricante de dicha carga, con lo cual se puede obtener un valor aproximado de inductancia de la bobina de línea.

El criterio adoptado para definir el valor de inductancia (L) necesario de la bobina de línea, tiene que ver con las siguientes cuestiones: desde el punto de vista de la mitigación del contenido armónico de un circuito, mientras más elevado sea el valor de inductancia (L) de la bobina de línea, la frecuencia de corte será cada vez más baja y la mitigación del contenido armónico será más eficiente. Por otro lado, partiendo de la base de que una bobina de línea es una impedancia que se agregará al circuito alimentador en serie, la misma ocasionará una caída de tensión aguas arriba de la carga. Por lo tanto, esta caída de tensión será una condición limitante en el valor adoptado de inductancia (L) de la bobina.

El reactor de línea es un componente inductivo que se identifica y dimensiona por la relación de su impedancia reactiva con respecto a la impedancia del circuito aplicado. El

porcentaje de impedancia (% Z) del reactor de línea es también un indicador de la caída de tensión producida en el mismo durante la circulación de la corriente de carga.

A continuación se expresa matemáticamente esta relación.

$$\%Z = \frac{Z_{reactor}}{Z_{línea-neutro}} * 100$$

$$Z_{reactor} = \sqrt{R^2 + (2 * \pi * f * L)^2}$$

Se puede considerar despreciable la resistencia del reactor de línea, por lo tanto:

$$Z_{reactor} \approx X_{reactor} = 2 * \pi * f * L$$

$$Z_{línea-neutro} = \frac{V_{L-L}}{I * \sqrt{3}}$$

$$\%Z = \frac{2 * \pi * f * L}{\frac{V_{L-L}}{I * \sqrt{3}}} * 100$$

$$\%Z = \frac{2 * \pi * f * L * I * \sqrt{3}}{V_{L-L}} * 100$$

$$L = \frac{\%Z * V_{L-L}}{2 * \pi * f * I * \sqrt{3} * 100}$$

Cálculo de Inductancia del Reactor de Línea	
	Valor
f [Hz] =	50
I _n [A] =	8,1
V _F [V] =	220
Z _{sist.} [Ω] =	27,16
Z _L % =	4,56
L [mH] =	3,94
X _L [Ω] =	1,24
R _L [Ω] =	0,01
Z _L [Ω] =	1,24
5% > ΔV % =	4,56

Tabla 4.1: Cálculo de inductancia del Reactor de línea.

Queda definido así, como se muestra en la tabla anterior, el valor de inductancia a obtener constructivamente en el reactor de línea que se diseña. Se debe procurar obtener un valor menor o igual a la inductancia calculada para que la impedancia del reactor no provoque una caída de tensión superior al 5% del valor nominal de tensión.

Además del criterio anteriormente considerado, fueron realizadas mediciones a la inductancia de línea Siemens, con las cuales se obtuvo un valor aproximado de inductancia (L), que proporciona un valor útil para validar y/o contrastar las características de la bobina de línea diseñada. Las mediciones son descriptas más adelante.

Debido a las imprecisiones en ciertos datos de partida para el cálculo de la bobina, se consideró realizar un diseño de bobina con diferentes derivaciones consiguiendo de esta manera mayor versatilidad y la posibilidad de realizar pruebas con el respectivo análisis de resultados.

4.3. MEDICIÓN DE INDUCTANCIA

Método: Resonancia de circuito RLC

Para realizar el diseño de la bobina o inductancia de línea que se agrega al circuito, se tomó como referencia el valor medido de la inductancia Siemens indicada por el fabricante para el variador de velocidad utilizado, además de aplicar el criterio de diseño desarrollado en la sección anterior.

Esta medición se realizó aplicando el fenómeno de resonancia serie de un circuito RLC, con una resistencia patrón de valor conocido, un capacitor de capacidad conocida (verificada además midiendo su valor), el reactor de línea, un generador de señal y un osciloscopio.

En condiciones ideales, se supone que la resistencia del alambre de la bobina es despreciable ($R_L = 0$), y que la resistencia del dieléctrico del condensador es infinita, es decir, a corriente continua la bobina se comporta como un corto circuito y el condensador como un circuito abierto. En condiciones reales, es necesario tener en cuenta la resistencia en serie de la bobina " R_L " que se sumará a la resistencia variable de valor conocido " r " ($R = r + R_L$). El circuito en serie tiene la forma mostrada en la figura siguiente.

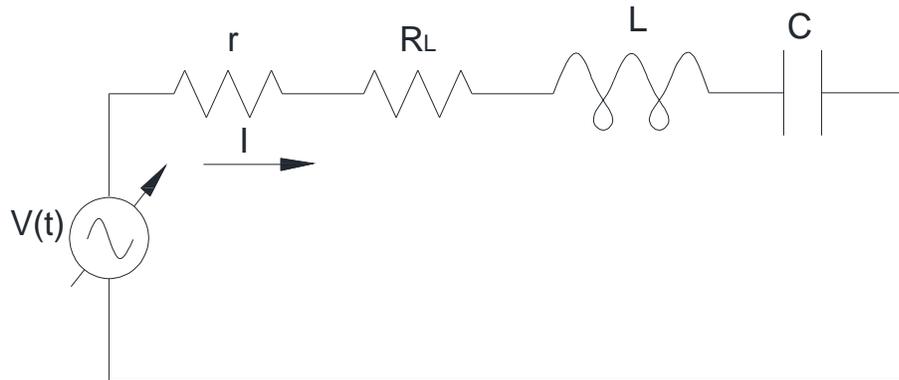


Figura 4.1: Circuito RLC serie.

A corriente alterna, de frecuencia angular $\omega = 2\pi f$ (f es la frecuencia en Hz), tanto la bobina como el condensador presentan una reactancia, dada por:

$$X_L = \omega L$$

$$X_C = \frac{1}{\omega C}$$

Si la resistencia interna de la bobina es r y la del condensador es muy grande, la impedancia del circuito es:

$$Z_{circ.} = R + jX = r + j\left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)$$

De las expresiones anteriores se ve que en altas frecuencias, cuando $\omega L > 1/\omega C$, el término inductivo domina y la reactancia X adquiere valor positivo. Por el contrario a bajas frecuencias en que $\omega L < 1/\omega C$ domina el término capacitivo y la reactancia adquiere valor negativo.

A la frecuencia en que se igualan las reactancias inductiva y capacitiva " $\omega L = 1/\omega C$ ", la reactancia total es cero y se dice que el circuito está en resonancia.

La frecuencia de resonancia se tiene, por tanto, cuando:

$$\omega L = \frac{1}{\omega C}$$

Con lo que la frecuencia de resonancia es:

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$$

En la figura 4.2 se muestra la gráfica del módulo de la impedancia en función de la frecuencia para un circuito resonante en serie, donde se puede apreciar el fenómeno.

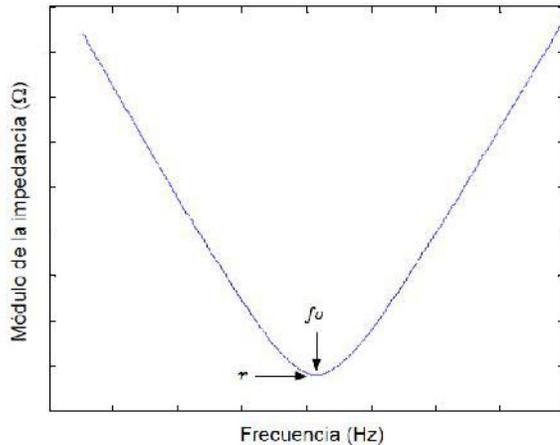


Figura 4.2: Frecuencia de resonancia f_0 .

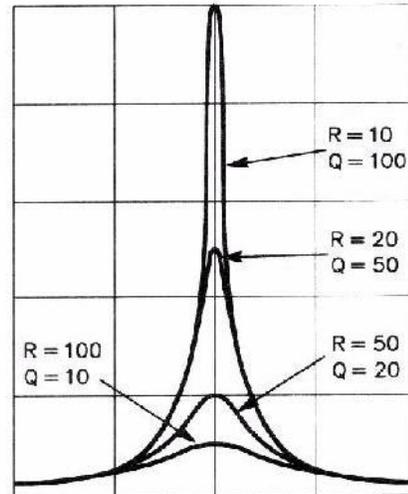


Figura 4.3: Respuestas con diferentes factores de calidad Q .

El factor de calidad, más conocido como el valor “ Q ”, de un circuito resonante en serie se define como la relación entre la reactancia inductiva a resonancia y la resistencia en serie con el circuito, como se explicó anteriormente.

Cuando el valor de la reactancia de la bobina o del condensador es comparable al de la resistencia en serie, la impedancia crece lentamente según la frecuencia se aleja del valor de resonancia, el factor de calidad “ Q ” es bajo y la curva de resonancia es ancha. Por el contrario, cuando la reactancia es considerablemente mayor que la resistencia del circuito, la impedancia aumenta rápidamente, el circuito tiene un factor de calidad “ Q ” elevado y la curva de resonancia es aguda. Un circuito de este tipo responde más rápido a la frecuencia de resonancia que un circuito de factor de calidad “ Q ” bajo, en el cuál la respuesta será muy similar en un rango amplio de frecuencias alrededor de la resonancia.

En la figura 4.3 puede verse el fenómeno explicado. Se observa que si se tiene un mayor factor de calidad “ Q ” puede identificarse con mayor facilidad la frecuencia de resonancia.

Para obtener el valor de inductancia L del reactor de línea se realizaron una serie de mediciones utilizando diferentes valores de capacidad. Se montó el sistema como se indicó más arriba, tal como se ilustra a continuación.

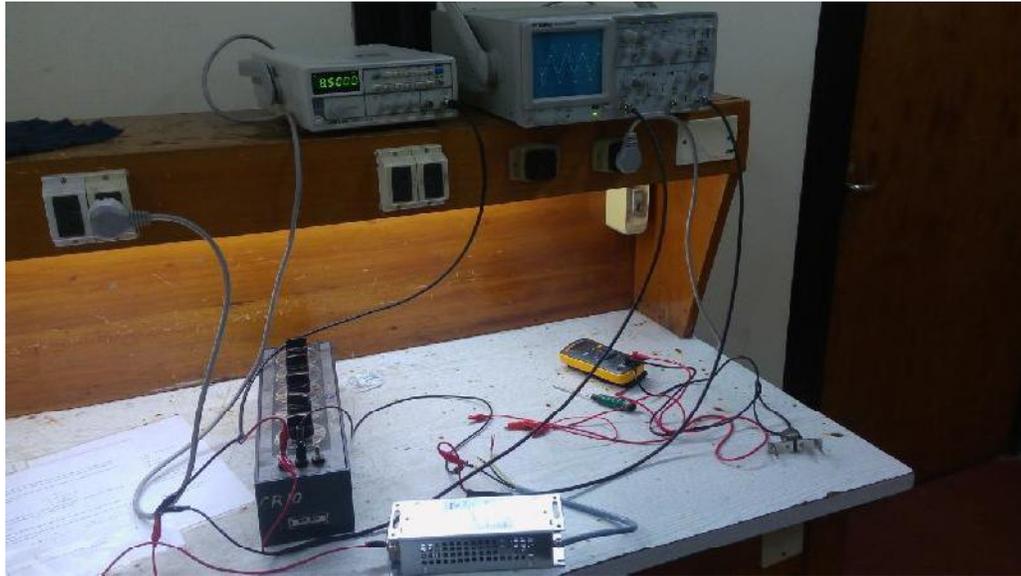


Figura 4.4: Medición de frecuencia de resonancia en FCEFyN.

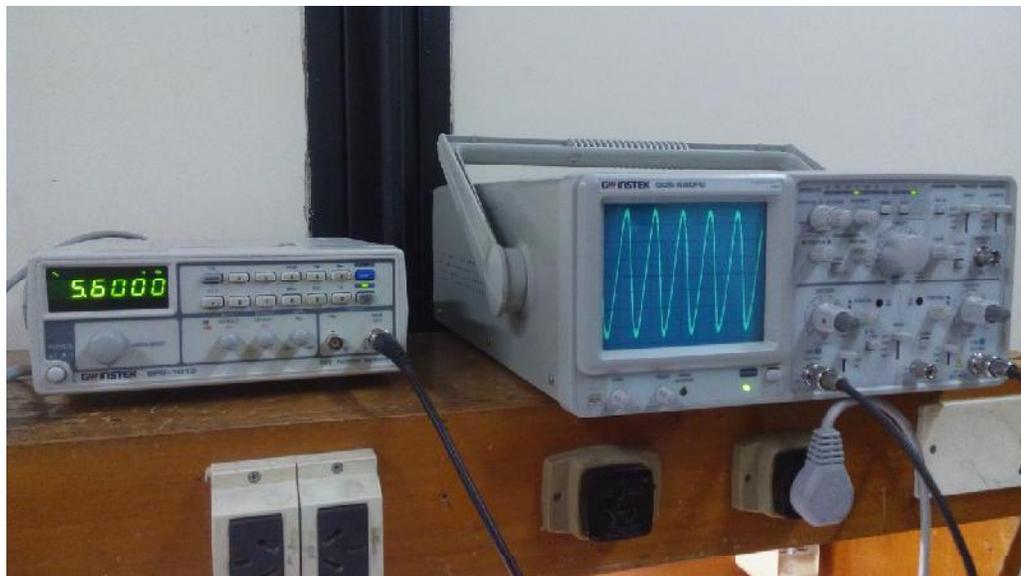


Figura 4.5: Generador de onda y osciloscopio.

Se exponen los cálculos realizados:

MEDICIÓN		
Método Resonancia circuito RLC serie		

MEDICIÓN N°1		C= 220 nF
DATOS	Valor	Unidad
C=	220	nF
Rsist.=	1.4	Ω
CÁLCULO	Valor	Unidad
fo medida=	8710	Hz
L=	1.52	mH

MEDICIÓN N°2		C= 12,3 nF
DATOS	Valor	Unidad
C=	12.3	nF
Rsist.=	1.4	Ω
CÁLCULO	Valor	Unidad
fo medida=	51710	Hz
L=	0.77	mH

MEDICIÓN N°3		C= 92 nF
DATOS	Valor	Unidad
C=	92	nF
Rsist.=	1.4	Ω
CÁLCULO	Valor	Unidad
fo medida=	17810	Hz
L=	0.87	mH

MEDICIÓN N°4		C= 51 nF
DATOS	Valor	Unidad
C=	51	nF
Rsist.=	1.4	Ω
CÁLCULO	Valor	Unidad
fo medida=	23810	Hz
L=	0.88	mH

MEDICIÓN N°5		C= 9,77 μ F
DATOS	Valor	Unidad
C=	9.77	μ F
Rsist.=	1.4	Ω
CÁLCULO	Valor	Unidad
fo medida=	1500	Hz
L=	1.15	mH

MEDICIÓN N°6		C= 499,2 nF
DATOS	Valor	Unidad
C=	499.2	nF
Rsist.=	1.4	Ω
CÁLCULO	Valor	Unidad
fo medida=	5700	Hz
L=	1.56	mH

Como se puede observar los valores no se repiten exactamente debido en parte al método de medición, con el cual no es fácilmente determinable la frecuencia exacta de resonancia; por otra parte puede deberse a numerosas variables concernientes al circuito y a los componentes del mismo. Por ello se efectuaron una serie de mediciones que se resumen en el cuadro que sigue, y se calculó un valor promedio de las mismas.

Resumen de valores medidos:

Medición	Valores Obtenidos	Unidad
L ₁ =	1.52	mH
L ₂ =	0.77	mH
L ₃ =	0.87	mH
L ₄ =	0.88	mH
L ₅ =	1.15	mH
L ₆ =	1.56	mH

Tabla 4.2: Resumen de valores de inductancia obtenidos en Reactancia Siemens.

Realizando un promedio de los valores obtenidos tenemos:

Valor L mín. =	0.77	mH
Valor L máx. =	1.56	mH
Valor L medio =	1.12	mH

Tabla 4.3: Valor medio, mínimo y máximo de inductancia L calculado.

4.4. CONSTRUCCIÓN DE LA BOBINA

Para el diseño de la bobina con un determinado valor de inductancia L en henrios, deben definirse ciertas variables. Debe mencionarse que el diseño se realizará en base a elementos de uso comercial.

El hilo será de cobre esmaltado, devanado a mano sobre un carretel plástico en capas sucesivas con las espiras juntas entre sí. Se utilizará un núcleo formado por láminas de hierro-silicio cuyo tipo constructivo será del tipo E-I y de sección cuadrada.

Diseño

Analizando la expresión de la inductancia:

$$L = \frac{N\Phi}{I}$$

Tenemos que:

$$\Phi = B \cdot S$$

$$B = \mu \cdot H$$

$$H = N \cdot I / l$$

$$\mu = \mu_0 \cdot \mu_r$$

donde:

- L: inductancia [H]
- Φ : flujo de campo magnético
- B: inducción de campo magnético
- H: intensidad de campo magnético
- l: alto de bobina [m]
- μ_0 : permeabilidad magnética del vacío [H/m]
- μ_r : permeabilidad relativa del material del núcleo.
- S: sección transversal del núcleo [m²]

Reemplazando,

$$L = \frac{\mu_0 \cdot \mu_r \cdot N^2 \cdot S}{l}$$

Se observa que el valor de la inductancia es directamente proporcional a la permeabilidad relativa del material μ_r del núcleo, de lo que se desprende que utilizando núcleo de materiales magnéticos de alto valor de μ_r se puede obtener altos valores de inductancia, con menor número de espiras (menor caída óhmica).

Además en estos casos, al ser μ_r grande, el flujo queda confinado en el material magnético y por consiguiente la dispersión es mucho menor que con núcleo de aire.

En contraposición a estas ventajas, estos inductores tienen inconvenientes tales como pérdidas en el material del núcleo y la no constancia en el valor de la inductancia, ya que va a depender de la corriente circulante, como consecuencia de las características no lineales de magnetización, de los materiales magnéticos, etc.

El cálculo o diseño de la bobina de línea puede dividirse en tres etapas:

- a) Elección del núcleo;
- b) Determinación del número de vueltas del bobinado;
- c) Determinación del alambre para el bobinado.

a) Se adoptará un núcleo de material hierro-silicio (Fe-Si) del tipo E-I. La sección del núcleo está determinada por la potencia disipada en la bobina.

$$P_D = I^2 * R$$

$$P_D = 8,1^2 * 0,015 = 1 \text{ W}$$

$$S_{\text{núcleo}} = 1,1 * \sqrt{P_D} = 1,1 \text{ cm}^2 = 110 \text{ mm}^2$$

$$L_{\text{núcleo}} = \sqrt{S_{\text{núcleo}}} = \sqrt{110 \text{ mm}^2} = 10,49 \text{ mm}$$

Finalmente el núcleo adoptado en la fabricación de la bobina por cuestiones constructivas es un núcleo con sección cuadrada de 22 mm de lado.

b) Para la determinación de las vueltas (N) requeridas para lograr el valor de inductancia deseado partimos de la fórmula de la inductancia.

$$L = \frac{\mu_0 \cdot \mu_r \cdot N^2 \cdot S}{l}$$

$$N = \sqrt{\frac{L \cdot l}{\mu_0 \cdot \mu_r \cdot S}}$$

En la Tabla 4.4 se presenta el cálculo, donde puede verse que se obtuvo como resultado un valor de N=18 vueltas.

Reactor de Línea - Cálculo N° de Vueltas (N)			
		Valor	Unidad
Lado del núcleo	c =	0,022	m
Largo de la bobina	l =	0,035	m
Sección transversal del núcleo	S =	0,000484	m ²
Permeabilidad del aire	μ₀ =	1,2566E-06	H/m
Permeabilidad relativa del material	μ_r =	700	-
Permeabilidad magnética	μ =	0,00087965	H/m
N° de vueltas	N =	18,00	vueltas
	L =	3,94	mH
	5 % ≥ ΔV % =	4,56	%

Tabla 4.4: Cálculo núm. de vueltas de Reactor de línea.

c) El alambre empleado en el bobinado será de cobre esmaltado, y la sección del mismo es calculada en base a la densidad de corriente que circulará por la bobina, es decir que el espesor del alambre depende directamente de la intensidad de la corriente que lo recorre.

El alambre de cobre admite una densidad máxima de corriente dada su resistividad. Es así que si se supera esa densidad, existe el peligro de sobrecalentamiento.

Aplicamos ahora la siguiente fórmula para determinar la sección del alambre esmaltado que debe usarse para el bobinado:

$$S = \frac{I}{D}$$

Donde:

- S es la sección del alambre en mm²
- I es la intensidad de la corriente en A
- D es la densidad de la corriente en A/mm²

Considerando $D = 3 \text{ A/mm}^2$ y calculando con la corriente máxima, tenemos:

$$S = \frac{8,1 \text{ A}}{3 \text{ A/mm}^2} \approx 2,67 \text{ mm}^2$$

Se adopta entonces alambre AWG 13, diámetro 1,8 mm.

En la fabricación de bobinas existen elementos que influyen en el valor de inductancia final no tenidos en cuenta en las fórmulas y que alteran el resultado sensiblemente, como pueden ser, diámetro y material del alambre usado, inductancias parásitas, información errónea sobre permeabilidad del núcleo real, inferencias, etc. Esto hace que constructivamente no se obtenga el valor exacto de inductancia deseado. Debido a esto, se optó por implementar diferentes derivaciones en las vueltas del bobinado del reactor de línea, dándole cierta versatilidad al mismo.

CAPÍTULO 5

MEDICIÓN DE LA EMISIÓN ARMÓNICA EN VARIADORES DE VELOCIDAD

5.1. INTRODUCCIÓN

La electrónica de potencia presente en variadores de velocidad, lo convierten en una importante carga no lineal dentro de los sistemas de potencia. Naturalmente, como toda carga no lineal, emiten corrientes armónicas hacia la red de suministro.

En la actualidad existen severas normas internacionales referidas a Compatibilidad Electromagnética a cumplir tanto por las empresas prestatarias del servicio eléctrico como por los propios usuarios. Por lo tanto, al momento de incorporar este tipo de cargas en una instalación se debe analizar previamente si los niveles de armónicos emitidos no sobrepasan los valores permitidos por la normativa vigente.

La forma más directa y precisa de conocer los niveles de emisión por parte de estos equipos es a través de ensayos, en los cuales se hace trabajar al motor bajo las condiciones de interés y se registra, con un equipo medidor de armónicas apropiado, el nivel de corrientes armónicas emitido para ese estado de carga.

Luego, se comparan los valores registrados con aquellos establecidos en la normativa.

En el presente trabajo se realizan mediciones sobre la instalación que alimenta a un motor controlado por un variador de velocidad y se describe además la manera de llevar a cabo esta prueba, representando finalmente los resultados obtenidos en dichos ensayos.

5.2. ENSAYOS REALIZADOS

Por cuestiones inherentes a su funcionamiento, los variadores de velocidad de motores emiten armónicas hacia la red de suministro. Dichas armónicas deben ser contenidas dentro de determinados límites ya que de lo contrario, aquellos usuarios que posean este tipo de cargas en sus instalaciones serán pasibles de penalidad.

Es por esta razón que se deben analizar pormenorizadamente tanto el impacto que éstos producirán dentro de sus propias instalaciones como las perturbaciones que serán emitidas hacia la red.

Como parte de este análisis de impacto, normalmente se efectúan ensayos para determinar de forma práctica y fehaciente las armónicas que producen los variadores de velocidad, bajo las condiciones de funcionamiento en las que éstos trabajarán una vez puestos en servicio.

En lo que se refiere a normativa, la norma IEC 61000 en su parte 3, sección 2, establece los límites de emisión de corrientes armónicas para un equipo de baja tensión con corriente nominal menor a 16 A. Por otro lado la norma IEC 61000 en su parte 2, sección 2, establece los límites de distorsión armónica de tensión para un equipo de baja tensión.

En este caso en particular el Equipo Bajo Ensayo es justamente el variador de velocidad del cual se quiere determinar la distorsión armónica generada.

Una vez montado el esquema de conexión correspondiente se efectúan las mediciones de armónicas a la entrada del variador. Los diferentes esquemas de conexión que serán ensayados se ilustran a continuación.

Previo al comienzo de las mediciones se deja que el sistema ingrese a régimen permanente con el variador de velocidad funcionando en las condiciones establecidas para cada ensayo. Una vez logrado esto se registraron armónicas hasta la 39ª durante un período de tiempo considerable, tal como lo detalla el procedimiento de medición expuesto más adelante.

Es importante señalar que el nivel de distorsión armónico individual, tanto de corriente como de tensión, se define con respecto a la componente fundamental.

$$I_h(\%) = \frac{I_h}{I_{Fund.}} * 100\% \quad ; \quad U_h(\%) = \frac{U_h}{U_{Fund.}} * 100\%$$

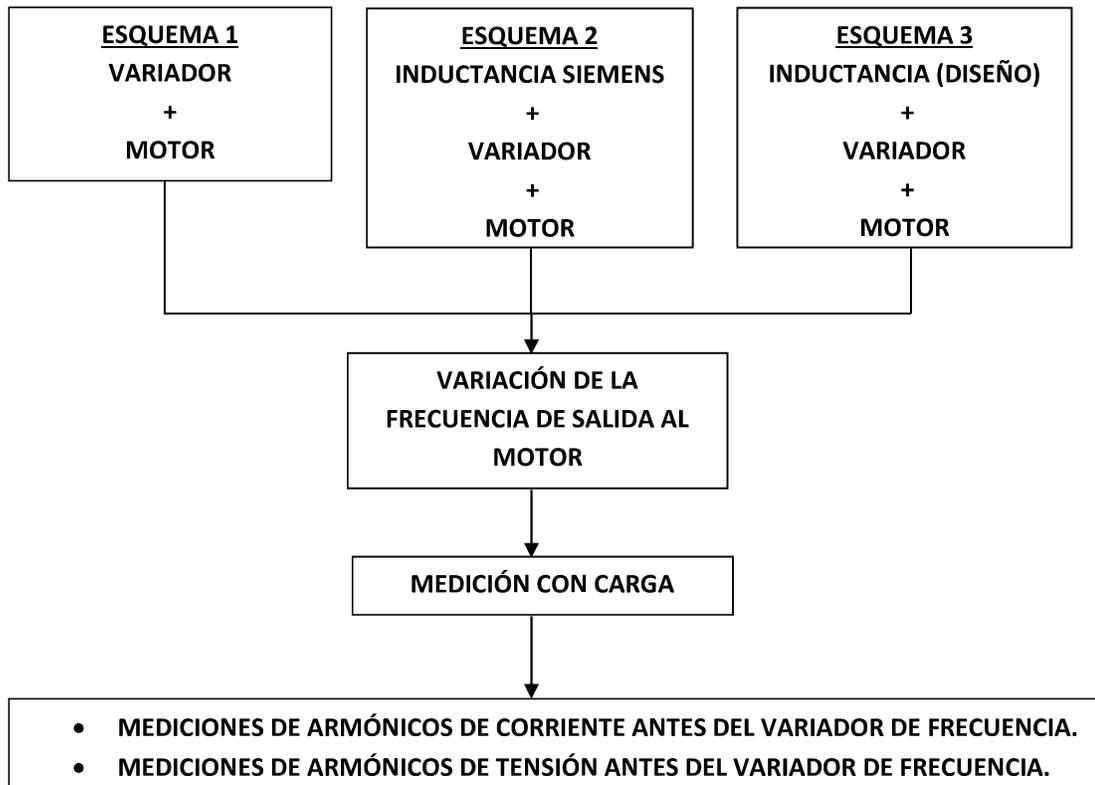
5.3. MEDICIÓN, ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS

Las mediciones realizadas se explican en el cuadro que se observa a continuación. El procedimiento seguido para efectuar las mediciones explica los pasos detalladamente; el mismo se expone en el apartado siguiente.

VARIACIÓN DE LA FRECUENCIA DE SALIDA AL MOTOR
 (50 Hz - 35Hz - 20Hz)

MEDICIONES CON EL MOTOR CON CARGA

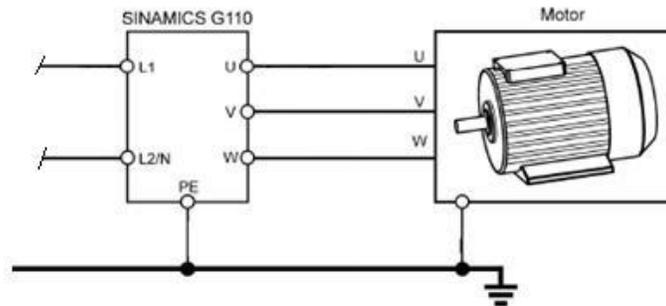
- MEDICIONES DE ARMÓNICOS DE CORRIENTE AGUAS ARRIBA DEL VARIADOR DE FRECUENCIA.
- MEDICIONES DE ARMÓNICOS DE TENSIÓN AGUAS ARRIBA DEL VARIADOR DE FRECUENCIA.



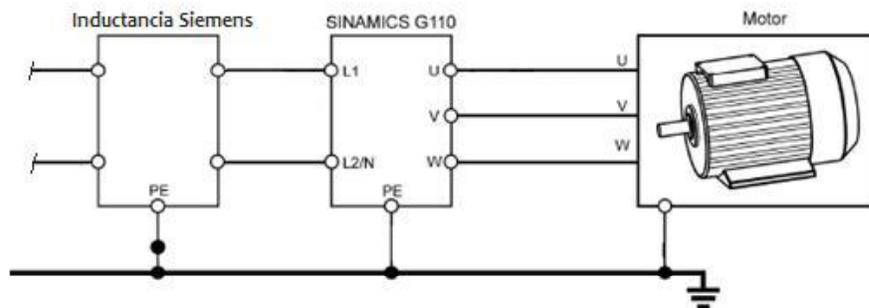


▪ ESQUEMAS DE CONEXIÓN:

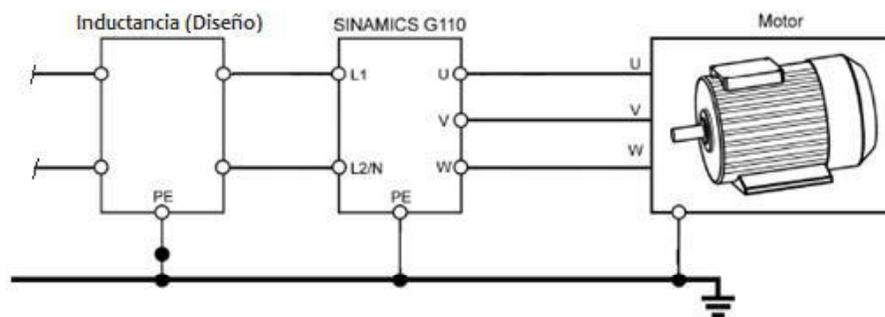
Esquema 1



Esquema 2



Esquema 3



5.3.1. PROCEDIMIENTO DE MEDICIÓN

En este apartado se detalla el procedimiento seguido en la ejecución de las mediciones.

 FCEFyN		UNIVERSIDAD NACIONAL DE CÓRDOBA FACULTAD DE CIENCIAS EXACTAS, FÍSICAS Y NATURALES	
PROCEDIMIENTO MEDICIÓN DE ARMÓNICOS DE CORRIENTE Y ARMÓNICOS DE TENSIÓN			
LABORATORIO DE BAJA TENSIÓN _ FCEFyN			
Supervisor	Oscar Marchi	Fecha	15/12/17
<p>Una vez montada la correspondiente configuración del circuito, se procede a realizar los siguientes pasos:</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. SE REALIZA LA CONEXIÓN DEL CIRCUITO CORRESPONDIENTE, SEGÚN EL ESQUEMA DE CONEXIÓN N° 1, A LA RED ELÉCTRICA. 2. SE ASIGNA EL PRIMER VALOR DE FRECUENCIA DE SALIDA EN EL VARIADOR. 3. SE CONECTA EL EQUIPO ANALIZADOR DE ARMÓNICOS METREL MI 2092. 4. UNA VEZ LISTOS LOS ITEMS ANTERIORES Y CON LOS DATOS DEL MOTOR CORRECTAMENTE CARGADOS EN EL VARIADOR, SE PROCEDE A DAR MARCHA AL MOTOR DANDO LA SEÑAL AL VARIADOR. 5. A CONTINUACIÓN SE LE DA LA CARGA AL MOTOR. 6. POSTERIORMENTE A ELLO SE COMIENZA A REGISTRAR LOS VALORES CON EL ANALIZADOR DE ARMÓNICOS, POR UN PERIODO RAZONABLE DE UNOS 10 MINUTOS. 7. LUEGO, SE ASIGNA AL VARIADOR EL SIGUIENTE VALOR DE FRECUENCIA DE SALIDA, Y SE PROCEDE DE IGUAL MANERA DESDE EL ÍTEM NÚMERO 4. 8. DE ESTA FORMA SE EFECTÚAN LAS MEDICIONES CON LOS VALORES DE FRECUENCIA CORRESPONDIENTES. 9. TERMINADA ESTA SERIE DE MEDICIONES, SE PROCEDE A REALIZAR EL CONEXIONADO DEL CIRCUITO SEGÚN EL ESQUEMA DE CONEXIÓN N° 2. POSTERIORMENTE SE REPITE EL PROCEDIMIENTO DESDE EL ÍTEM NÚMERO 2 AL ÍTEM NÚMERO 8. 10. POR ÚLTIMO SE PROCEDE A REALIZAR EL CONEXIONADO DEL CIRCUITO SEGÚN EL ESQUEMA DE CONEXIÓN N° 3 Y NUEVAMENTE SE REPITE EL PROCEDIMIENTO DESDE EL ÍTEM NÚMERO 2 AL ÍTEM NÚMERO 8. 11. SE PROCEDE FINALMENTE A TOMAR LOS REGISTROS Y ANALIZAR LOS VALORES OBTENIDOS. 			

5.3.1.1. EQUIPOS UTILIZADOS

Analizador de Armónicos de Potencia

En la toma de valores se empleó un analizador de armónicos de potencia marca Metrel modelo MI 2092, facilitado por el Laboratorio de Baja Tensión. Al momento de tomar el registro, una vez montado el circuito correspondiente, contamos con la presencia del Sr. Oscar Marchi para la manipulación del equipo.

Los registros obtenidos tienen una duración de diez minutos (10 min) cada uno, tomando una muestra cada dos segundos (2 s), con lo cual cada registro se compone de 300 muestras.

En Anexo IV se indica el modelo del equipo y se presentan las principales características del mismo.

Motor

Se presenta un esquema de la placa del motor con los respectivos datos.

	1,5 kW
U: Δ/γ	220/380 V
I:	6,6/3,8 A
RPM:	1415 1/min
f- 50 Hz	Cos φ - 0,79

Figura 5.1: Representación de placa del motor.

Freno aplicado al motor

El ensayo se produjo en un banco de prueba para motores en el cual para aplicar carga al motor se utilizó como freno un motor (generador) acoplado directamente al eje del motor a ensayar.

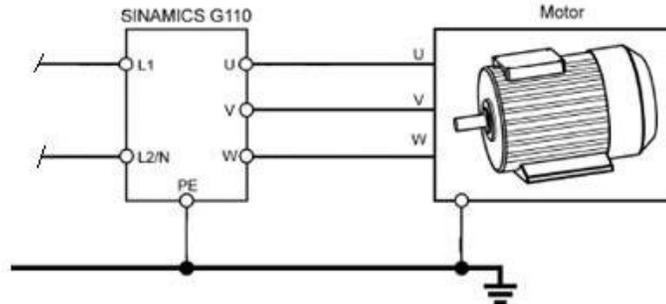


Figura 5.2: Fotografía de generador utilizado como carga del motor.

5.3.2 REPRESENTACIÓN DE LOS RESULTADOS

UNIVERSIDAD NACIONAL DE CÓRDOBA
 FACULTAD DE CIENCIAS EXACTAS FÍSICAS Y NATURALES

ESQUEMA DE CONEXIÓN N°1



MEDICIÓN ARMÓNICOS DE CORRIENTE

Ensayo N°1

Instrumento:	Metrel MI 2092
Software:	PowerLink / Excel
Fecha de ejecución:	15/12/17
Frecuencia de salida al motor:	50 Hz

I_{rms} (A)	3,72
I Fund. (A)	2,99
THDi (%)	150,59

Armónicos de Corriente			E1		
Armónicos impares			Armónicos pares		
Orden de Armónico	Magnitud (A)	Nivel (%)	Orden de Armónico	Magnitud (A)	Nivel (%)
1	2.99	100.00	2	0.13	4.40
3	3.01	100.52	4	0.10	3.22
5	2.46	82.28	6	0.10	3.23
7	1.82	60.31	8	0.08	2.52
9	1.21	40.03	10	0.08	2.60
11	0.74	24.45			
13	0.30	9.82			
15	0.23	7.54			
17	0.22	7.12			
19	0.21	6.88			
21	0.18	6.05			
23	0.14	4.56			
25	0.10	3.39			
27	0.09	2.96			
29	0.09	2.93			
31	0.09	2.81			
33	0.08	2.47			
35	0.07	2.22			
37	0.06	2.06			
39	0.06	2.08			

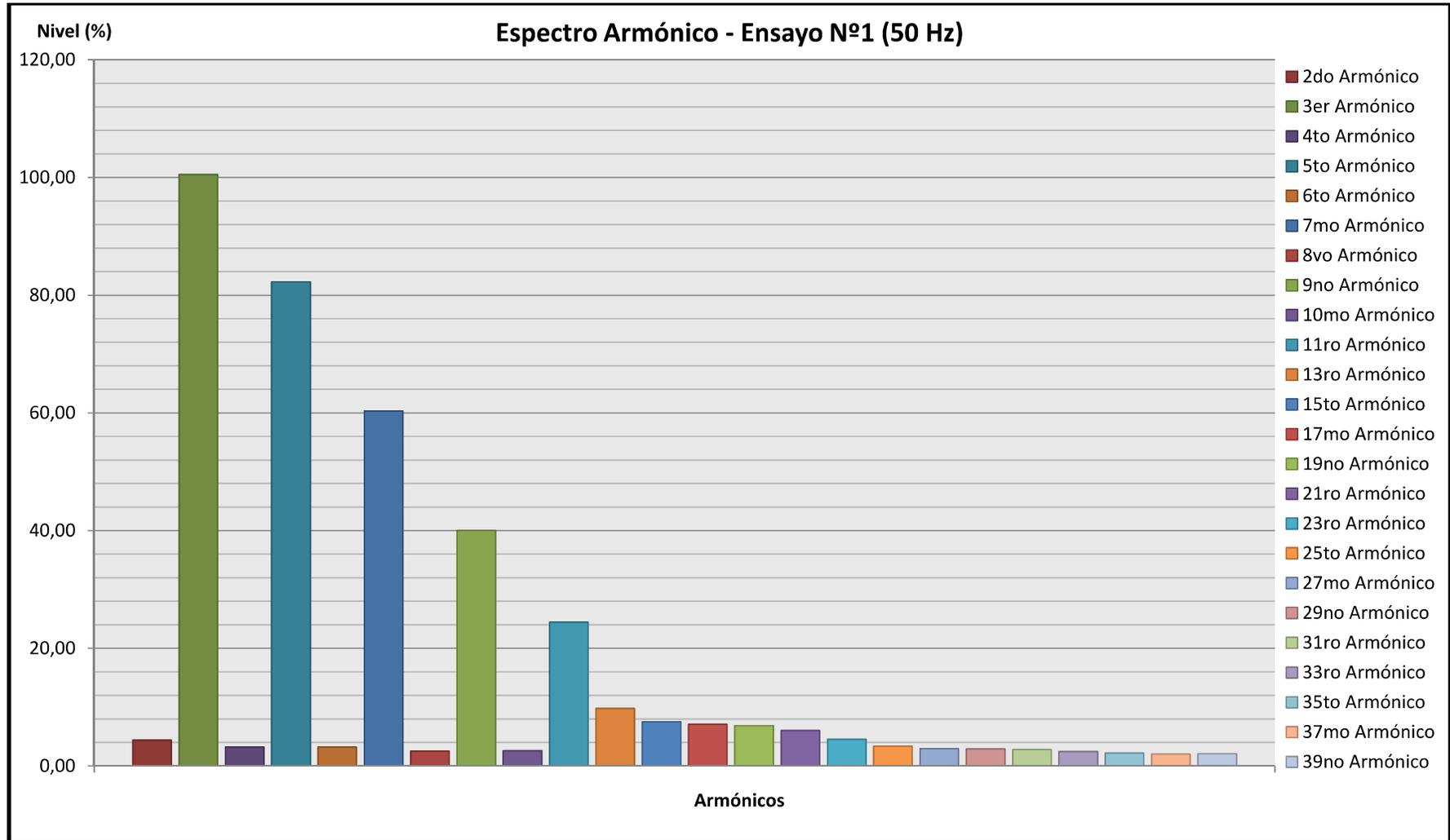
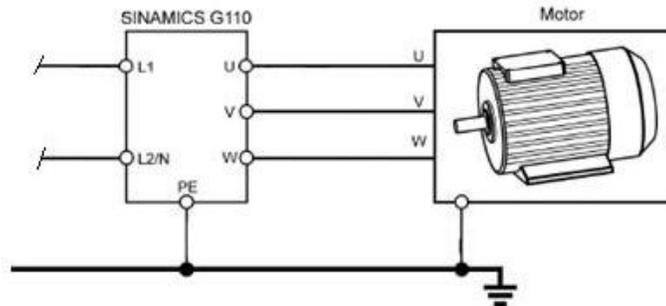


Figura 5.3:.. Espectro Armónico Ensayo N°1 (50Hz).

UNIVERSIDAD NACIONAL DE CÓRDOBA
 FACULTAD DE CIENCIAS EXACTAS FÍSICAS Y NATURALES

ESQUEMA DE CONEXIÓN N°1



MEDICIÓN ARMÓNICOS DE CORRIENTE

Ensayo N°2

Instrumento:	Metrel MI 2092
Software:	PowerLink / Excel
Fecha de ejecución:	15/12/17
Frecuencia de salida al motor:	35 Hz

I _{rms} (A)	3,11
I _{Fund.} (A)	1,56
THDi (%)	173,47

Armónicos de Corriente			E2		
Armónicos impares			Armónicos pares		
Orden de Armónico	Magnitud (A)	Nivel (%)	Orden de Armónico	Magnitud (A)	Nivel (%)
1	1.56	100	2	0.14	8.86
3	1.73	115.57	4	0.10	6.08
5	1.43	94.37	6	0.10	6.22
7	1.08	70.93	8	0.07	4.59
9	0.74	47.72	10	0.08	4.95
11	0.27	17.63			
13	0.17	11.14			
15	0.17	10.72			
17	0.16	10.31			
19	0.14	8.99			
21	0.10	6.46			
23	0.09	5.92			
25	0.09	5.96			
27	0.10	6.21			
29	0.08	5.29			
31	0.07	4.55			
33	0.06	4.07			
35	0.07	4.25			
37	0.07	4.25			
39	0.07	4.17			

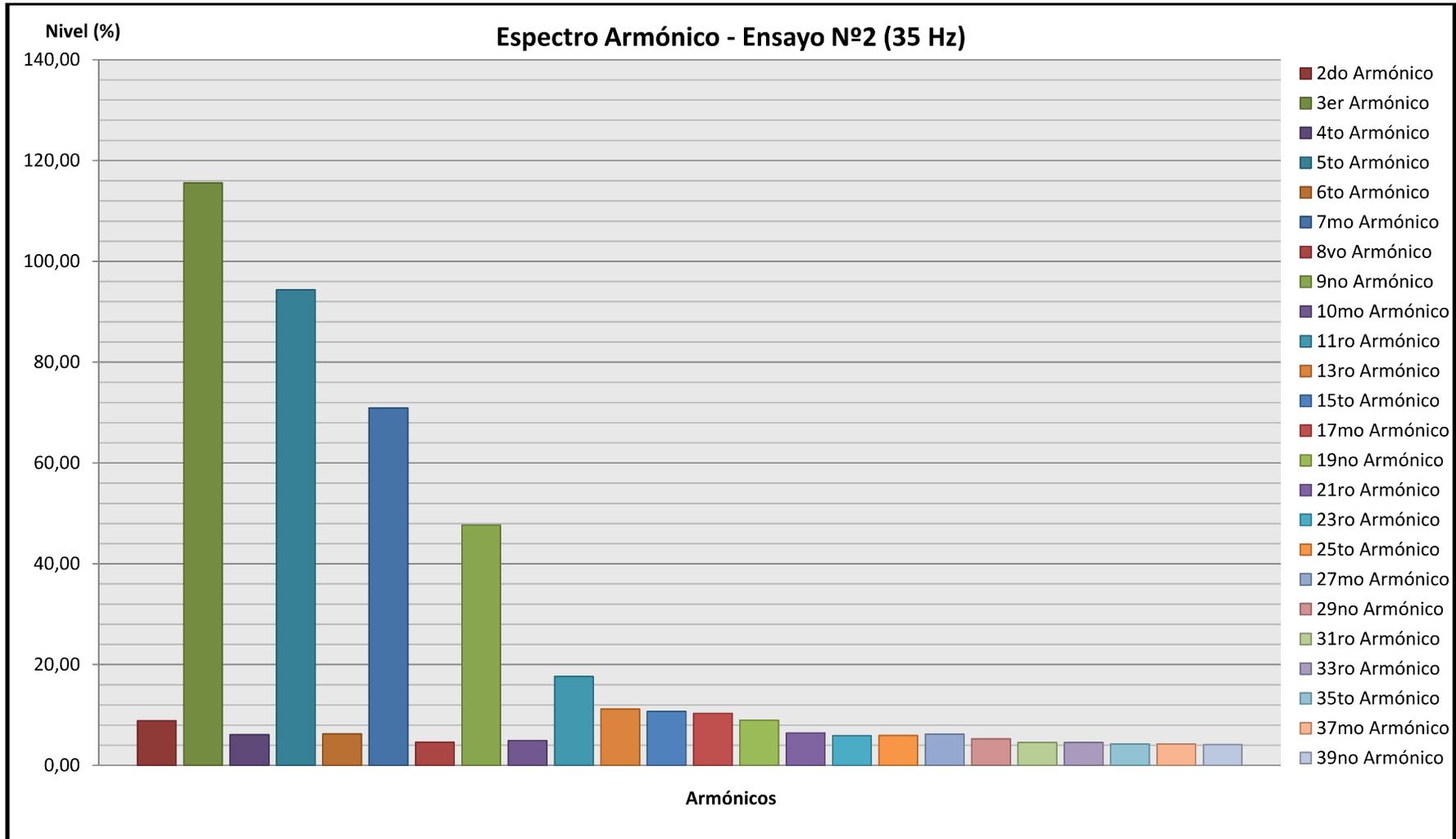
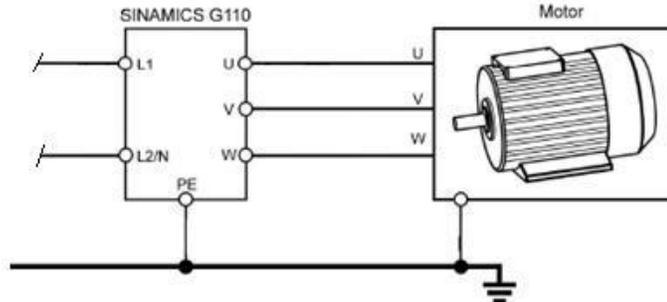


Figura 5.4: Espectro Armónico Ensayo N°2 (35Hz).

UNIVERSIDAD NACIONAL DE CÓRDOBA
 FACULTAD DE CIENCIAS EXACTAS FÍSICAS Y NATURALES

ESQUEMA DE CONEXIÓN N°1



MEDICIÓN ARMÓNICOS DE CORRIENTE

Ensayo N°3

Instrumento:	Metrel MI 2092
Software:	PowerLink / Excel
Fecha de ejecución:	15/12/17
Frecuencia de salida al motor:	20 Hz
I_{rms} (A)	2,13
I Fund. (A)	0,56
THDi (%)	192,55

Armónicos de Corriente			E3		
Armónicos impares			Armónicos pares		
Orden de Armónico	Magnitud (A)	Nivel (%)	Orden de Armónico	Magnitud (A)	Nivel (%)
1	0.56	100	2	0.18	30.13
3	1.10	194.66	4	0.14	21.48
5	0.91	166.53	6	0.13	21.65
7	0.75	132.93	8	0.10	16.13
9	0.50	81.51	10	0.10	16.40
11	0.26	45.16			
13	0.17	29.95			
15	0.12	20.40			
17	0.11	17.68			
19	0.11	18.04			
21	0.11	17.90			
23	0.10	15.92			
25	0.09	14.15			
27	0.08	13.55			
29	0.08	13.20			
31	0.08	13.44			
33	0.08	12.95			
35	0.08	12.45			
37	0.08	12.59			
39	0.08	12.94			

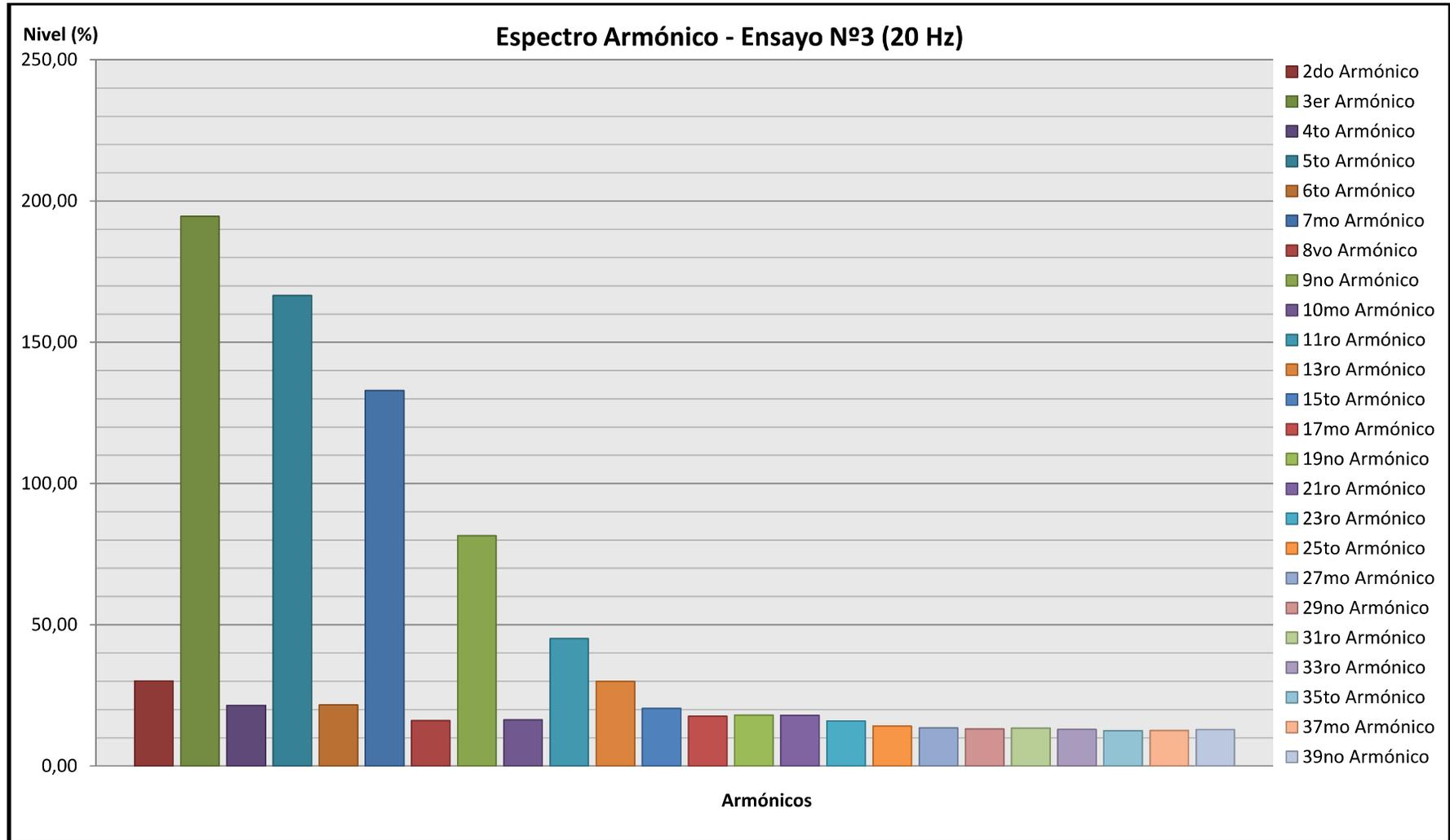
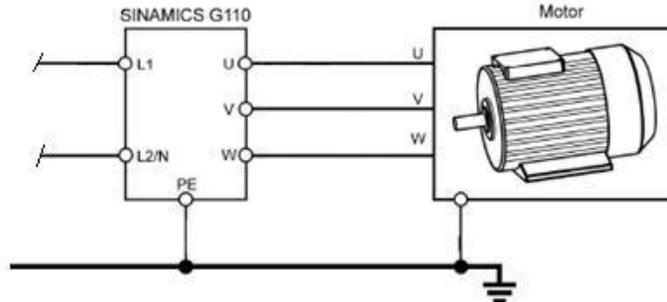


Figura 5.5: Espectro Armónico Ensayo N°3 (20Hz).

UNIVERSIDAD NACIONAL DE CÓRDOBA
 FACULTAD DE CIENCIAS EXACTAS FÍSICAS Y NATURALES

ESQUEMA DE CONEXIÓN N°1



MEDICIÓN ARMÓNICOS DE TENSIÓN

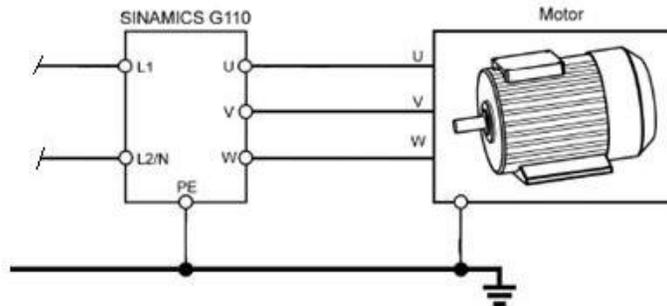
Ensayo N°1

Instrumento:	Metrel MI 2092
Software:	PowerLink / Excel
Fecha de ejecución:	15/12/17
Frecuencia de salida al motor:	50 Hz
V_{rms} (V)	216,26
V_{Fund} (V)	215,96
THDu (%)	1,76

Armónicos de Tensión			E1		
Armónicos impares			Armónicos pares		
Orden de Armónico	Magnitud (V)	Nivel (%)	Orden de Armónico	Magnitud (V)	Nivel (%)
1	215.96	100.00	2	0.00	0.00
3	2.29	1.06	4	0.00	0.00
5	2.74	1.27	6	0.00	0.00
7	2.49	1.15	8	0.00	0.00
9	2.28	1.06	10	0.00	0.00
11	0.34	0.16			
13	0.00	0.00			
15	0.00	0.00			

UNIVERSIDAD NACIONAL DE CÓRDOBA
 FACULTAD DE CIENCIAS EXACTAS FÍSICAS Y NATURALES

ESQUEMA DE CONEXIÓN N°1



MEDICIÓN ARMÓNICOS DE TENSIÓN

Ensayo N°2

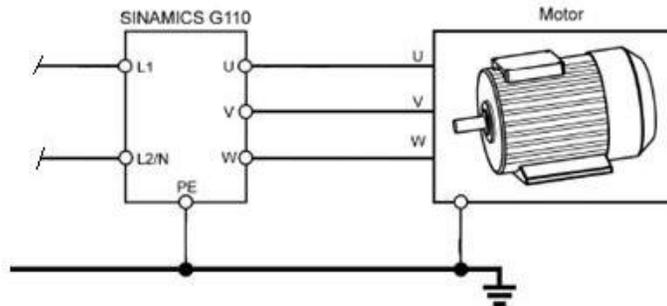
Instrumento:	Metrel MI 2092
Software:	PowerLink / Excel
Fecha de ejecución:	15/12/17
Frecuencia de salida al motor:	35 Hz

V_{rms} (V)	217,62
V_{Fund} (V)	217,08
THDu (%)	2,20

Armónicos de Tensión					E2
Armónicos impares			Armónicos pares		
Orden de Armónico	Magnitud (V)	Nivel (%)	Orden de Armónico	Magnitud (V)	Nivel (%)
1	217.08	100	2	0.00	0.00
3	1.86	0.85	4	0.00	0.00
5	2.45	1.13	6	0.00	0.00
7	1.71	0.79	8	0.00	0.00
9	2.26	1.04	10	0.00	0.00
11	0.22	0.10			
13	0.00	0.00			
15	0.00	0.00			

UNIVERSIDAD NACIONAL DE CÓRDOBA
 FACULTAD DE CIENCIAS EXACTAS FÍSICAS Y NATURALES

ESQUEMA DE CONEXIÓN N°1



MEDICIÓN ARMÓNICOS DE TENSIÓN

Ensayo N°3

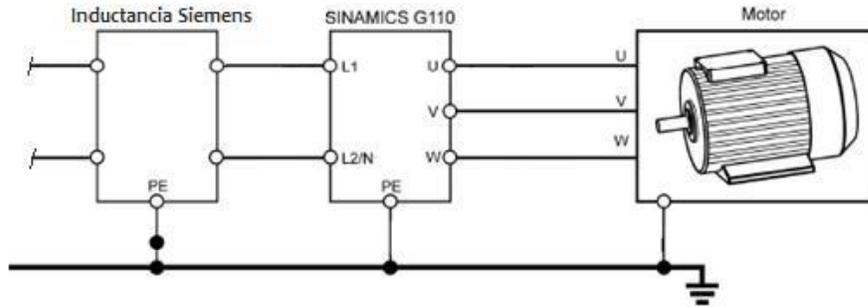
Instrumento:	Metrel MI 2092
Software:	PowerLink / Excel
Fecha de ejecución:	15/12/17
Frecuencia de salida al motor:	20 Hz

V_{rms} (V)	218,20
V_{Fund} (V)	217,63
THDu (%)	2,01

Armónicos de Tensión						E3
Armónicos impares			Armónicos pares			
Orden de Armónico	Magnitud (V)	Nivel (%)	Orden de Armónico	Magnitud (V)	Nivel (%)	
1	217.63	100	2	0.00	0.00	
3	1.57	0.72	4	0.00	0.00	
5	2.08	0.96	6	0.00	0.00	
7	1.69	0.78	8	0.00	0.00	
9	2.09	0.96	10	0.00	0.00	
11	0.20	0.09				
13	0.00	0.00				
15	0.00	0.00				

UNIVERSIDAD NACIONAL DE CÓRDOBA
 FACULTAD DE CIENCIAS EXACTAS FÍSICAS Y NATURALES

ESQUEMA DE CONEXIÓN N°2



MEDICIÓN ARMÓNICOS DE CORRIENTE

Ensayo N°4

Instrumento:	Metrel MI 2092
Software:	PowerLink / Excel
Fecha de ejecución:	15/12/17
Frecuencia de salida al motor:	50 Hz

I_{rms} (A)	3,96
I_{Fund} (A)	2,35
THDi (%)	127,90

Armónicos de Corriente						E4
Armónicos impares			Armónicos pares			
Orden de Armónico	Magnitud (A)	Nivel (%)	Orden de Armónico	Magnitud (A)	Nivel (%)	
1	2.35	100	2	0.16	6.54	
3	2.31	98.13	4	0.10	4.17	
5	1.63	68.99	6	0.10	3.99	
7	0.92	38.73	8	0.07	2.96	
9	0.27	11.44	10	0.08	3.33	
11	0.22	8.99				
13	0.21	8.61				
15	0.15	6.15				
17	0.11	4.81				
19	0.11	4.81				
21	0.10	4.25				
23	0.09	3.75				
25	0.09	3.61				
27	0.08	3.38				
29	0.08	3.28				
31	0.08	3.20				
33	0.08	3.17				
35	0.07	3.11				
37	0.07	3.11				
39	0.07	3.11				

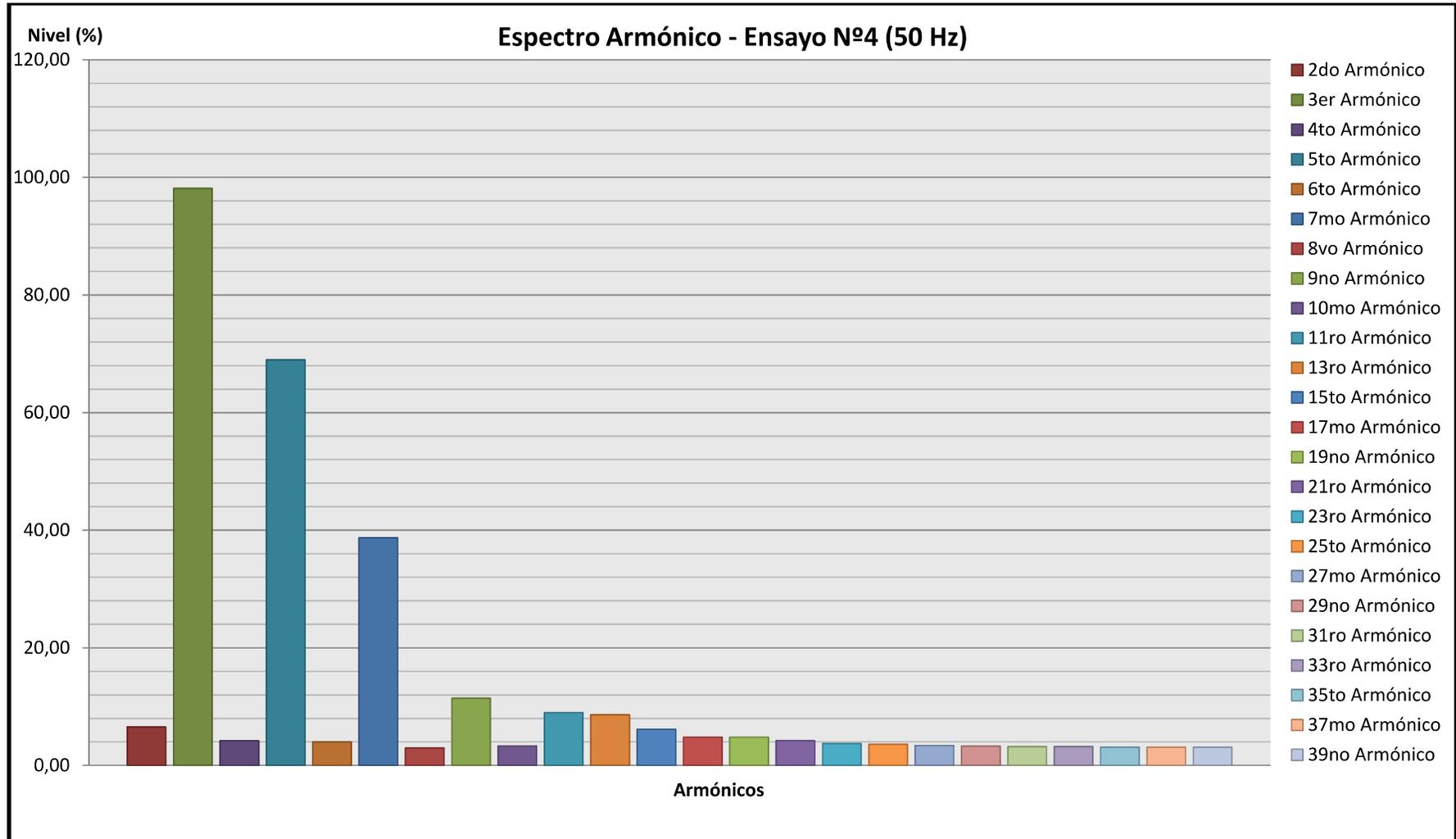
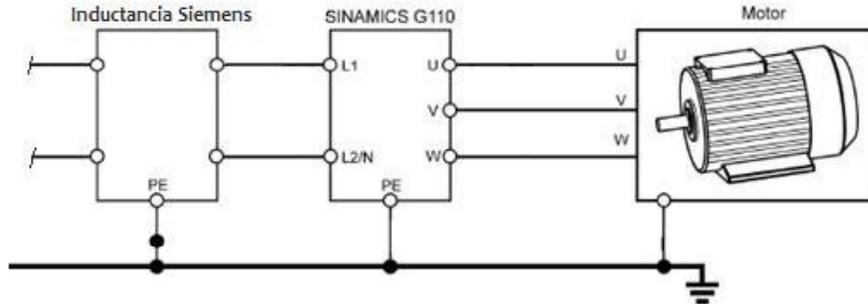


Figura 5.6: Espectro Armónico Ensayo N°4 (50Hz).

UNIVERSIDAD NACIONAL DE CÓRDOBA
 FACULTAD DE CIENCIAS EXACTAS FÍSICAS Y NATURALES

ESQUEMA DE CONEXIÓN N°2



MEDICIÓN ARMÓNICOS DE CORRIENTE

Ensayo N°5

Instrumento:	Metrel MI 2092
Software:	PowerLink / Excel
Fecha de ejecución:	15/12/17
Frecuencia de salida al motor:	35 Hz

I _{rms} (A)	2,78
I _{Fund} (A)	1,61
THDi (%)	142,74

Armónicos de Corriente			E5		
Armónicos impares			Armónicos pares		
Orden de Armónico	Magnitud (A)	Nivel (%)	Orden de Armónico	Magnitud (A)	Nivel (%)
1	1.61	100	2	0.16	9.55
3	1.68	104.83	4	0.11	6.40
5	1.25	77.73	6	0.09	5.68
7	0.79	48.54	8	0.07	4.36
9	0.26	15.81	10	0.08	4.87
11	0.19	11.28			
13	0.18	10.71			
15	0.14	8.74			
17	0.11	6.69			
19	0.10	6.34			
21	0.10	5.88			
23	0.09	5.32			
25	0.08	4.94			
27	0.08	4.85			
29	0.08	4.57			
31	0.07	4.33			
33	0.07	4.28			
35	0.07	4.41			
37	0.07	4.27			
39	0.07	4.28			

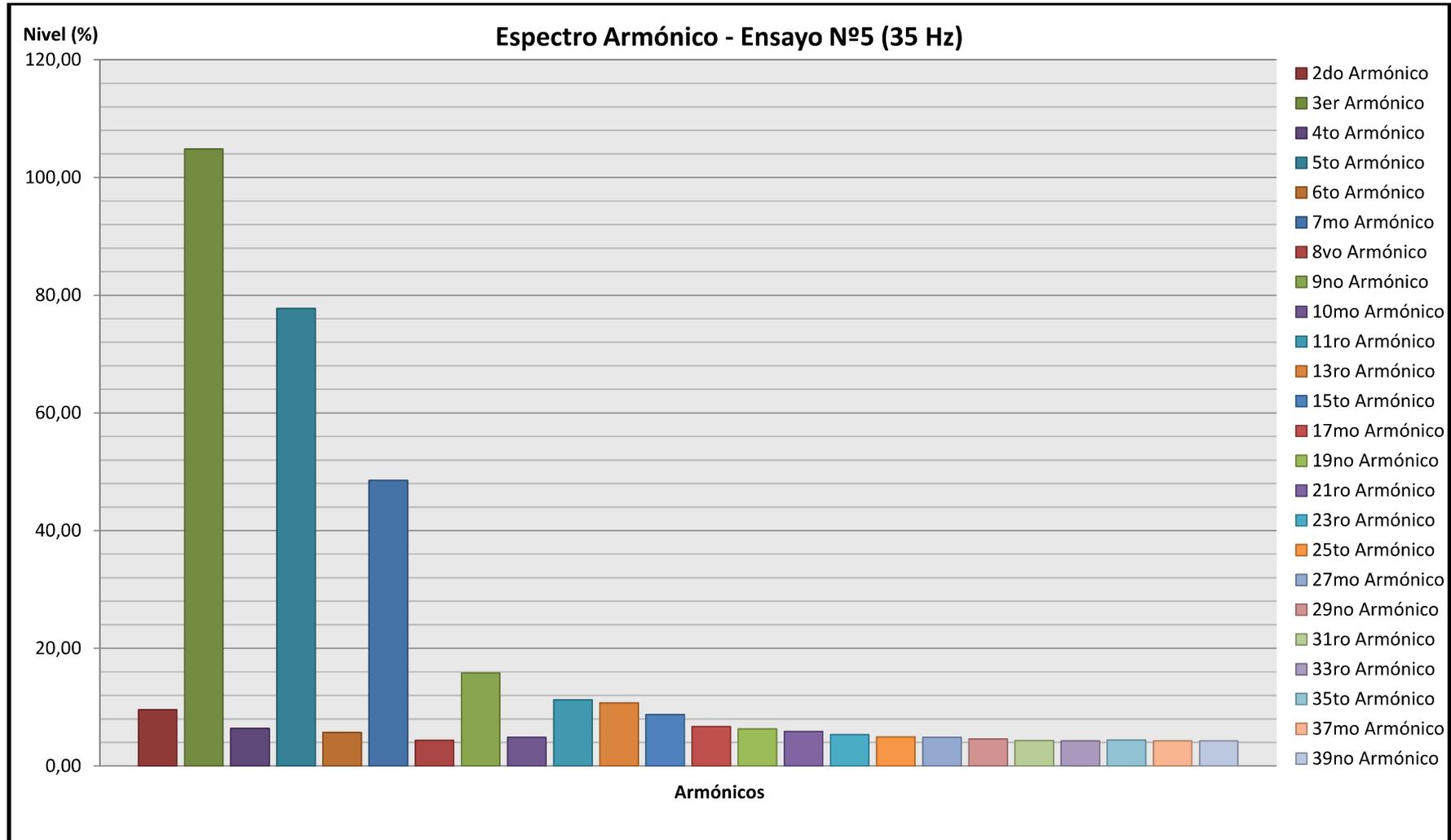
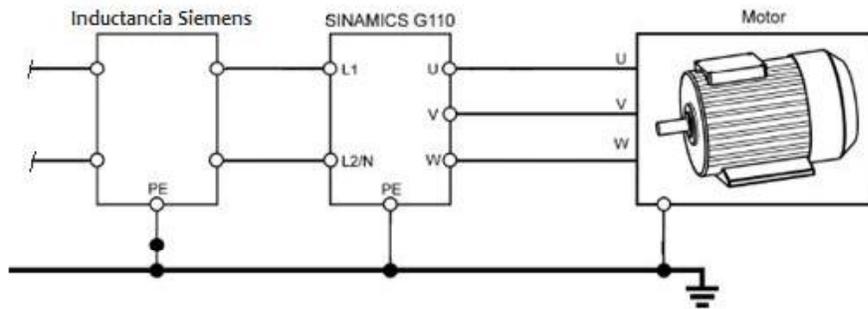


Figura 5.7: Espectro Armónico Ensayo N°5 (35Hz).

UNIVERSIDAD NACIONAL DE CÓRDOBA
 FACULTAD DE CIENCIAS EXACTAS FÍSICAS Y NATURALES

ESQUEMA DE CONEXIÓN N°2



MEDICIÓN ARMÓNICOS DE CORRIENTE

Ensayo N°6

Instrumento:	Metrel MI 2092
Software:	PowerLink / Excel
Fecha de ejecución:	15/12/17
Frecuencia de salida al motor:	20 Hz

I_{rms} (A)	2,10
I_{Fund} (A)	0,52
THDi (%)	170,73

Armónicos de Corriente			E6		
Armónicos impares			Armónicos pares		
Orden de Armónico	Magnitud (A)	Nivel (%)	Orden de Armónico	Magnitud (A)	Nivel (%)
1	0.52	100	2	0.20	32.30
3	0.99	189.06	4	0.15	24.65
5	0.79	136.58	6	0.14	21.85
7	0.47	74.56	8	0.09	14.97
9	0.23	39.30	10	0.10	16.28
11	0.16	28.25			
13	0.14	22.04			
15	0.14	22.94			
17	0.12	20.49			
19	0.11	18.41			
21	0.11	18.48			
23	0.11	18.21			
25	0.10	17.14			
27	0.10	16.55			
29	0.09	16.40			
31	0.09	15.19			
33	0.09	14.73			
35	0.09	15.04			
37	0.09	15.22			
39	0.09	16.01			

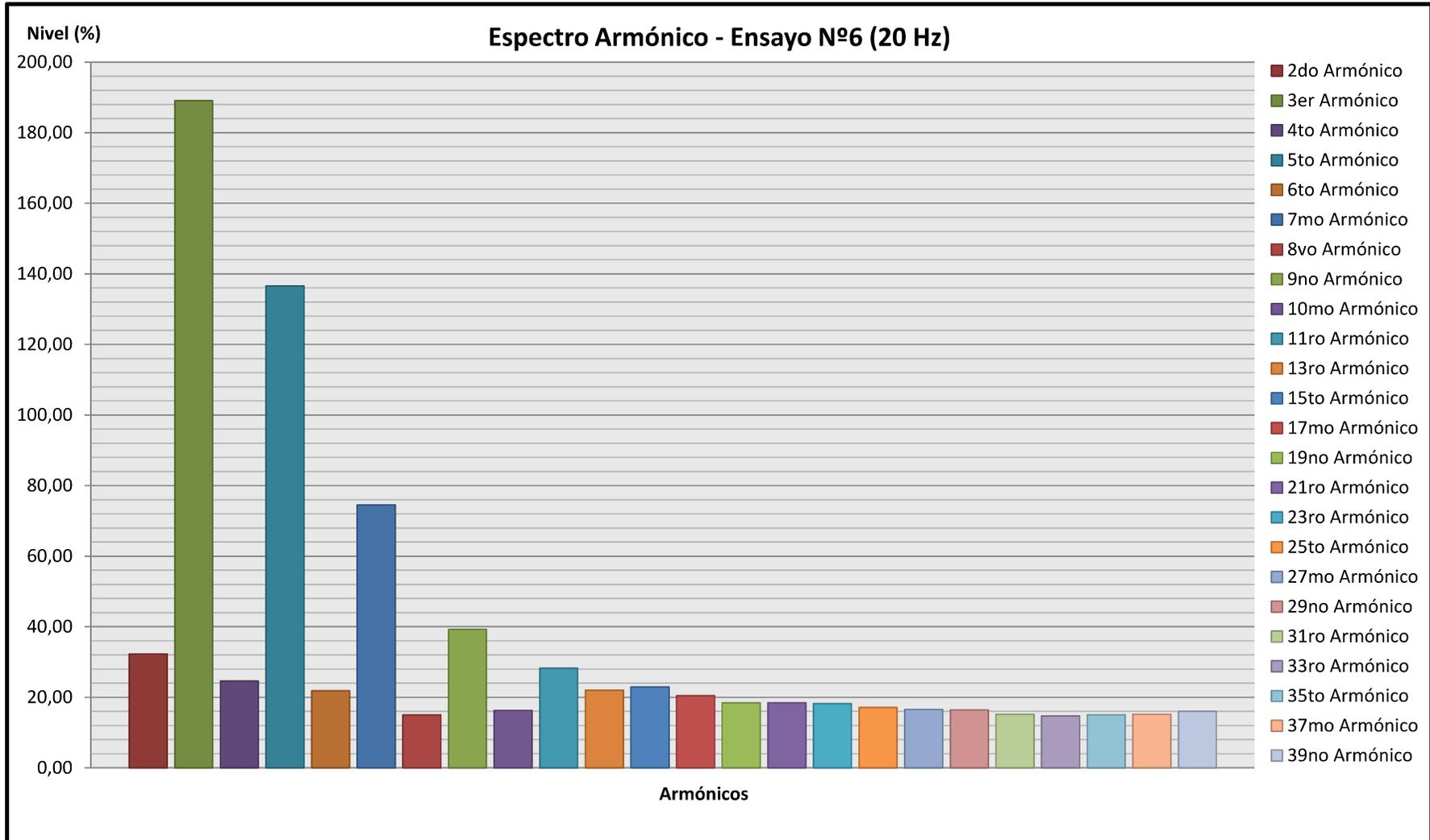
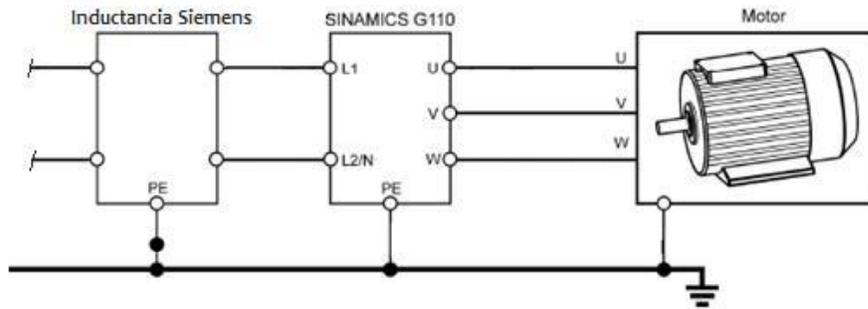


Figura 5.8: Espectro Armónico Ensayo N°6 (20Hz).

UNIVERSIDAD NACIONAL DE CÓRDOBA
 FACULTAD DE CIENCIAS EXACTAS FÍSICAS Y NATURALES

ESQUEMA DE CONEXIÓN N°2



MEDICIÓN ARMÓNICOS DE TENSIÓN

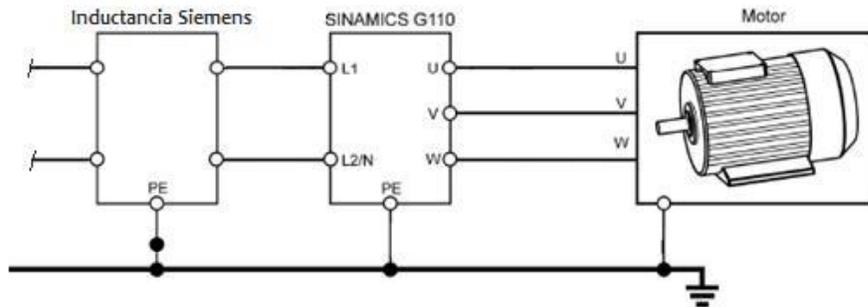
Ensayo N°4

Instrumento:	Metrel MI 2092
Software:	PowerLink / Excel
Fecha de ejecución:	15/12/17
Frecuencia de salida al motor:	50 Hz
V_{rms} (V)	215,74
V_{Fund} (V)	215,40
THDu (%)	1,76

Armónicos de Tensión						E4
Armónicos impares			Armónicos pares			
Orden de Armónico	Magnitud (V)	Nivel (%)	Orden de Armónico	Magnitud (V)	Nivel (%)	
1	215.40	100	2	0.00	0.00	
3	0.63	0.29	4	0.00	0.00	
5	1.99	0.93	6	0.00	0.00	
7	1.72	0.80	8	0.00	0.00	
9	1.29	0.60	10	0.00	0.00	
11	0.00	0.00				
13	0.00	0.00				
15	0.00	0.00				

UNIVERSIDAD NACIONAL DE CÓRDOBA
 FACULTAD DE CIENCIAS EXACTAS FÍSICAS Y NATURALES

ESQUEMA DE CONEXIÓN N°2



MEDICIÓN ARMÓNICOS DE TENSIÓN

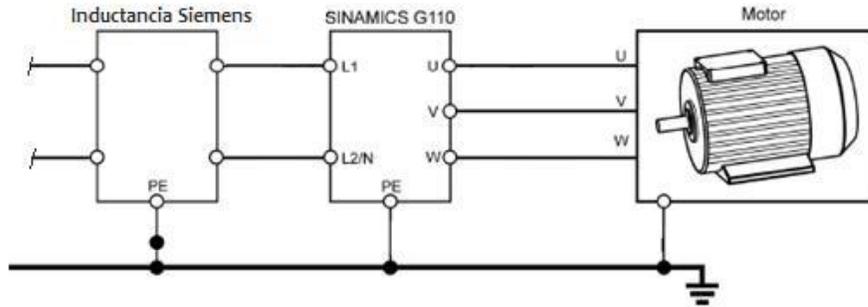
Ensayo N°5

Instrumento:	Metrel MI 2092
Software:	PowerLink / Excel
Fecha de ejecución:	15/12/17
Frecuencia de salida al motor:	35 Hz
V_{rms} (V)	217,60
V_{Fund} (V)	217,21
THDu (%)	1,67

Armónicos de Tensión					E5
Armónicos impares			Armónicos pares		
Orden de Armónico	Magnitud (V)	Nivel (%)	Orden de Armónico	Magnitud (V)	Nivel (%)
1	217.21	100	2	0.00	0.00
3	0.59	0.27	4	0.00	0.00
5	1.95	0.90	6	0.00	0.00
7	1.52	0.70	8	0.00	0.00
9	1.30	0.60	10	0.00	0.00
11	0.00	0.00			
13	0.00	0.00			
15	0.00	0.00			

UNIVERSIDAD NACIONAL DE CÓRDOBA
 FACULTAD DE CIENCIAS EXACTAS FÍSICAS Y NATURALES

ESQUEMA DE CONEXIÓN N°2



MEDICIÓN ARMÓNICOS DE TENSIÓN

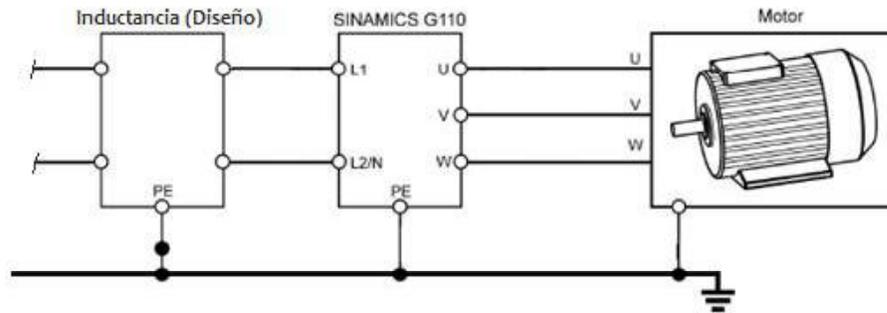
Ensayo N°6

Instrumento:	Metrel MI 2092
Software:	PowerLink / Excel
Fecha de ejecución:	15/12/17
Frecuencia de salida al motor:	20 Hz
V_{rms} (V)	217,30
V_{Fund} (V)	216,84
THDu (%)	1,66

Armónicos de Tensión			E6		
Armónicos impares			Armónicos pares		
Orden de Armónico	Magnitud (V)	Nivel (%)	Orden de Armónico	Magnitud (V)	Nivel (%)
1	216.84	100	2	0.00	0.00
3	1.04	0.48	4	0.00	0.00
5	1.52	0.70	6	0.00	0.00
7	1.52	0.70	8	0.00	0.00
9	1.52	0.70	10	0.00	0.00
11	0.00	0.00			
13	0.00	0.00			
15	0.00	0.00			

UNIVERSIDAD NACIONAL DE CÓRDOBA
 FACULTAD DE CIENCIAS EXACTAS FÍSICAS Y NATURALES

ESQUEMA DE CONEXIÓN N°3



MEDICIÓN ARMÓNICOS DE CORRIENTE

Ensayo N°7

Instrumento:	Metrel MI 2092
Software:	PowerLink / Excel
Fecha de ejecución:	15/12/17
Frecuencia de salida al motor:	50 Hz
I_{rms} (A)	4,97
I_{Fund} (A)	2,44
THDi (%)	173,66

Armónicos de Corriente			E7		
Armónicos impares			Armónicos pares		
Orden de Armónico	Magnitud (A)	Nivel (%)	Orden de Armónico	Magnitud (A)	Nivel (%)
1	2.44	100	2	0.14	5.59
3	2.53	103.93	4	0.11	4.34
5	2.16	88.68	6	0.11	4.43
7	1.79	73.11	8	0.09	3.73
9	1.41	57.57	10	0.10	3.97
11	1.09	44.48			
13	0.81	32.88			
15	0.41	16.49			
17	0.24	9.55			
19	0.18	7.21			
21	0.15	6.11			
23	0.14	5.74			
25	0.13	5.23			
27	0.12	4.75			
29	0.10	4.04			
31	0.08	3.27			
33	0.07	2.69			
35	0.07	2.66			
37	0.07	2.68			
39	0.07	2.73			

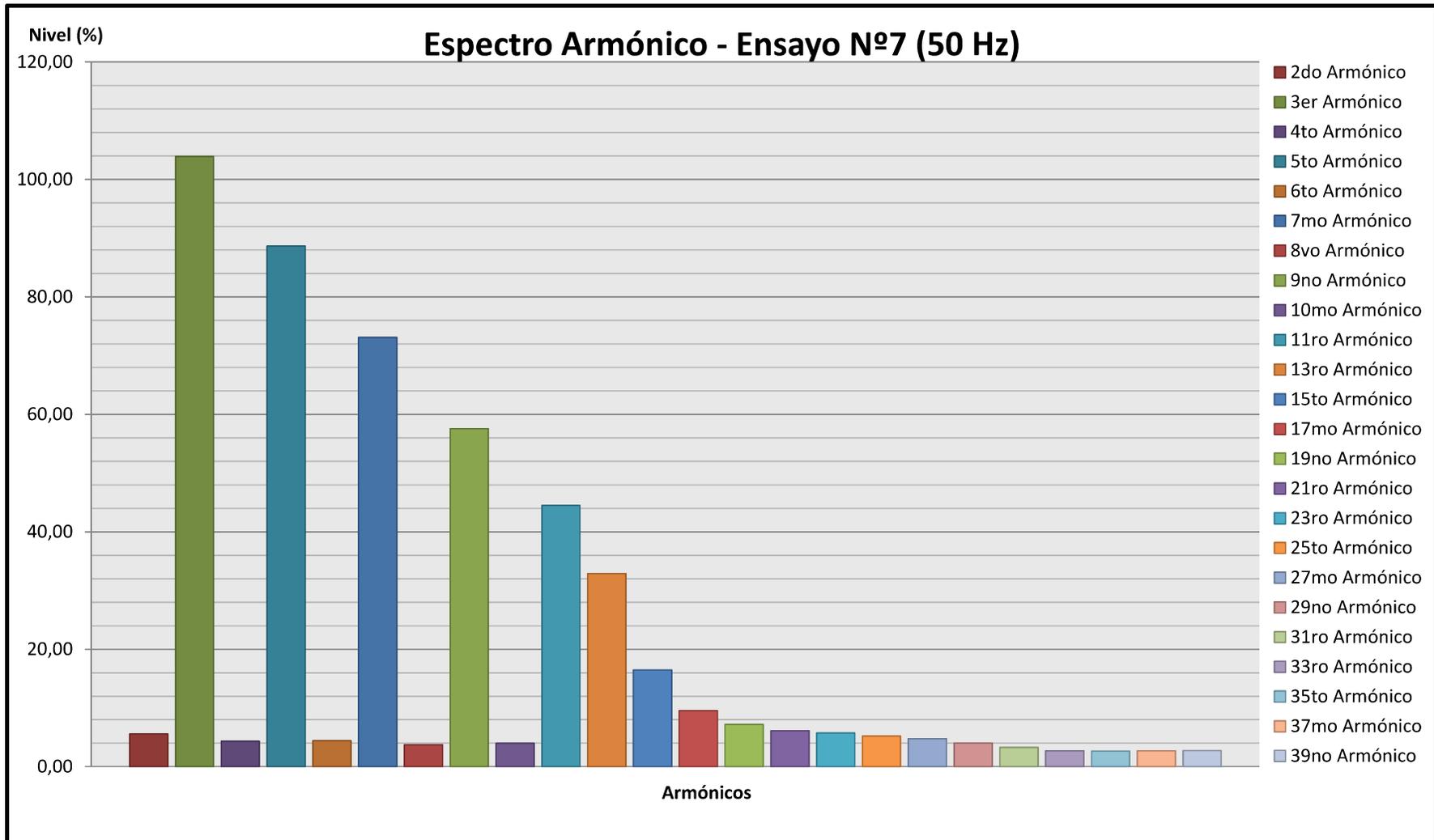
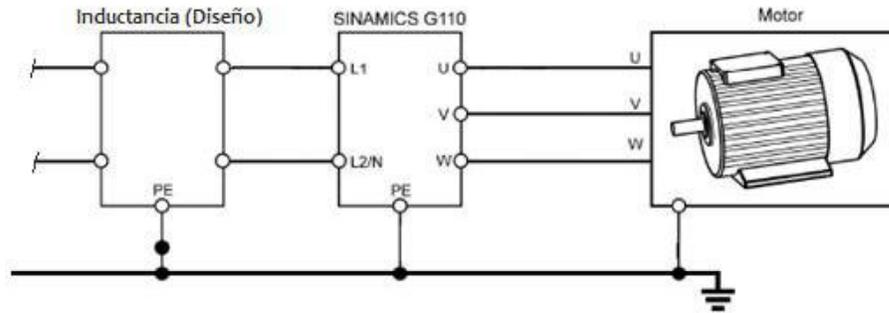


Figura 5.9: Espectro Armónico Ensayo N°7 (50Hz).

UNIVERSIDAD NACIONAL DE CÓRDOBA
 FACULTAD DE CIENCIAS EXACTAS FÍSICAS Y NATURALES

ESQUEMA DE CONEXIÓN N°3



MEDICIÓN ARMÓNICOS DE CORRIENTE

Ensayo N°8

Instrumento:	Metrel MI 2092
Software:	PowerLink / Excel
Fecha de ejecución:	15/12/17
Frecuencia de salida al motor:	35 Hz

I _{rms} (A)	3,03
I _{Fund} (A)	1,18
THDi (%)	212,08

Armónicos de Corriente			E8		
Armónicos impares			Armónicos pares		
Orden de Armónico	Magnitud (A)	Nivel (%)	Orden de Armónico	Magnitud (A)	Nivel (%)
1	1.18	100	2	0.22	17.90
3	1.45	122.81	4	0.17	13.92
5	1.25	105.51	6	0.16	13.20
7	1.01	86.48	8	0.14	11.01
9	0.84	71.16	10	0.13	10.70
11	0.72	60.03			
13	0.46	36.92			
15	0.29	23.89			
17	0.22	17.52			
19	0.17	13.16			
21	0.13	10.21			
23	0.10	7.94			
25	0.08	6.21			
27	0.07	5.61			
29	0.07	5.34			
31	0.07	5.35			
33	0.06	5.07			
35	0.06	5.26			
37	0.06	5.21			
39	0.06	5.31			

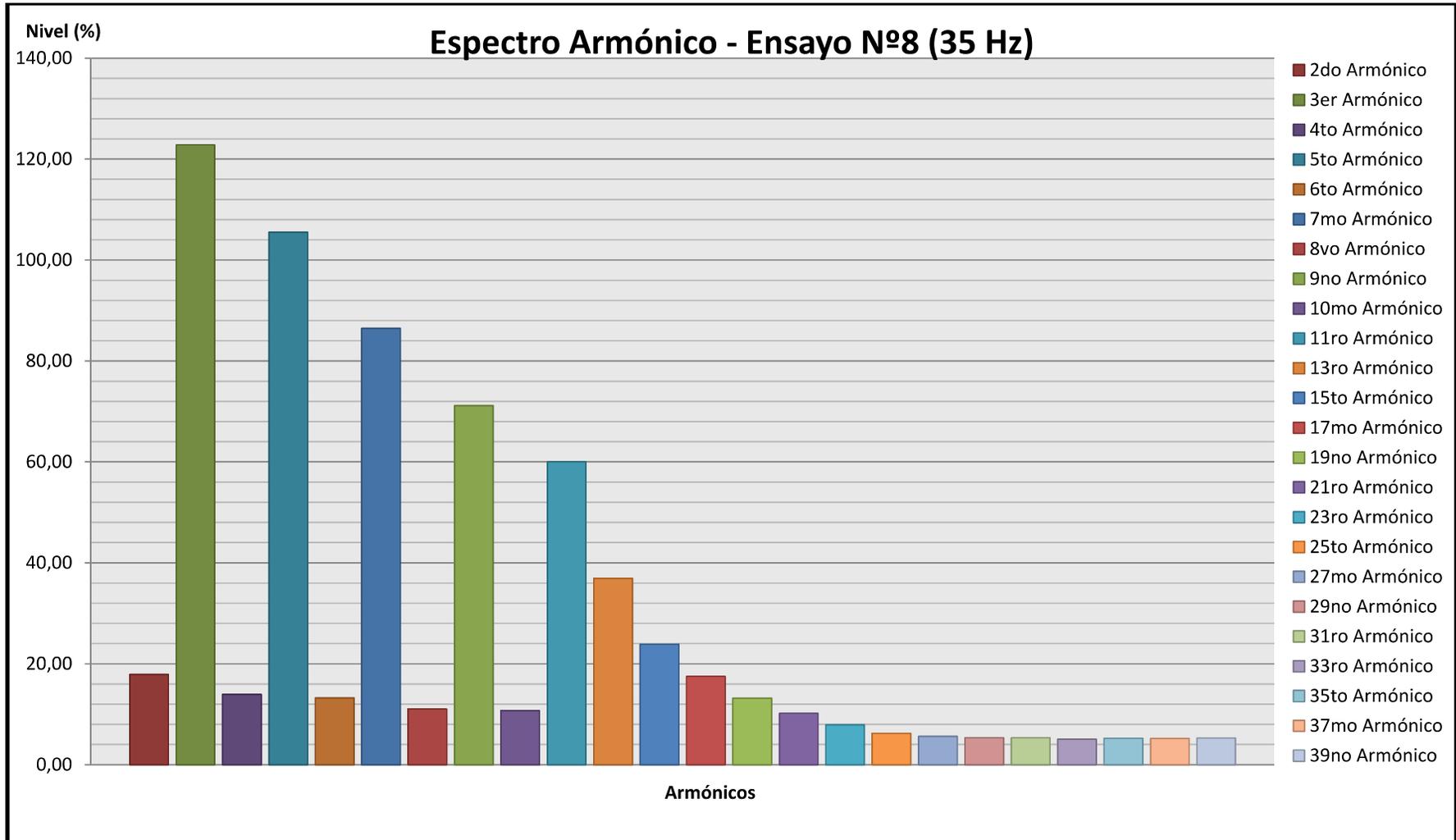
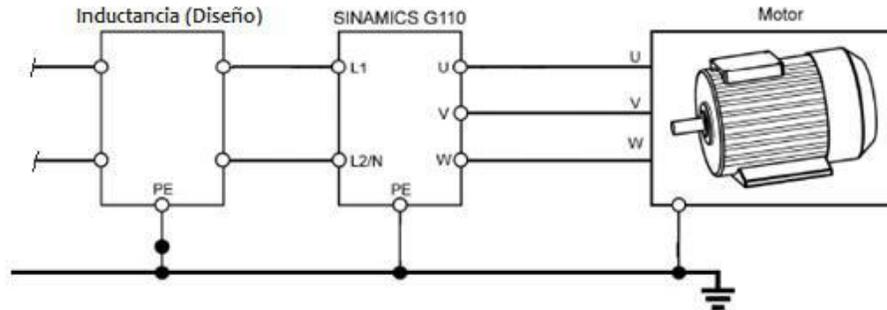


Figura 5.10: Espectro Armónico Ensayo N°8 (35 Hz).

UNIVERSIDAD NACIONAL DE CÓRDOBA
 FACULTAD DE CIENCIAS EXACTAS FÍSICAS Y NATURALES

ESQUEMA DE CONEXIÓN N°3



MEDICIÓN ARMÓNICOS DE CORRIENTE

Ensayo N°9

Instrumento:	Metrel MI 2092
Software:	PowerLink / Excel
Fecha de ejecución:	15/12/17
Frecuencia de salida al motor:	20 Hz

I _{rms} (A)	2,13
I _{Fund} (A)	0.49
THDi (%)	211,05

Armónicos de Corriente			E9		
Armónicos impares			Armónicos pares		
Orden de Armónico	Magnitud (A)	Nivel (%)	Orden de Armónico	Magnitud (A)	Nivel (%)
1	0.49	100	2	0.38	57.08
3	0.88	180.93	4	0.26	47.38
5	0.63	138.93	6	0.22	43.40
7	0.51	91.27	8	0.16	40.50
9	0.32	81.96	10	0.14	37.98
11	0.26	71.28			
13	0.21	59.02			
15	0.16	39.79			
17	0.14	35.95			
19	0.12	32.93			
21	0.11	31.00			
23	0.10	25.89			
25	0.09	25.76			
27	0.08	22.65			
29	0.08	23.67			
31	0.07	23.60			
33	0.07	23.02			
35	0.07	22.02			
37	0.08	21.33			
39	0.07	21.80			

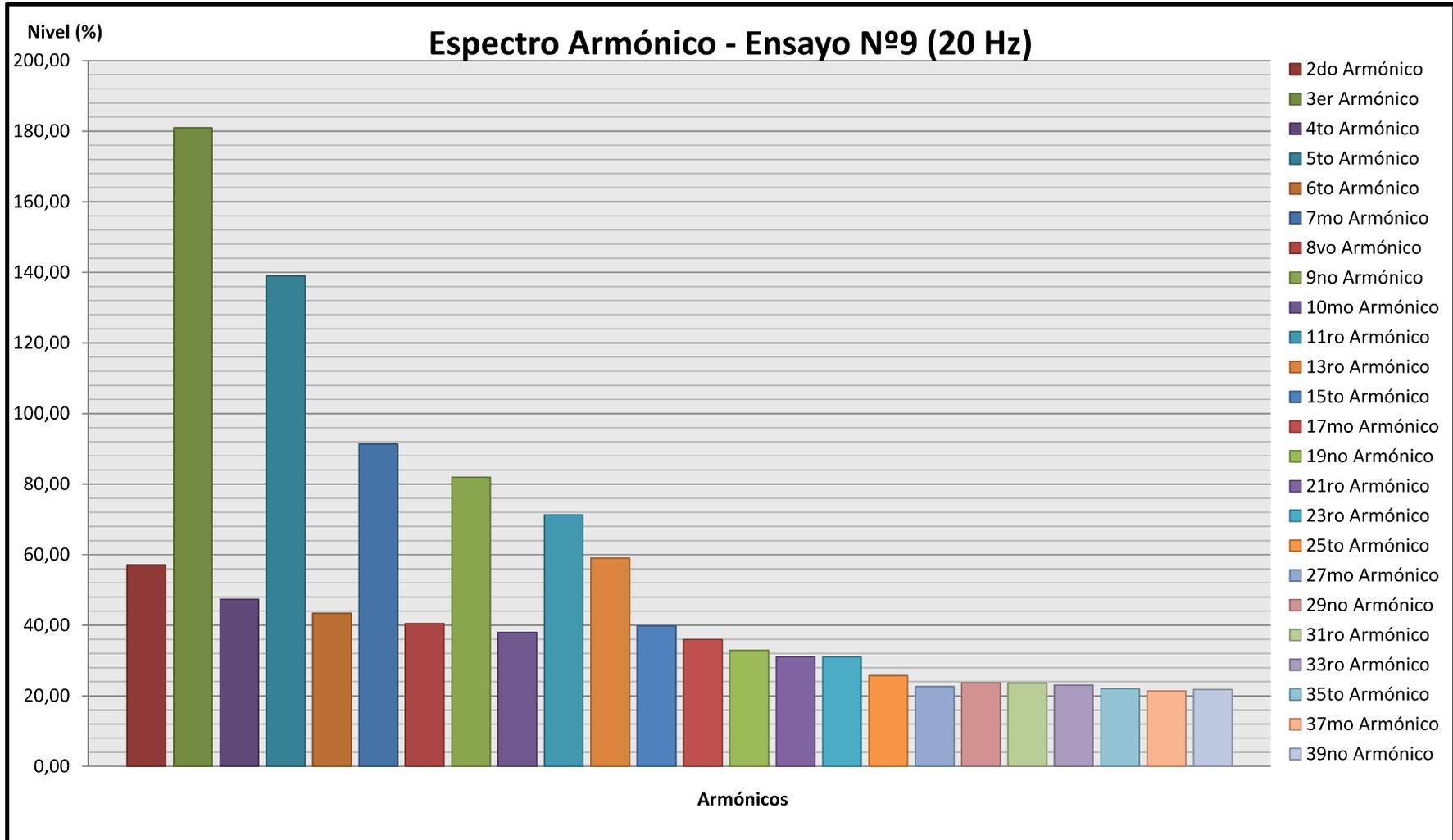
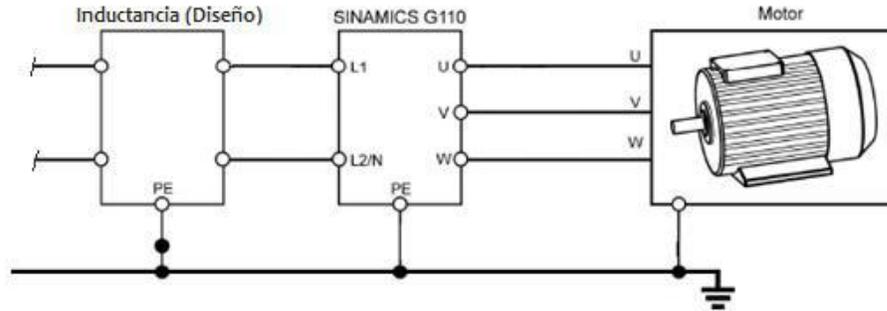


Figura 5.11: Espectro Armónico Ensayo N°9 (20 Hz).

UNIVERSIDAD NACIONAL DE CÓRDOBA
 FACULTAD DE CIENCIAS EXACTAS FÍSICAS Y NATURALES

ESQUEMA DE CONEXIÓN N°3



MEDICIÓN ARMÓNICOS DE TENSIÓN

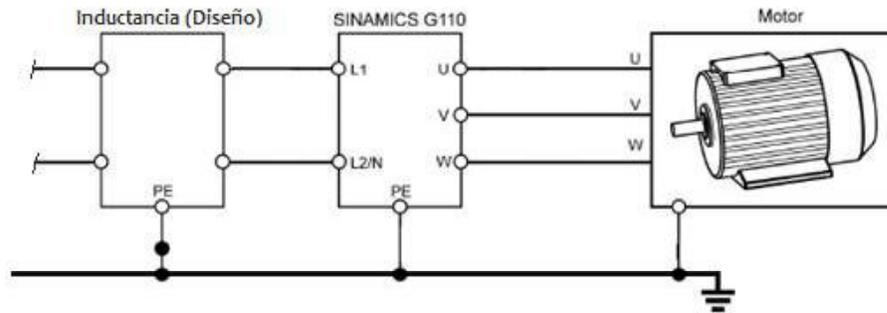
Ensayo N°7

Instrumento:	Metrel MI 2092
Software:	PowerLink / Excel
Fecha de ejecución:	15/12/17
Frecuencia de salida al motor:	50 Hz
V_{rms} (V)	223,24
V_{Fund} (V)	222,97
THDu (%)	2,65

Armónicos de Tensión						E7
Armónicos impares			Armónicos pares			
Orden de Armónico	Magnitud (V)	Nivel (%)	Orden de Armónico	Magnitud (V)	Nivel (%)	
1	222.97	100	2	0.00	0.00	
3	0.34	0.15	4	0.00	0.00	
5	4.90	2.20	6	0.00	0.00	
7	1.42	0.64	8	0.00	0.00	
9	0.66	0.30	10	0.00	0.00	
11	0.36	0.16				
13	0.23	0.10				
15	0.00	0.00				

UNIVERSIDAD NACIONAL DE CÓRDOBA
 FACULTAD DE CIENCIAS EXACTAS FÍSICAS Y NATURALES

ESQUEMA DE CONEXIÓN N°3



MEDICIÓN ARMÓNICOS DE TENSIÓN

Ensayo N°8

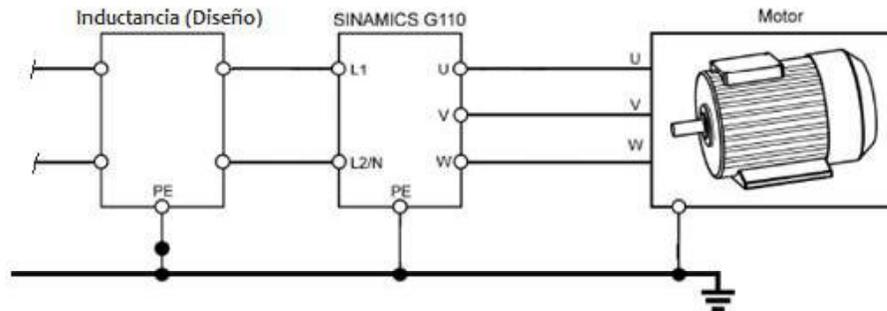
Instrumento:	Metrel MI 2092
Software:	PowerLink / Excel
Fecha de ejecución:	15/12/17
Frecuencia de salida al motor:	35 Hz

V_{rms} (V)	224,10
V_{Fund}(V)	223,75
THDu (%)	2,31

Armónicos de Tensión					E8
Armónicos impares			Armónicos pares		
Orden de Armónico	Magnitud (V)	Nivel (%)	Orden de Armónico	Magnitud (V)	Nivel (%)
1	223.75	100	2	0.00	0.00
3	0.13	0.06	4	0.00	0.00
5	4.47	2.00	6	0.00	0.00
7	0.45	0.20	8	0.00	0.00
9	0.39	0.18	10	0.00	0.00
11	0.00	0.00			
13	0.00	0.00			
15	0.00	0.00			

UNIVERSIDAD NACIONAL DE CÓRDOBA
 FACULTAD DE CIENCIAS EXACTAS FÍSICAS Y NATURALES

ESQUEMA DE CONEXIÓN N°3



MEDICIÓN ARMÓNICOS DE TENSIÓN

Ensayo N°9

Instrumento:	Metrel MI 2092
Software:	PowerLink / Excel
Fecha de ejecución:	15/12/17
Frecuencia de salida al motor:	20 Hz
V_{rms} (V)	224,05
V_{Fund} (V)	223,59
THDu (%)	2,24

Armónicos de Tensión			E9		
Armónicos impares			Armónicos pares		
Orden de Armónico	Magnitud (V)	Nivel (%)	Orden de Armónico	Magnitud (V)	Nivel (%)
1	223.59	100	2	0.00	0.00
3	0.23	0.10	4	0.00	0.00
5	4.30	1.92	6	0.00	0.00
7	0.30	0.13	8	0.00	0.00
9	0.46	0.21	10	0.00	0.00
11	0.00	0.00			
13	0.00	0.00			
15	0.00	0.00			

5.3.3. COMPARACIÓN DE RESULTADOS

5.3.3.1. Modalidad

En este apartado se exponen tablas a modo de resumen y comparación de resultados de los diferentes ensayos, además de gráficos que permiten visualizar los mismos, para posteriormente realizar un análisis y comparación de los armónicos generados y sus comportamientos.

La modalidad empleada para la comparación y análisis consiste en la exposición de los resultados obtenidos en diferentes gráficos, según dos criterios. Uno de ellos refiere al comportamiento de las componentes armónicas en cada uno de los esquemas de conexión o circuitos que ya han sido presentados, conforme se varía la frecuencia de salida del variador. Para visualizar esto último se utilizó solamente las componentes armónicas de orden impar ya que en ellas se observa mejor el fenómeno. El otro criterio abordado intenta poner en evidencia los diferentes esquemas de conexión ensayados, comparando las componentes armónicas obtenidas en cada uno de ellos para cada valor de frecuencia de salida del variador de velocidad. Este último planteo es aplicado a las componentes armónicas de orden impar y de orden par por separado y tanto a los armónicos de corriente como a los armónicos de tensión, donde además se incluyen en la comparación los límites dados por la Norma IEC 61000-3-2 y la Norma IEC 61000-2-2 respectivamente.

		Armónicos de Corriente																			
		Armónicos impares																			
		Orden de Armónico	3er	5to	7mo	9no	11ro	13ro	15to	17mo	19no	21ro	23ro	25to	27mo	29no	31ro	33ro	35to	37mo	39no
Límites por Norma 61000-3-2		Magnitud (A)	2,3	1,14	0,77	0,4	0,33	0,21	0,15	0,13	0,12	0,11	0,10	0,09	0,08	0,08	0,07	0,07	0,06	0,06	0,06
EC N°1	Ensayo N°1 50 Hz	Magnitud (A)	3,01	2,46	1,82	1,21	0,74	0,30	0,23	0,22	0,21	0,18	0,14	0,10	0,09	0,09	0,09	0,08	0,07	0,06	0,06
		Nivel (%)	100,52	82,28	60,31	40,03	24,45	9,82	7,54	7,12	6,88	6,05	4,56	3,39	2,96	2,93	2,81	2,47	2,22	2,06	2,08
	Ensayo N°2 35 Hz	Magnitud (A)	1,73	1,43	1,08	0,74	0,27	0,17	0,17	0,16	0,14	0,10	0,09	0,09	0,10	0,08	0,07	0,06	0,07	0,07	0,07
		Nivel (%)	115,57	94,37	70,93	47,72	17,63	11,14	10,72	10,31	8,99	6,46	5,92	5,96	6,21	5,29	4,55	4,07	4,25	4,25	4,17
	Ensayo N°3 20 Hz	Magnitud (A)	1,10	0,91	0,75	0,50	0,26	0,17	0,12	0,11	0,11	0,11	0,10	0,09	0,08	0,08	0,08	0,08	0,08	0,08	0,08
		Nivel (%)	194,66	166,53	132,93	81,51	45,16	29,95	20,40	17,68	18,04	17,90	15,92	14,15	13,55	13,20	13,44	12,95	12,45	12,59	12,94
EC N°2	Ensayo N°4 50 Hz	Magnitud (A)	2,31	1,63	0,92	0,27	0,22	0,21	0,15	0,11	0,11	0,10	0,09	0,09	0,08	0,08	0,08	0,08	0,07	0,07	0,07
		Nivel (%)	98,13	68,99	38,73	11,44	8,99	8,61	6,15	4,81	4,81	4,25	3,75	3,61	3,38	3,28	3,20	3,17	3,11	3,11	3,11
	Ensayo N°5 35 Hz	Magnitud (A)	1,68	1,25	0,79	0,26	0,19	0,18	0,14	0,11	0,10	0,10	0,09	0,08	0,08	0,08	0,07	0,07	0,07	0,07	0,07
		Nivel (%)	104,83	77,73	48,54	15,81	11,28	10,71	8,74	6,69	6,34	5,88	5,32	4,94	4,85	4,57	4,33	4,28	4,41	4,27	4,28
	Ensayo N°6 20 Hz	Magnitud (A)	0,99	0,79	0,47	0,23	0,16	0,14	0,14	0,12	0,11	0,11	0,11	0,10	0,10	0,09	0,09	0,09	0,09	0,09	0,09
		Nivel (%)	189,06	136,58	74,56	39,30	28,25	22,04	22,94	20,49	18,41	18,48	18,21	17,14	16,55	16,40	15,19	14,73	15,04	15,22	16,01
EC N°3	Ensayo N°7 50 Hz	Magnitud (A)	2,53	2,16	1,79	1,41	1,09	0,81	0,41	0,24	0,18	0,15	0,14	0,13	0,12	0,10	0,08	0,07	0,07	0,07	
		Nivel (%)	103,93	88,68	73,11	57,57	44,48	32,88	16,49	9,55	7,21	6,11	5,74	5,23	4,75	4,04	3,27	2,69	2,66	2,68	2,73
	Ensayo N°8 35 Hz	Magnitud (A)	1,45	1,25	1,01	0,84	0,72	0,46	0,29	0,22	0,17	0,13	0,10	0,07	0,07	0,07	0,06	0,06	0,06	0,06	
		Nivel (%)	122,81	105,51	86,48	71,16	60,03	36,92	23,89	17,52	13,16	10,21	7,94	6,21	5,61	5,34	5,35	5,07	5,26	5,21	5,31
	Ensayo N°9 20 Hz	Magnitud (A)	0,88	0,63	0,51	0,32	0,26	0,21	0,16	0,14	0,12	0,11	0,10	0,09	0,08	0,08	0,07	0,07	0,07	0,08	
		Nivel (%)	180,93	138,93	91,27	81,96	71,28	59,02	39,79	35,95	32,93	31,00	25,89	25,76	22,65	23,67	23,60	23,02	22,02	21,33	21,80

Tabla 5.1: Resumen de armónicos de corriente impares.

		Armónicos de Corriente					
		Armónicos pares					
		Orden de Armónico	2do	4to	6to	8vo	10mo
Límites por Norma 61000-3-2		Magnitud (A)	1,08	0,43	0,3	0,23	0,18
EC N°1	Ensayo N°1 50 Hz	Magnitud (A)	0,13	0,10	0,10	0,08	0,08
		Nivel (%)	4,40	3,22	3,23	2,52	2,60
	Ensayo N°2 35 Hz	Magnitud (A)	0,14	0,10	0,10	0,07	0,08
		Nivel (%)	8,86	6,08	6,22	4,59	4,95
	Ensayo N°3 20 Hz	Magnitud (A)	0,18	0,14	0,13	0,10	0,10
		Nivel (%)	30,13	21,48	21,65	16,13	16,40
EC N°2	Ensayo N°4 50 Hz	Magnitud (A)	0,16	0,10	0,10	0,07	0,08
		Nivel (%)	6,54	4,17	3,99	2,96	3,33
	Ensayo N°5 35 Hz	Magnitud (A)	0,16	0,11	0,11	0,09	0,07
		Nivel (%)	9,55	6,40	6,40	5,68	4,36
	Ensayo N°6 20 Hz	Magnitud (A)	0,20	0,15	0,14	0,09	0,10
		Nivel (%)	32,30	24,65	21,85	14,97	16,28
EC N°3	Ensayo N°7 50 Hz	Magnitud (A)	0,14	0,11	0,11	0,09	0,10
		Nivel (%)	5,59	4,34	4,43	3,73	3,97
	Ensayo N°8 35 Hz	Magnitud (A)	0,22	0,17	0,16	0,14	0,13
		Nivel (%)	17,90	13,92	13,20	11,01	10,70
	Ensayo N°9 20 Hz	Magnitud (A)	0,38	0,26	0,22	0,16	0,14
		Nivel (%)	57,08	47,38	43,40	40,50	37,98

Tabla 5.2: Resumen de armónicos de corriente pares.

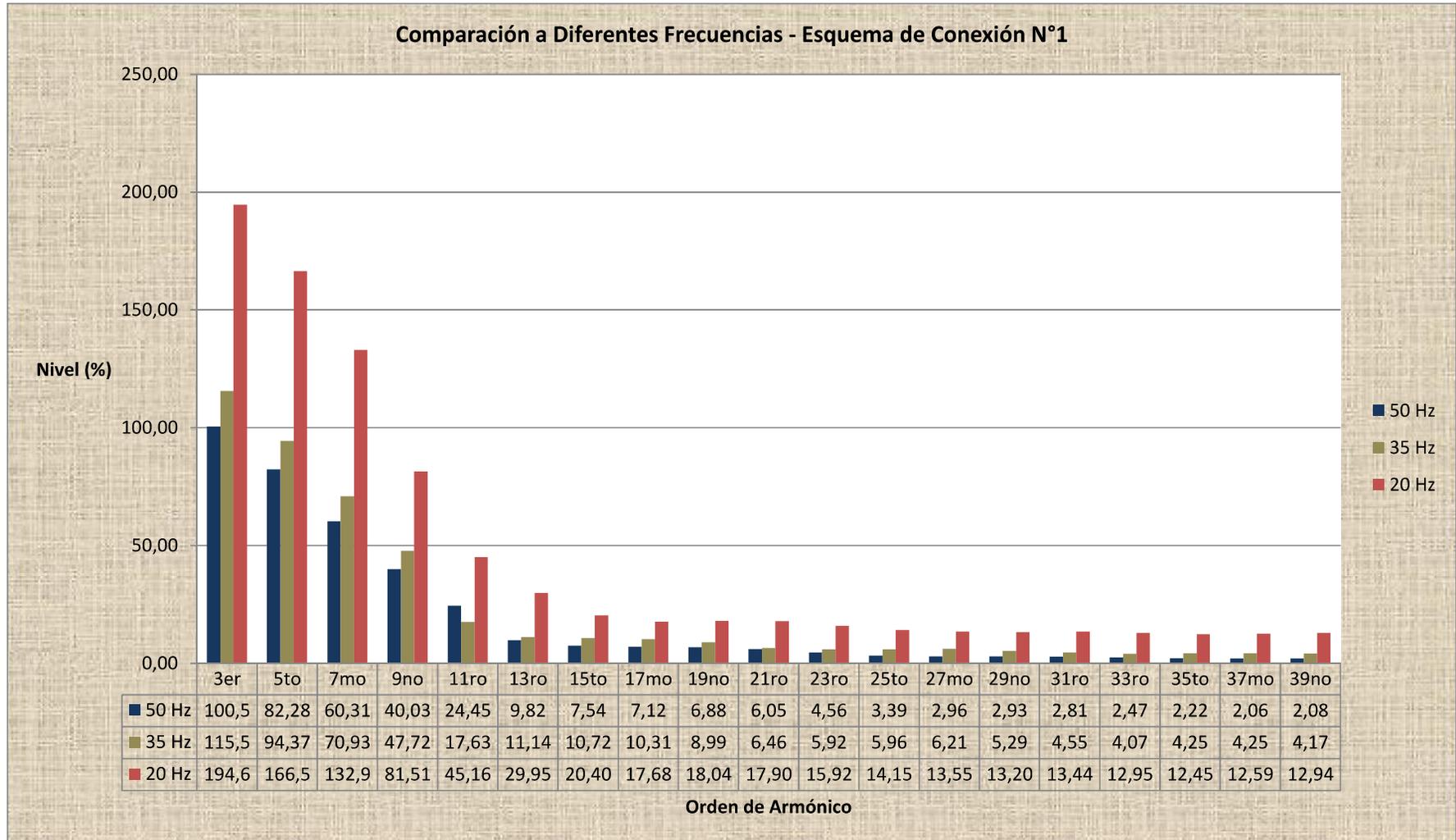


Figura 5.12: Nivel de componentes armónicas en Esquema de Conexión N°1 a diferentes frecuencias de salida del variador de velocidad.

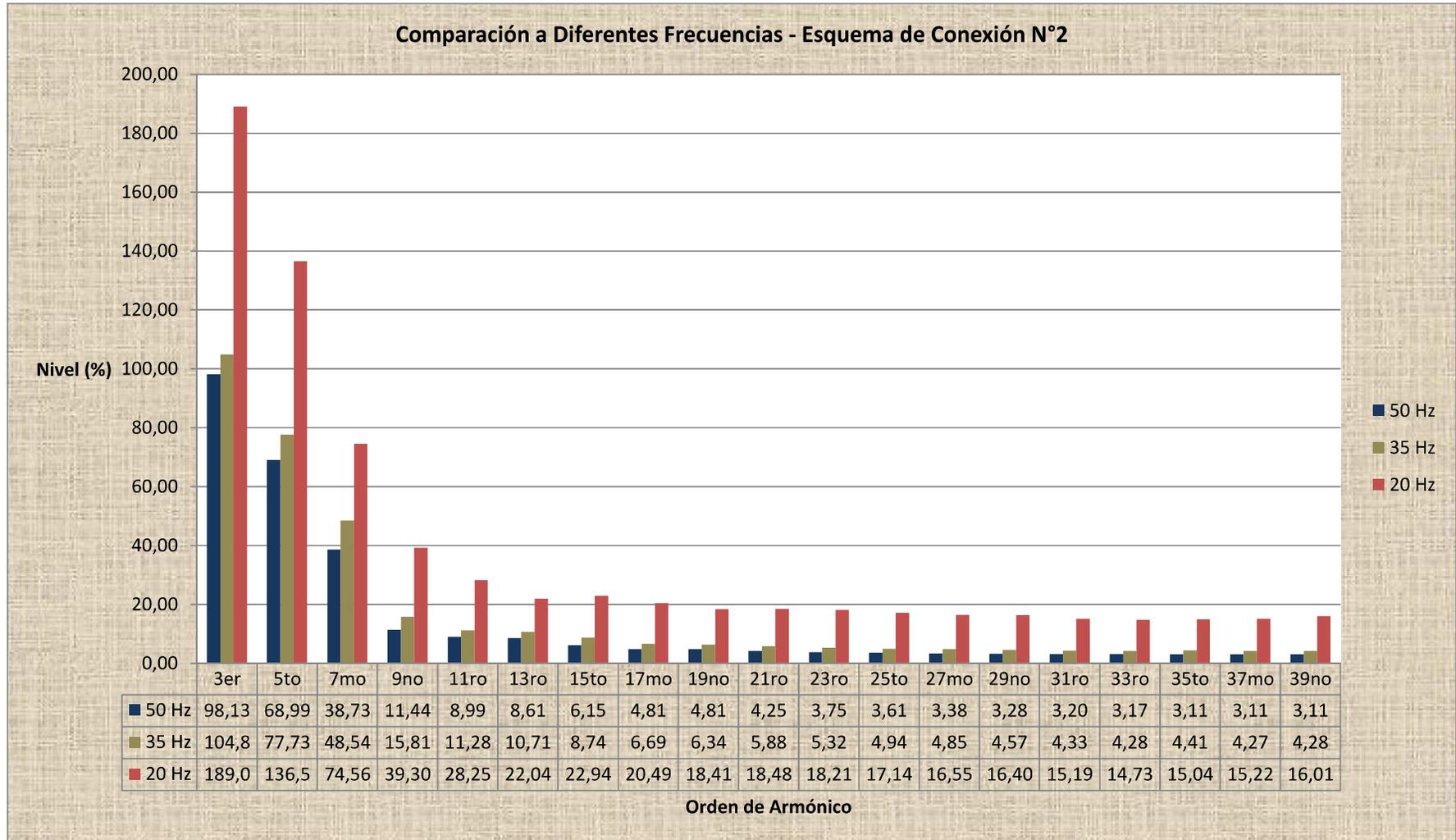


Figura 5.13: Nivel de componentes armónicas en Esquema de Conexión N°2 a diferentes frecuencias de salida del variador de velocidad.

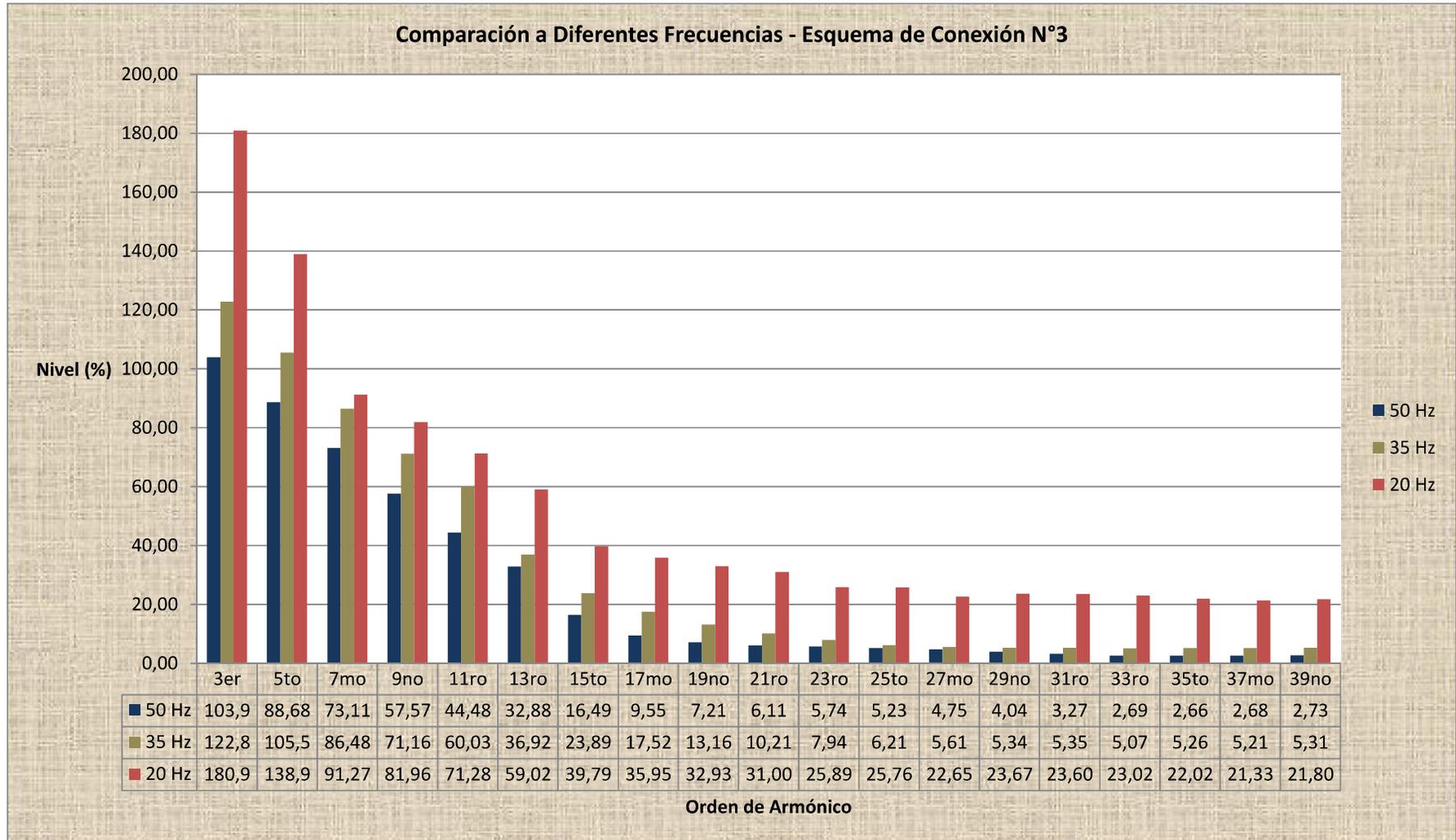


Figura 5.14: Nivel de componentes armónicas en Esquema de Conexión N°3 a diferentes frecuencias de salida del variador de velocidad..

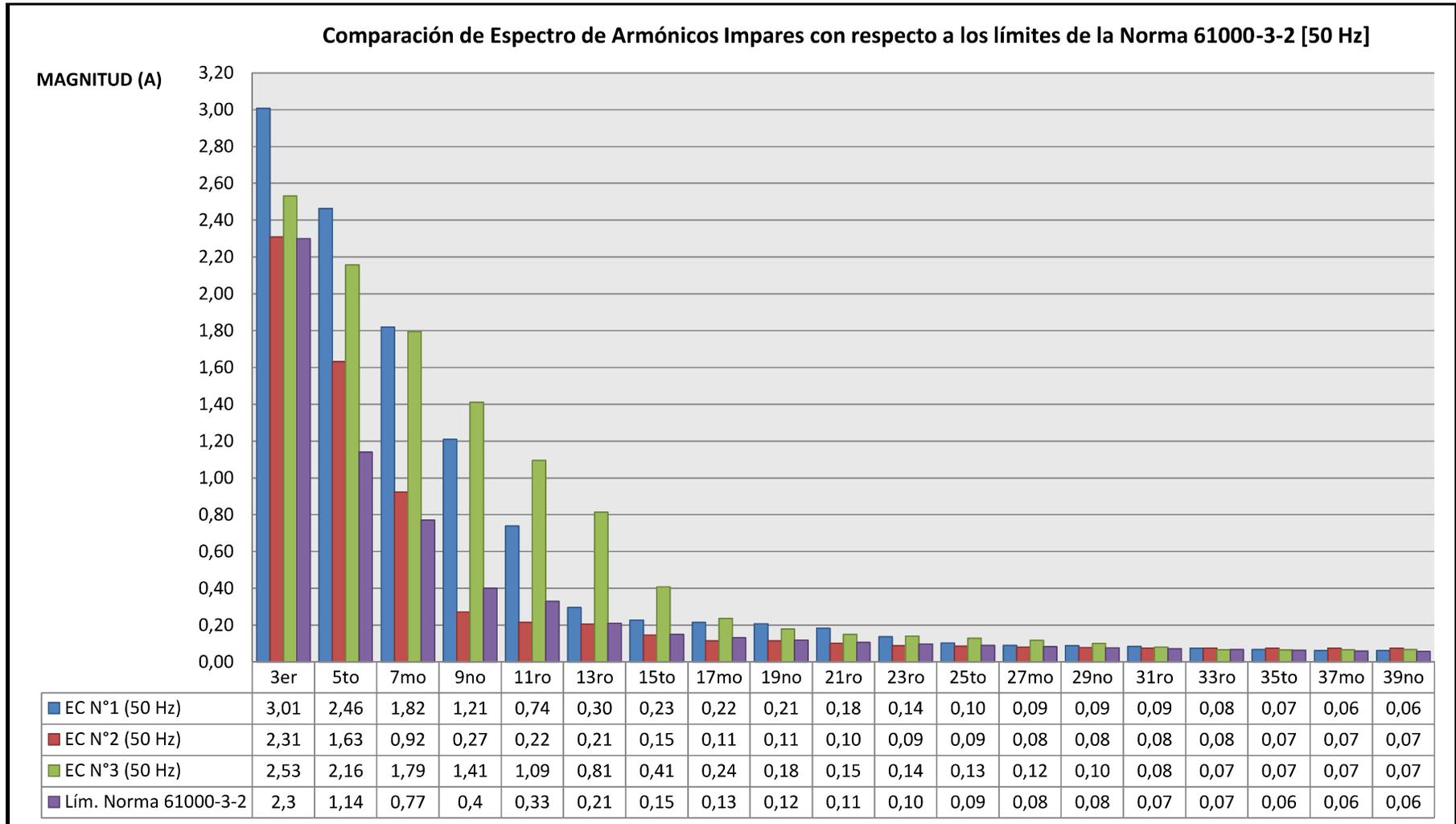


Figura 5.15: Espectro de armónicos de orden impar respecto a límites de la Norma IEC 61000-3-2 (Frecuencia de Salida 50 Hz).

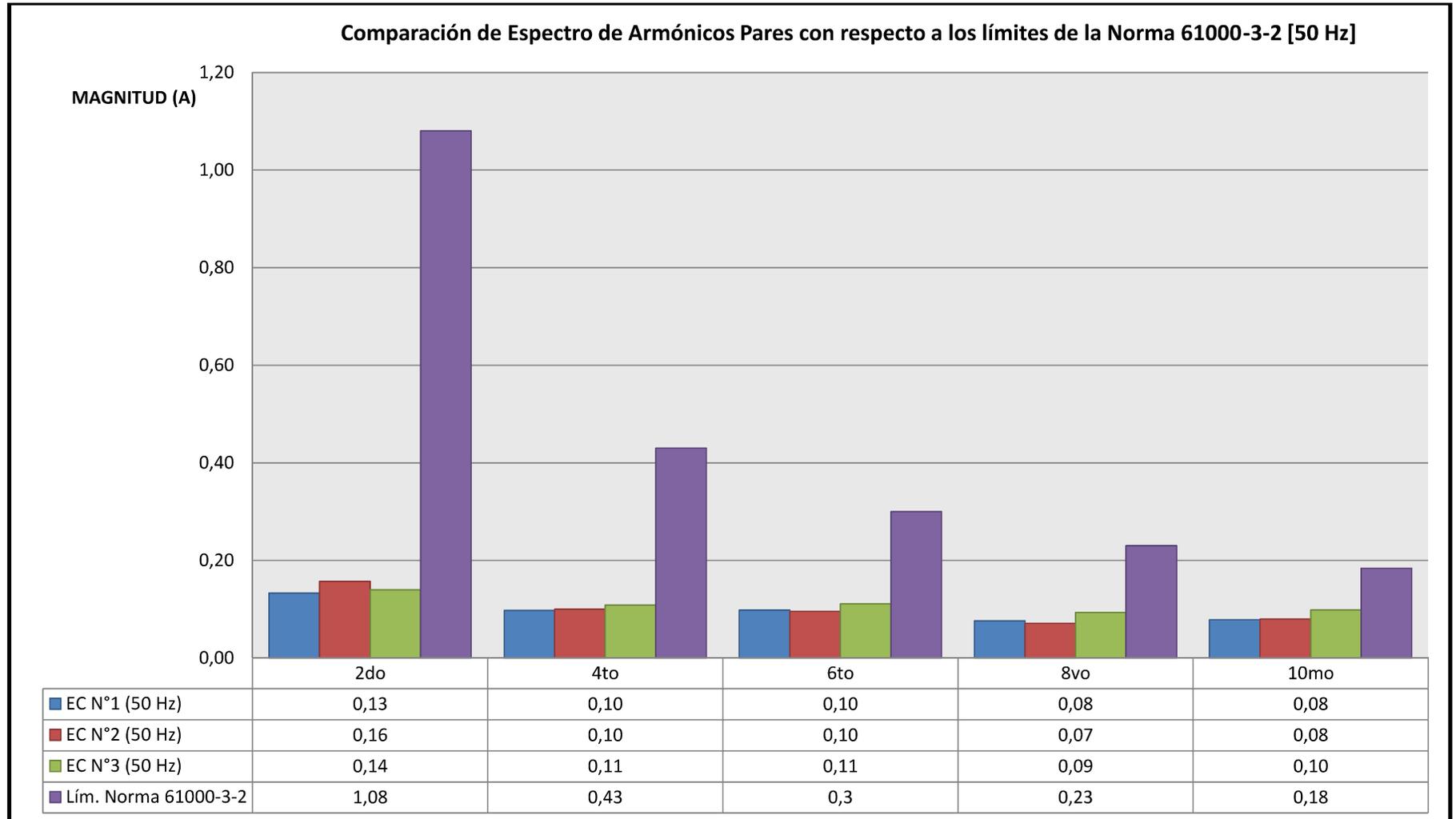


Figura 5.16: Espectro de armónicos de orden par respecto a límites de la Norma IEC 61000-3-2 (Frecuencia de Salida 50 Hz).

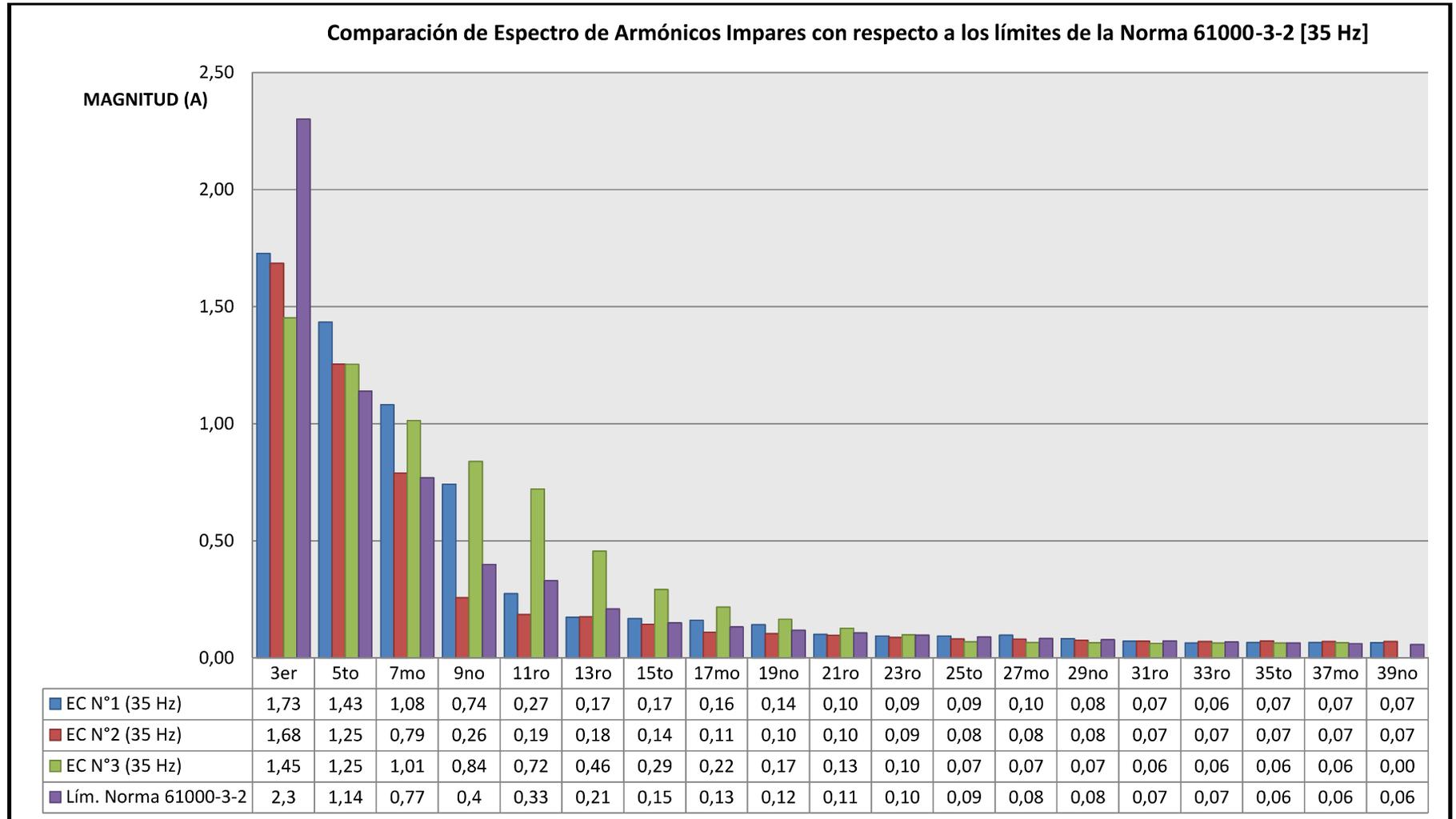


Figura 5.17: Espectro de armónicos de orden impar respecto a límites de la Norma IEC 61000-3-2 (Frecuencia de Salida 35 Hz).

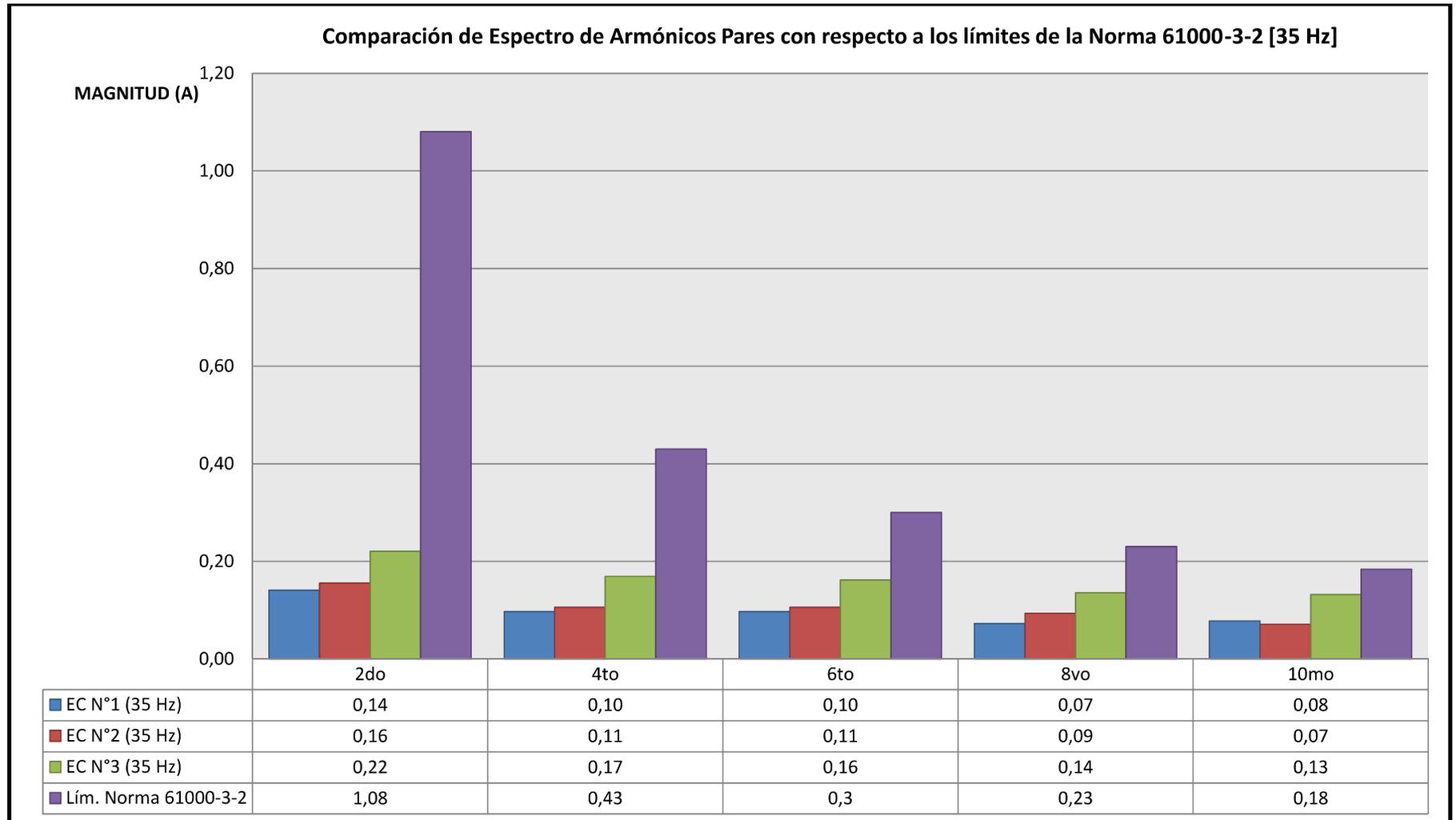


Figura 5.18: Espectro de armónicos de orden par respecto a límites de la Norma IEC 61000-3-2 (Frecuencia de Salida 35 Hz).

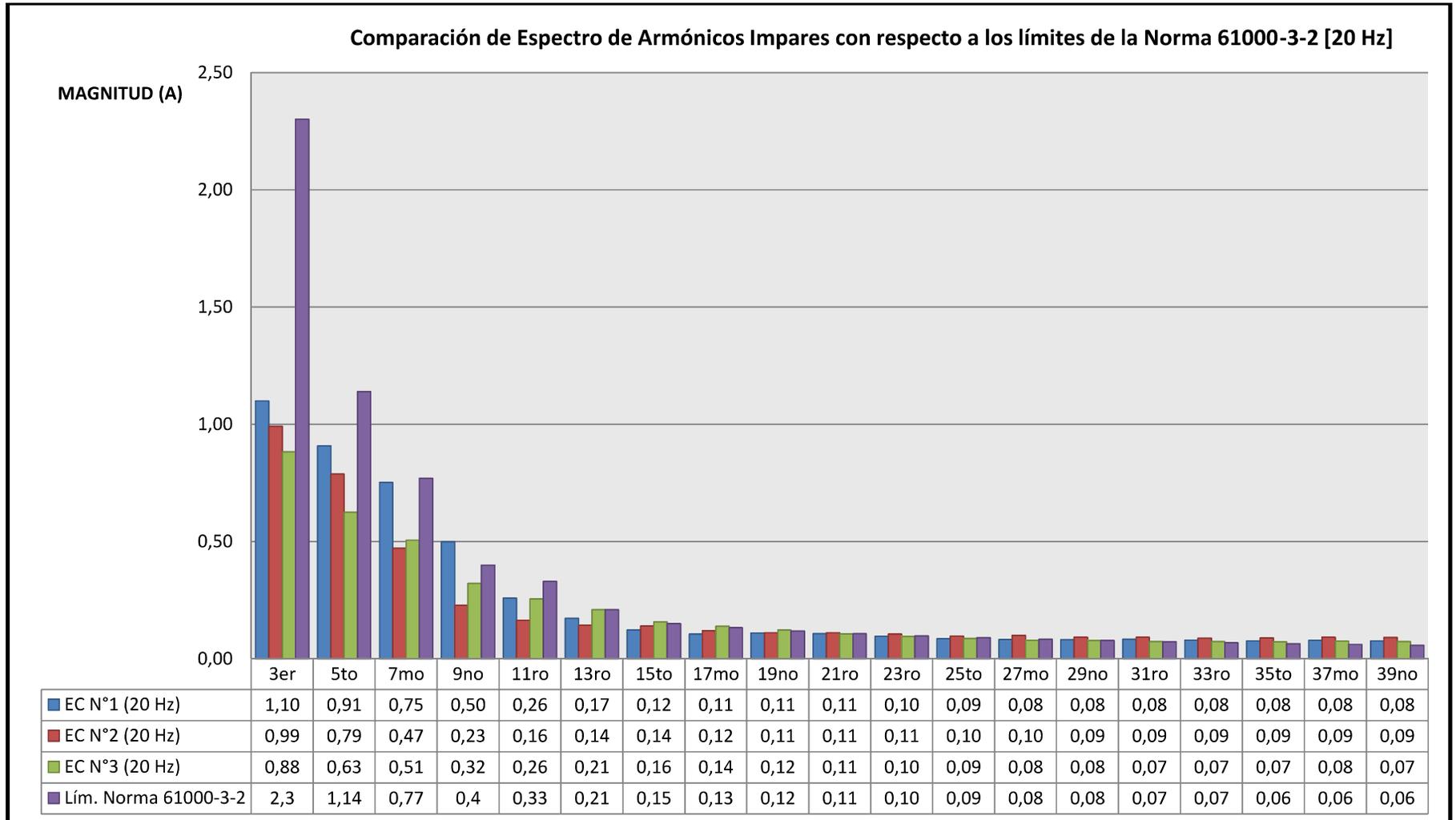


Figura 5.19: Espectro de armónicos de orden impar respecto a límites de la Norma IEC 61000-3-2 (Frecuencia de Salida 20 Hz).

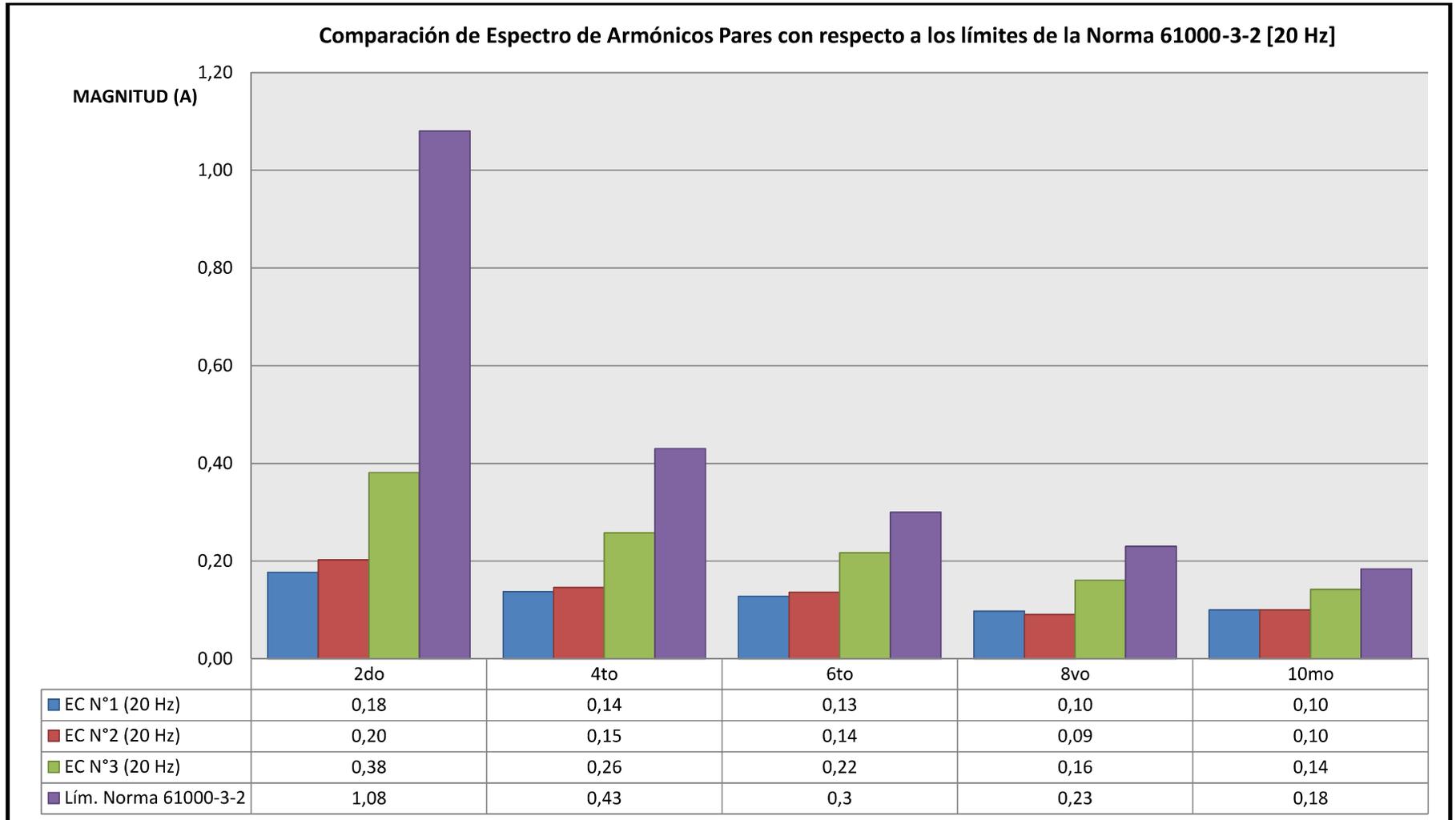


Figura 5.20: Espectro de armónicos de orden par respecto a límites de la Norma IEC 61000-3-2 (Frecuencia de Salida 20 Hz).

5.3.3.2. Análisis e interpretación de los resultados de corriente

En las figuras **5.12, 5.13, 5.14** se aprecia claramente el incremento del nivel de los armónicos generados por el variador de velocidad, a medida que disminuye el valor de frecuencia de salida del mismo con respecto a la frecuencia fundamental (50 Hz). Los armónicos generados al utilizar una frecuencia de salida de 20 Hz son mayores con respecto a aquellos generados con una frecuencia de salida de 35 Hz y 50 Hz. Este comportamiento se repite de igual manera en los tres esquemas de conexión utilizados. Puede apreciarse además un comportamiento decreciente del nivel armónico de forma cuasi exponencial conforme crece el orden armónico.

En las figuras **5.15, 5.17, 5.19** en las que se analizan las componentes armónicas impares de corriente a 50 Hz, 35 Hz y 20 Hz respectivamente se pone en evidencia que al no conectar un limitador de armónicos aguas arriba del variador en la instalación, no se cumple con los límites establecidos por la Norma IEC 61000-3-2 vigente. Caso contrario ocurre al utilizar el limitador de armónicos de la línea Siemens en la instalación, ya que este recorta la mayoría de los armónicos generados hasta valores por debajo de los límites establecidos por la Norma, por lo tanto, puede decirse que presenta un desempeño óptimo. Por otro lado, el desempeño del limitador diseñado frente a los armónicos generados no es el óptimo, ya que recorta en menor magnitud a los armónicos con respecto al limitador de la línea Siemens y en algunos casos la limitación no es lo suficientemente alta para cumplir con la Norma.

Se observa un comportamiento no deseado en los valores medidos con la bobina diseñada entre el orden armónico 9^{no} y el 17^{mo}. En dicho rango, se incrementa el nivel armónico con respecto al circuito sin la bobina. Podemos atribuir este comportamiento a la posible existencia de capacidades parásitas (capacidad no deseada que se forma por una diferencia de potencial separada por un dieléctrico) formadas en el elemento.

En las figuras **5.16, 5.18, 5.20** en las que se analizan las componentes armónicas pares de corriente a 50 Hz, 35 Hz y 20 Hz respectivamente, se muestra claramente que el variador de velocidad no genera armónicos de orden par lo suficientemente altos como para superar los límites establecidos por la Norma IEC 61000-3-2.

		Armónicos de Tensión							
		Armónicos impares							
		Orden de Armónico	3er	5to	7mo	9no	11ro	13ro	15to
Límites por Norma IEC 61000-2-2		Nivel (%)	5	6	5	1,5	3,5	3	0,3
EC N°1	Ensayo N°1 50 Hz	Magnitud (V)	2,29	2,74	2,49	2,28	0,34	0,00	0,00
		Nivel (%)	1,06	1,27	1,15	1,06	0,16	0,00	0,00
	Ensayo N°2 35 Hz	Magnitud (V)	1,86	2,45	1,71	2,26	0,22	0,00	0,00
		Nivel (%)	0,85	1,13	0,79	1,04	0,10	0,00	0,00
	Ensayo N°3 20 Hz	Magnitud (V)	1,57	2,08	1,69	2,09	0,20	0,00	0,00
		Nivel (%)	0,72	0,96	0,78	0,96	0,09	0,00	0,00
EC N°2	Ensayo N°4 50 Hz	Magnitud (V)	0,63	1,99	1,72	1,29	0,00	0,00	0,00
		Nivel (%)	0,29	0,93	0,80	0,60	0,00	0,00	0,00
	Ensayo N°5 35 Hz	Magnitud (V)	0,59	1,95	1,52	1,30	0,00	0,00	0,00
		Nivel (%)	0,27	0,90	0,70	0,60	0,00	0,00	0,00
	Ensayo N°6 20 Hz	Magnitud (V)	1,04	1,52	1,52	0,00	0,00	0,00	0,00
		Nivel (%)	0,48	0,70	0,70	0,70	0,00	0,00	0,00
EC N°3	Ensayo N°7 50 Hz	Magnitud (V)	0,34	4,90	1,42	0,66	0,36	0,23	0,00
		Nivel (%)	0,15	2,20	0,64	0,30	0,16	0,10	0,00
	Ensayo N°8 35 Hz	Magnitud (V)	0,13	4,47	0,45	0,39	0,00	0,00	0,00
		Nivel (%)	0,06	2,00	0,20	0,18	0,00	0,00	0,00
	Ensayo N°9 20 Hz	Magnitud (V)	0,23	4,30	0,30	0,46	0,00	0,00	0,00
		Nivel (%)	0,10	1,92	0,13	0,21	0,00	0,00	0,00

Tabla 5.3: Resumen de Armónicos de Tensión impares.

		Armónicos de Tensión					
		Armónicos pares					
		Orden de Armónico	2do	4to	6to	8vo	10mo
Límites por Norma IEC 61000-2-2		Magnitud (A)	2	1	0,5	0,5	0,20
EC N°1	Ensayo N°1 50 Hz	Magnitud (A)	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
		Nivel (%)	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	Ensayo N°2 35 Hz	Magnitud (A)	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
		Nivel (%)	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	Ensayo N°3 20 Hz	Magnitud (A)	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
		Nivel (%)	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
EC N°2	Ensayo N°4 50 Hz	Magnitud (A)	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
		Nivel (%)	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	Ensayo N°5 35 Hz	Magnitud (A)	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
		Nivel (%)	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	Ensayo N°6 20 Hz	Magnitud (A)	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
		Nivel (%)	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
EC N°3	Ensayo N°7 50 Hz	Magnitud (A)	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
		Nivel (%)	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	Ensayo N°8 35 Hz	Magnitud (A)	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
		Nivel (%)	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	Ensayo N°9 20 Hz	Magnitud (A)	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
		Nivel (%)	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

Tabla 5.4: Resumen de Armónicos de Tensión pares.

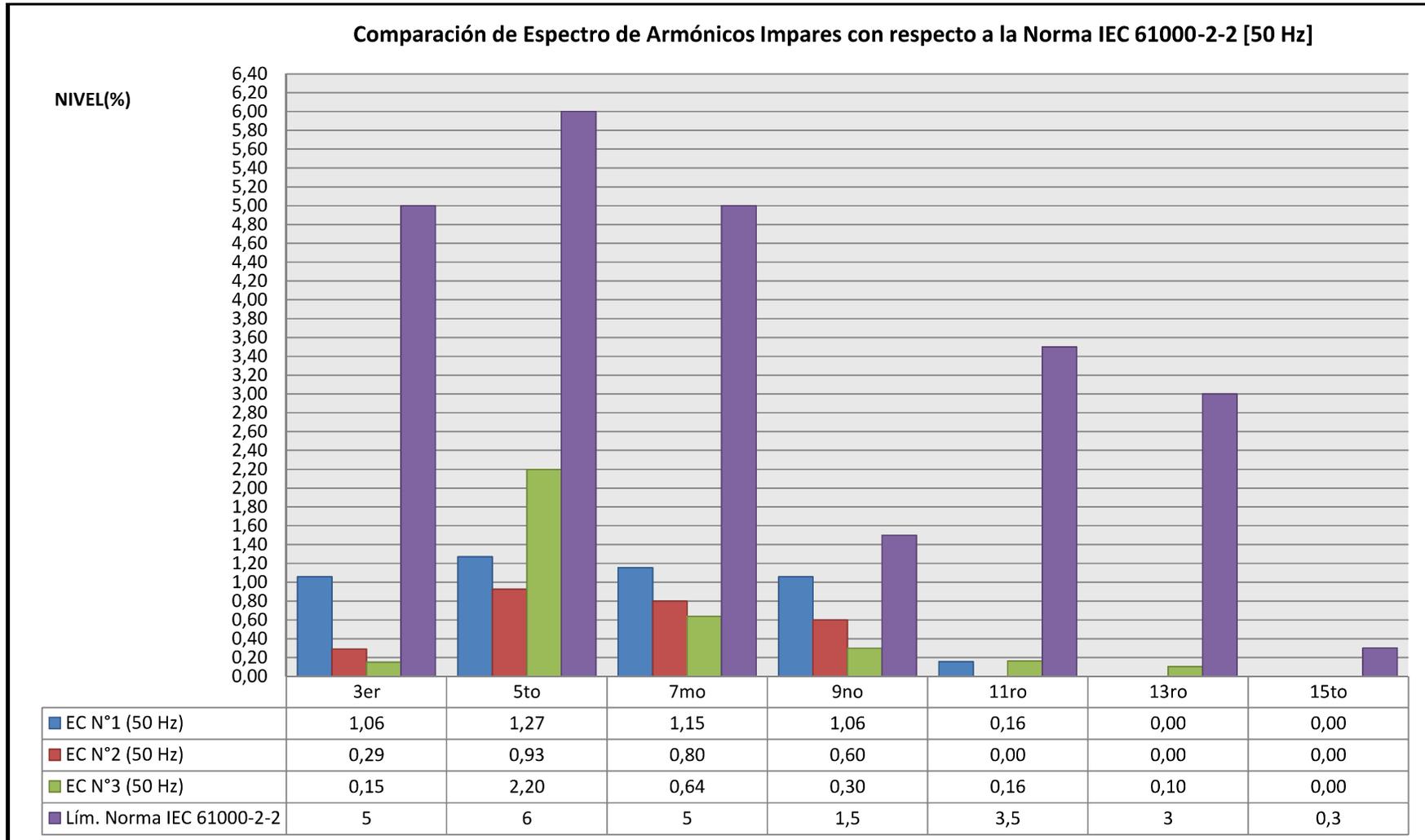


Figura 5.21: Espectro de armónicos impares de tensión respecto a la Norma (Frecuencia de salida 50Hz).

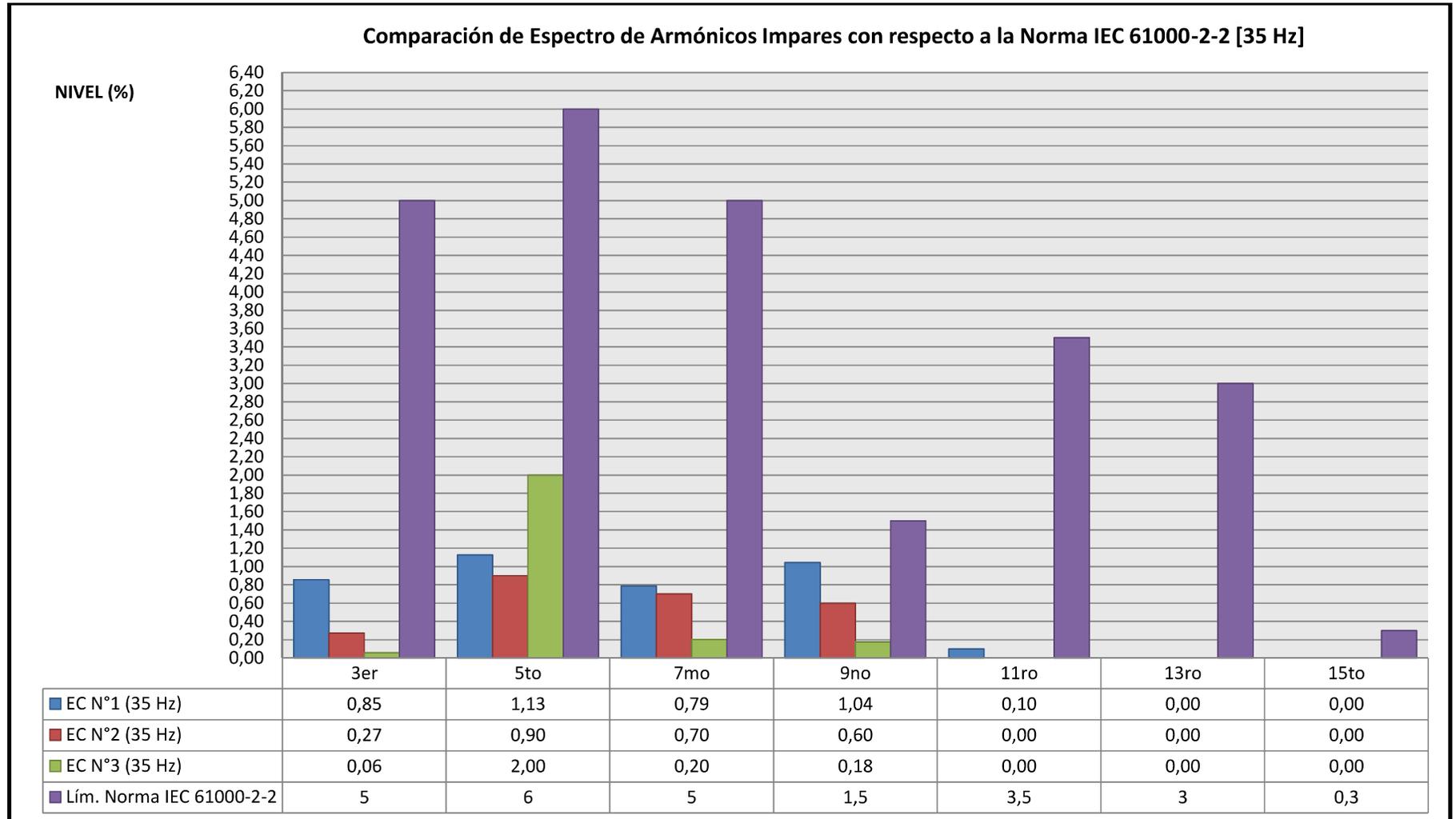


Figura 5.22: Espectro de armónicos impares de tensión respecto a la Norma (Frecuencia de salida 35Hz).

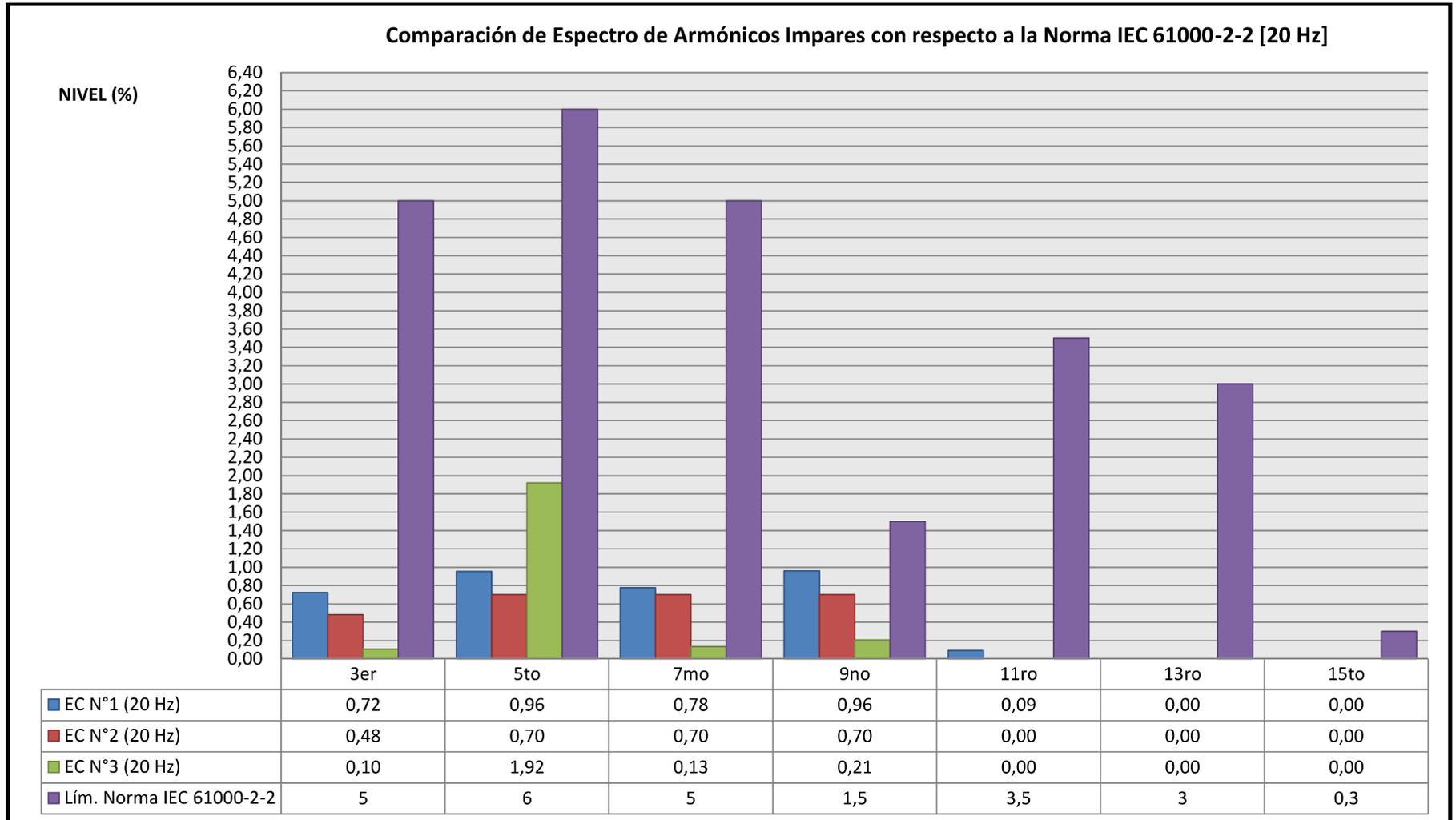


Figura 5.23: Espectro de armónicos impares de tensión respecto a la Norma (Frecuencia de salida 20Hz).

5.3.3.3. Análisis e interpretación de los resultados de tensión

Las figuras 5.21, 5.22, 5.23, en las que se analizan los armónicos de tensión a 50 Hz, 35 Hz y 20 Hz respectivamente, dejan en claro que el variador de velocidad genera armónicos de tensión sólo de orden impar, con valores muy por debajo de los límites establecidos en la Norma IEC 61000-2-2.

5.3.4 SOLUCIONES PARA ATENUAR LOS ARMÓNICOS

Existen tres tipos diferentes de soluciones para atenuar los armónicos:

- Modificaciones en la instalación.
- Dispositivos especiales en el sistema de alimentación.
- Filtros.

Soluciones básicas

Instalación de las cargas no lineales aguas arriba en el sistema

Las perturbaciones armónicas generales aumentan a medida que disminuye la potencia de cortocircuito. Dejando a un lado todas las consideraciones económicas, es preferible conectar cargas no lineales lo más aguas arriba posible

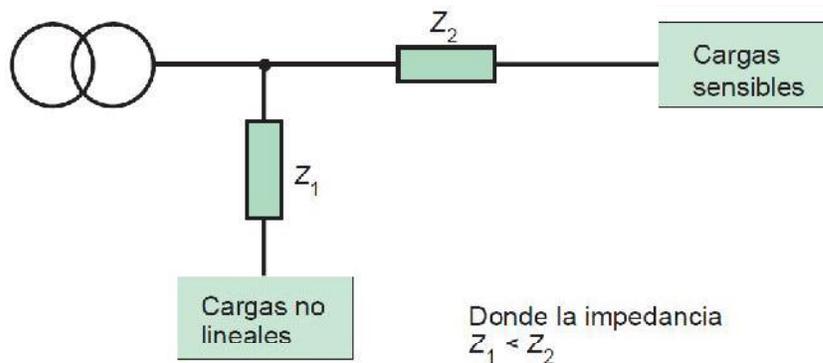


Figura 5.24: Cargas no lineales colocadas lo más aguas arriba posible (Disposición recomendada).

Agrupación de las cargas no lineales

Al preparar el diagrama de una sola línea, los dispositivos no lineales deben separarse del resto.

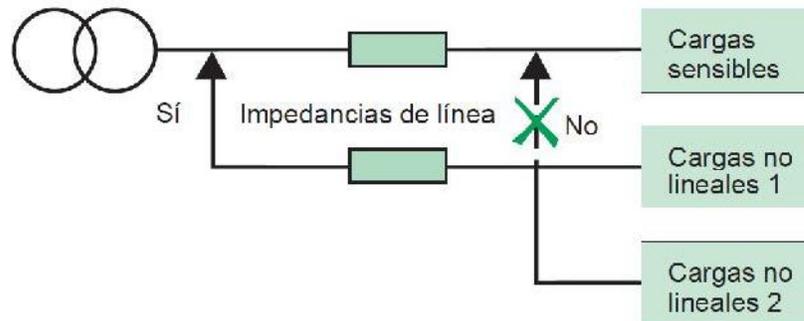


Figura 5.25: Agrupación de cargas no lineales y conexión lo más aguas arriba posible (disposición recomendada).

Instalación de inductancias

Cuando se alimentan variadores de velocidad, es posible atenuar la corriente instalando inductancias. Al aumentar la impedancia del circuito de alimentación, la circulación de armónicos se limita.

La instalación de inductancias antiarmónicas en las baterías de condensadores aumenta la impedancia de la combinación reactor/condensador para los armónicos de gran orden.

De esta forma se evita la resonancia y se protege a los condensadores.

Filtro de armónicos

En los casos en los que la acción preventiva indicada anteriormente sea insuficiente, es necesario equipar la instalación con sistemas de filtrado. Existen tres tipos de filtros:

- Pasivos.
- Activos.
- Híbridos.

Filtros pasivos

Aplicaciones típicas

- Instalaciones industriales con una serie de cargas no lineales que representan más de 200 kVA (variadores de velocidad, SAI, rectificadores, etc.).
- Instalaciones que requieren corrección del factor de potencia.
- Instalaciones en las que la distorsión de tensión debe reducirse para evitar perturbar las cargas sensibles.
- Instalaciones en las que la distorsión de corriente debe reducirse para evitar sobrecargas.

Principio de funcionamiento

Un circuito LC, sintonizado a cada rango armónico que se va a filtrar, se instala en paralelo con la carga no lineal (ver **Figura 5,26**). Este circuito de derivación absorbe los armónicos, evitando así que circulen por la red de distribución. De manera general, el filtro pasivo se ajusta a un rango de armónicos próximo al que se desea eliminar. Se pueden utilizar varias ramificaciones de filtros conectadas en paralelo si se necesita una reducción significativa de la distorsión global.

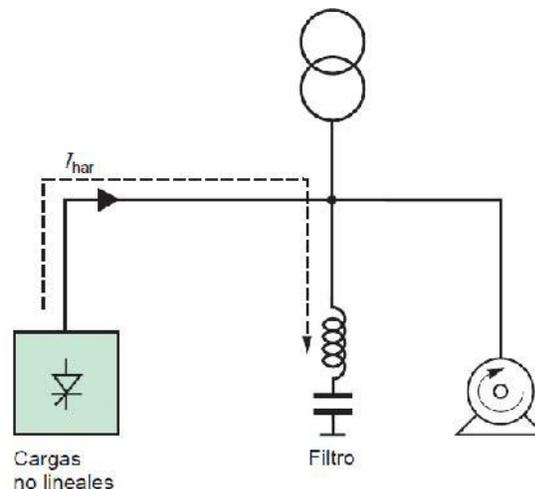


Figura 5.26: Principio de funcionamiento de un filtro pasivo.

Filtros activos (compensador activo de armónicos)

Aplicaciones típicas

- Instalaciones comerciales con una serie de cargas no lineales que representan menos de 200 kVA (variadores de velocidad, SAI, equipos de oficina, etc.).
- Instalaciones en las que la distorsión de corriente debe reducirse para evitar sobrecargas.

Principio de funcionamiento

Estos sistemas, que incluyen electrónica de potencia y que están instalados en serie o en paralelo con la carga no lineal, compensan la intensidad de armónicos o la tensión de la carga. La **Figura 5.27** muestra un compensador activo de armónicos conectado en paralelo que compensa la corriente armónica ($I_{har} = -I_{act}$).

Este filtro inyecta una onda en fase opuesta a los armónicos de la carga no lineal, de forma que la corriente de línea I_s permanece senoidal.

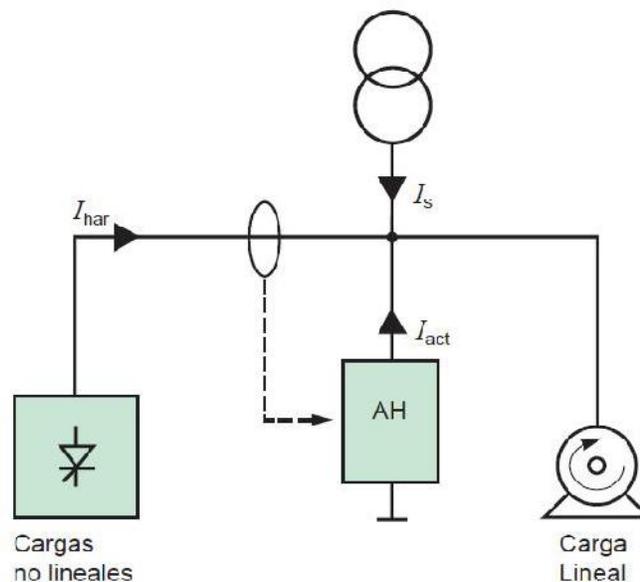


Figura 5.27: Principio de funcionamiento de un filtro activo.

Filtros híbridos

Aplicaciones típicas

- Instalaciones industriales con una serie de cargas no lineales que representan más de 200 kVA (variadores de velocidad, SAI, rectificadores, etc.).
- Instalaciones que requieren corrección del factor de potencia.
- Instalaciones en las que la distorsión de tensión debe reducirse para evitar perturbar las cargas sensibles.
- Instalaciones en las que la distorsión de corriente debe reducirse para evitar sobrecargas.
- Instalaciones en las que deben cumplirse límites estrictos de emisiones de armónicas.

Principio de funcionamiento

Los filtros pasivos y activos se combinan en un único sistema para constituir un filtro híbrido (ver **Figura 5.28**). Esta nueva solución de filtrado ofrece las ventajas de los dos tipos de filtros y abarca una amplia gama de niveles de potencia y rendimiento.

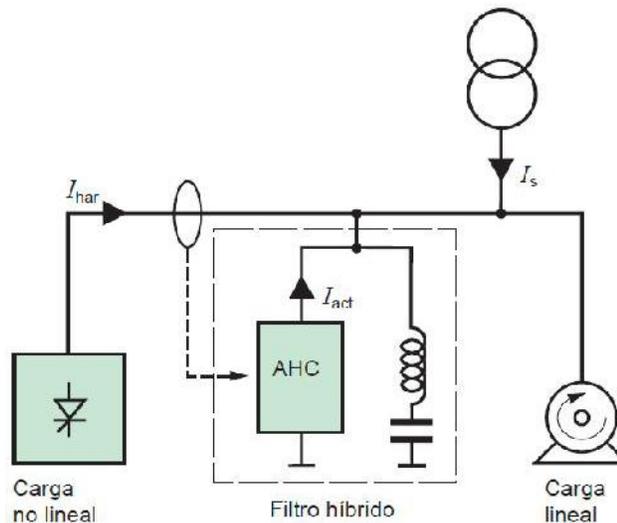


Figura 5.28: Principio de funcionamiento de un filtro híbrido.

CONCLUSIÓN

La investigación constituye un valioso aporte para el área, debido a que se ha determinado el efecto producido por este equipo y los cambios con la incorporación de un elemento en serie como es la inductancia de línea, constituyéndose además en una base de aplicación y/o para realizar estudios posteriores para otros tipos de variadores de velocidad y motores eléctricos.

Los ensayos y mediciones que se realizaron en el Laboratorio de Baja Tensión de la Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales de la Universidad Nacional de Córdoba nos permitieron cuantificar y analizar los niveles de armónicos que genera un variador de velocidad monofásico con salida trifásica aguas arriba del mismo, como así también, afirmar que una bobina de línea conectada en serie limita los niveles de armónicos sólo hasta ciertos niveles.

Esta limitación de los niveles de armónicos por parte de la bobina de línea, es gracias a la alta impedancia que le ofrece a los armónicos de orden elevado. Esto es, a medida que crece el orden armónico su frecuencia se incrementa, por esta razón crece la reactancia inductiva de la bobina de línea y por lo tanto crece la impedancia ofrecida hacia estos armónicos. Si bien esto es cierto, el crecimiento de la impedancia de la bobina de línea no es lineal con el crecimiento del orden de los armónicos, sino más bien, el gradiente con el que crece la impedancia de la bobina va disminuyendo a medida que crece el orden de armónico (aumento de la frecuencia).

Para casos que requieran una mayor limitación de distorsión armónica existen otras soluciones como son los filtros pasivos, filtros activos y los híbridos los cuales representan una solución más costosa económicamente que una bobina de línea.

Al modificar la frecuencia empleando un variador de velocidad, deformamos la onda sinusoidal, generando de esta forma armónicos de corriente en la red, cuya distorsión armónica total de corriente (THDi) es elevada. Al seleccionar una frecuencia de salida de 20 Hz el variador de velocidad genera niveles de armónico mayores que al seleccionar una frecuencia de salida de 35 Hz y 50 Hz.

El desempeño de la inductancia de línea diseñada en el presente proyecto fue satisfactorio teniendo en cuenta los condicionantes que presenta el diseño de la misma constructivamente, ya que fueron utilizados materiales comerciales. Sería absurdo pretender lograr igualar o mejorar el desempeño de una inductancia de línea de una marca reconocida con el grado de especialización que esta posee.



ANEXOS

ANEXO I

ASUNTO: PEDIDO DE COMPRA DE EQUIPAMIENTO ELÉCTRICO

MOTIVO: REALIZACIÓN DE TABLERO DESTINADO A USO DIDÁCTICO EN LABORATORIO DE BAJA TENSIÓN.

La presente nota tiene por finalidad solicitar la compra de los elementos listados en el cómputo expuesto al final. En contexto, estamos realizando el proyecto integrador de tema "*Estudio de la distorsión armónica generada aguas arriba de un variador de velocidad monofásico con salida trifásica*" que tiene como director al profesor Ingeniero Marcelo Fioravanti. Contamos con el variador de velocidad Sinamics G110 y una inductancia de línea que le han sido donados a la facultad.

Además de realizar las mediciones necesarias para el estudio en el proyecto integrador se quiere dejar montado este tablero en el Laboratorio de Baja Tensión, posterior a las refacciones que le serán realizadas, para su uso didáctico en el curso Instalaciones Electromecánicas.

Hacemos llegar este pedido formal a quien corresponda.

Saludamos atte.

Mondino, Marcelo

email: mondinomarcelom@gmail.com

Ugarte, Nicolás

email: nico.santiago.ugarte@gmail.com



ITEM	DESCRIPCIÓN	CANT.	OPCIÓN
1	Interrupción Diferencial Tipo A (Inmunizado) Bipolar Intensidad: In=25 A Sensibilidad: I _Δ =300 mA	1	Marca ABB: F202 A-25/0.03 Marca Schneider: Cód. 23523
2	Interrupción Termomagnético (PIA) Norma IEC 947-2 (10 kA) Bipolar Intensidad: 16 A Curva B	1	Marca Schneider: Cód. 24077
3	Gabinete 450 x 450 x 225 (Ancho x Alto x Prof.)	1	Marca Genrod - S9000
4	Cable PVC 1kV 1x(3x2,5 mm ²) Cu - IRAM 2178	20 m	
5	Ficha macho monofásica 20A - 250 V	1	Marca Kalop: Cód. KS 44620
6	Cable aislado PVC 1x(1x2,5 mm ² PE) Cu IRAM 247-3 (Verde - Amarillo)	15 m	
7	Cable PVC 1 kV 1x(1x2,5 mm ²) Cu - IRAM 2178 (Negro)	10 m	
8	Cable PVC 1x(1x1,5 mm ²) Cu - IRAM 247-3	10 m	
9	Potenciómetro lineal ≥4,7 kΩ	1	
10	Selector negro Ø22 mango de 2 posiciones - 1NA ON/OFF - INVERSIÓN DE GIRO	2	Marca Schneider: XB4BD21
11	Piloto luminoso redondo Ø22 -IP 65 - Verde - LED integral - 24 V - terminales INDICADOR DE MARCHA	1	Marca Schneider: XB4BVB3
12	Piloto luminoso redondo Ø22 - IP 65 - Amarillo - LED integral - 240 V - terminales INDICADOR PRESENCIA DE TENSIÓN	1	Marca Schneider: XB4BVM5
13	RIEL DIN N°35	0,5 m	
18	Borne de tierra para carril - 2,5 PE	5	Marca Phoenix contact: UT 2,5 PE - 3044092
19	Borne de paso - 2,5	5	Marca Phoenix contact: UT 2,5 - 3044076

Tabla A.I.1: Cómputo de materiales para tablero

ANEXO II

TABLERO

Claro está que para realizar las distintas mediciones que se requirieron en el proyecto se debió realizar la conexión eléctrica del circuito.

Como complemento o actividad extra al proyecto integrador, se construyó un tablero eléctrico donde se realizó el esquema eléctrico del circuito, con el cableado de los elementos.

Con la configuración realizada, el motor conectado al variador podrá ser operado desde el panel de operación básico (BOP) del variador de velocidad, o desde el comando del tablero que consta de dos llaves selectoras y un potenciómetro.

En este anexo se exponen los esquemas de conexión indicados en el manual del variador de velocidad y los planos del tablero.

ESQUEMA ELÉCTRICO

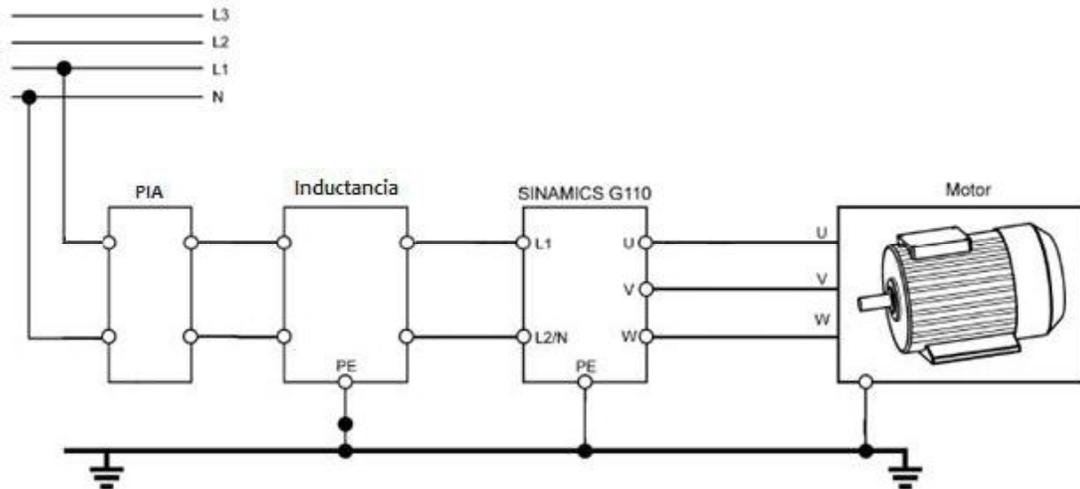
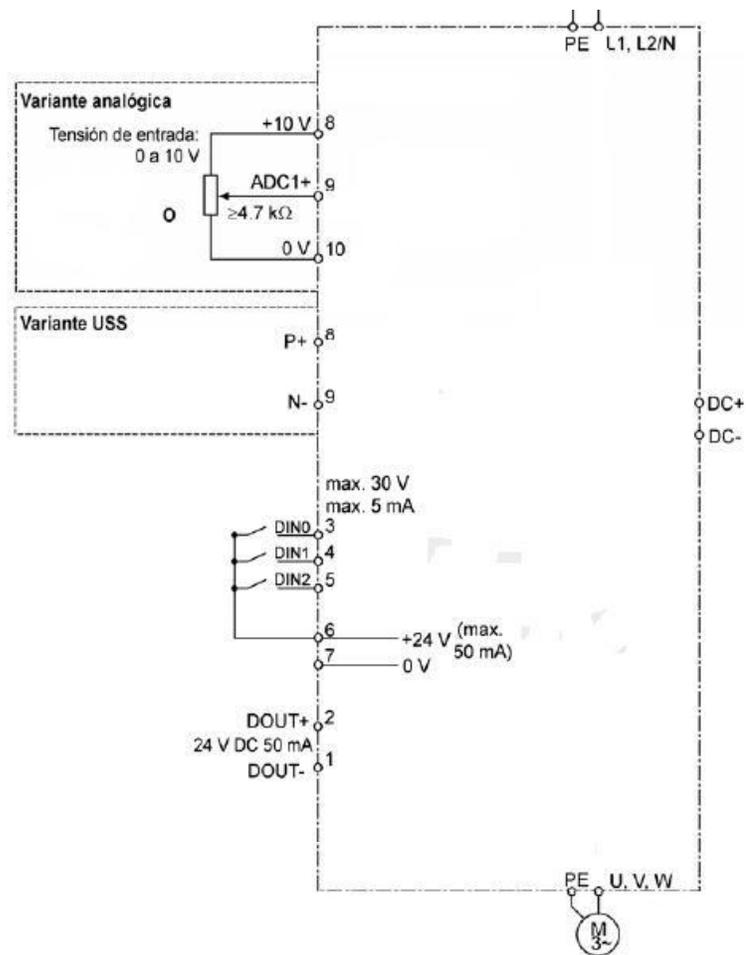


Figura A.II.1: Esquema eléctrico de tablero



Entrada / Salida	Bornes	Parámetro	Ajuste por defecto
Fuente de órdenes	3, 4, 5	P0700 = 2	Entrada digital
Fuente de consignas	9	P1000 = 2	Entrada analógica
Entrada digital 0	3	P0701 = 1	ON / OFF1 (I/O)
Entrada digital 1	4	P0702 = 12	Inversión (↕)
Entrada digital 2	5	P0703 = 9	Acuse de fallo (Ack)
Tipos de control via bornes	-	P0727 = 0	Control Siemens estándar

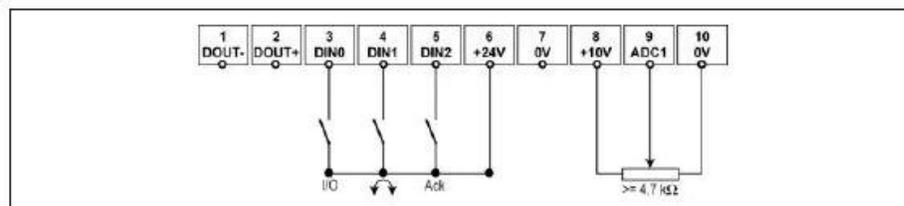
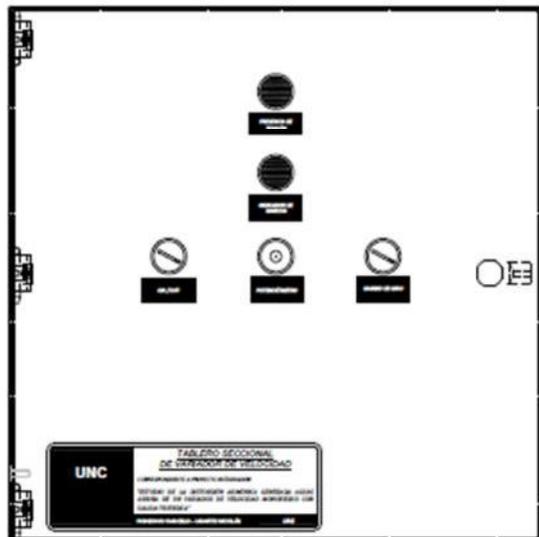
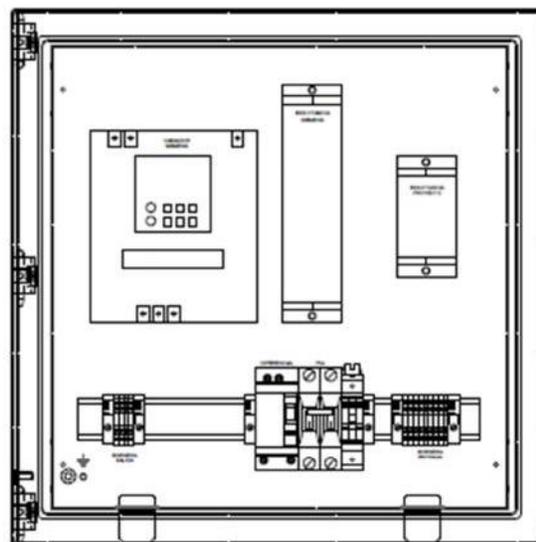


Figura A.II.2: Esquema del comando del variador de velocidad

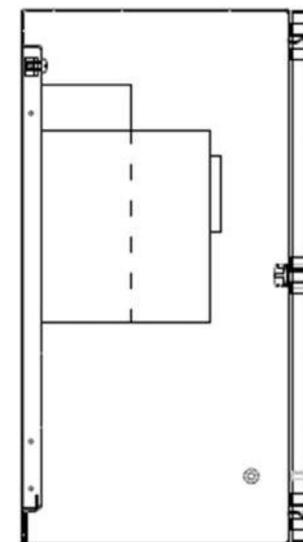
VISTA FRONTAL



VISTA FRONTAL SIN PUERTA



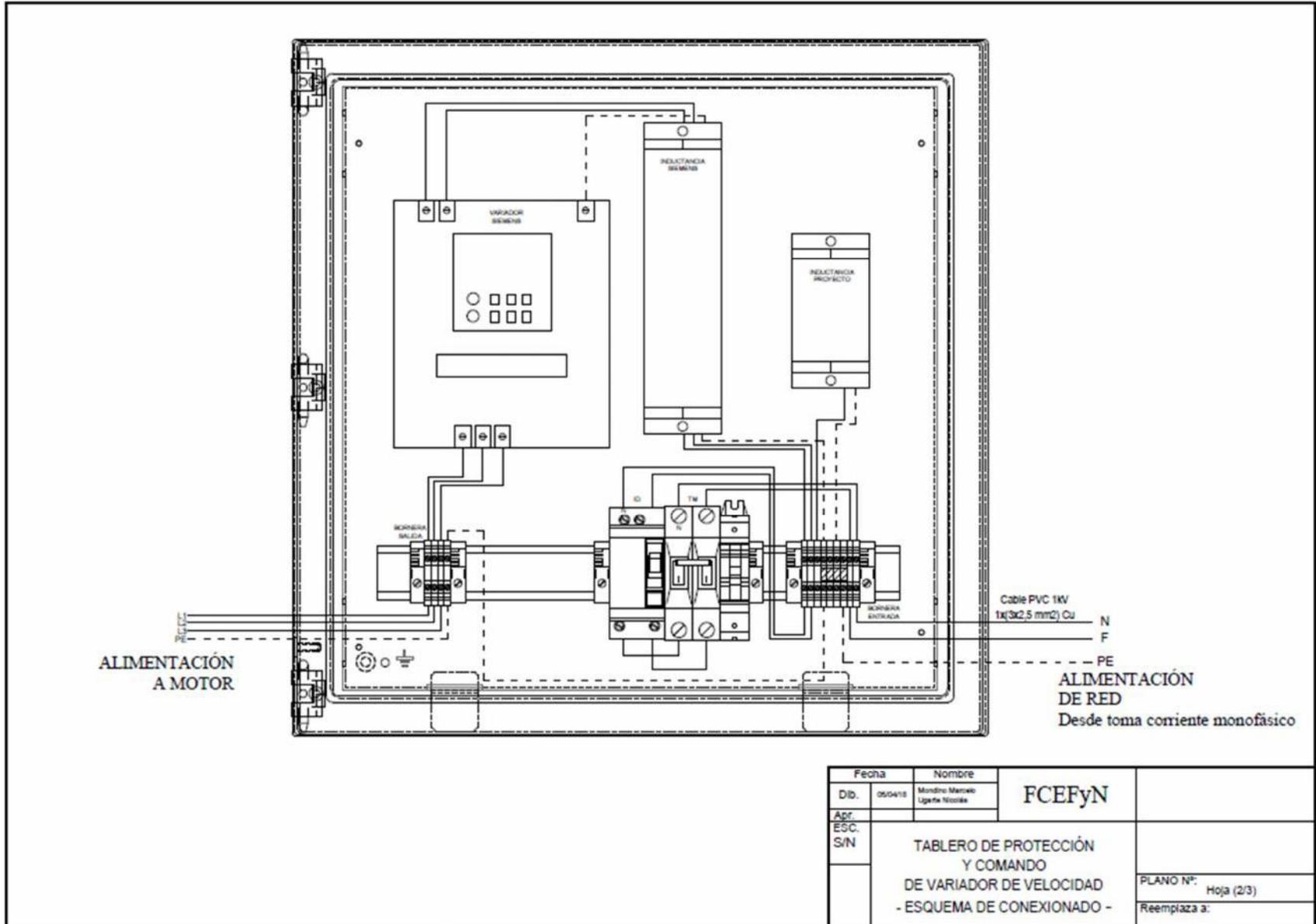
VISTA LATERAL

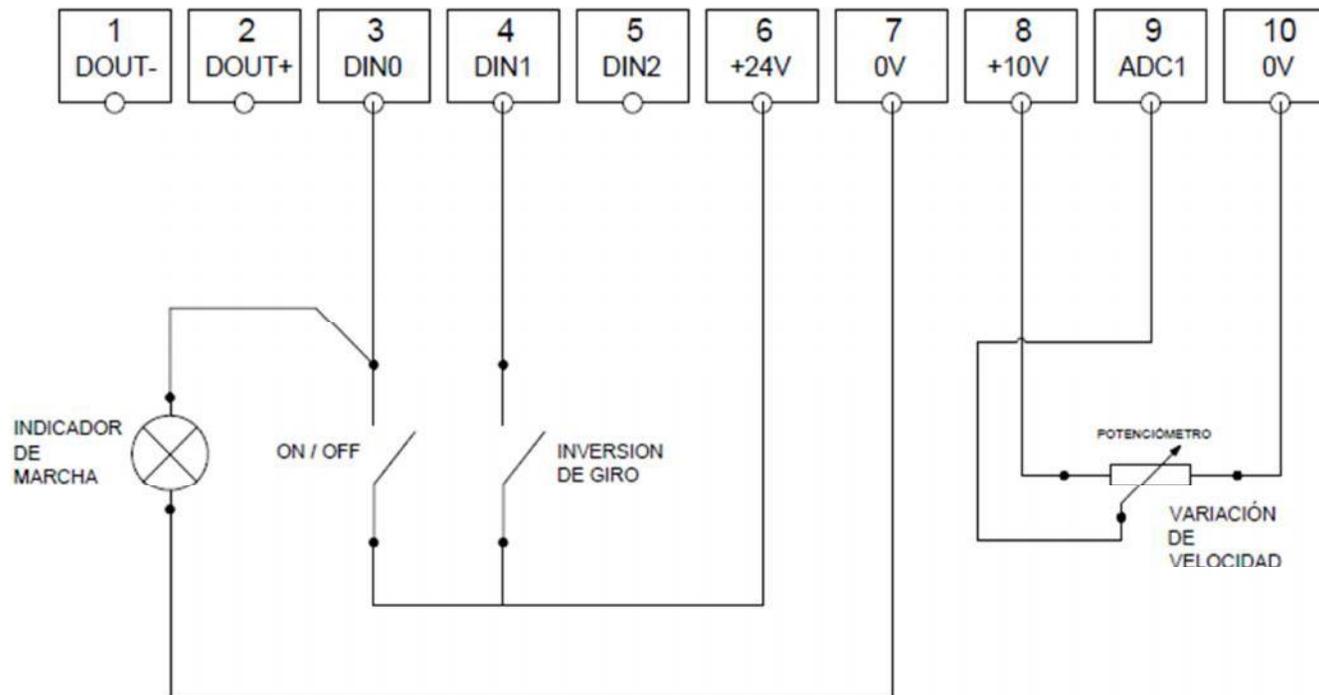


450 x 450 x 225

ALTO x ANCHO x PROF.

Fecha		Nombre	FCEfyN
Dtd.	05/04/10	Morino Marcelo Lopez Nicolas	
Apr.			
ESC.			
S/N			
TABLERO DE PROTECCIÓN Y COMANDO DE VARIADOR DE VELOCIDAD - TOPOGRÁFICO -			PLANO N°: Hoja (1/3)
			Reemplaza a:





Fecha	Nombre	FCEFyN	
Dib. 05/04/18	Morino Marcelo Lopez Nicolas		
Apr.		TABLERO DE PROTECCIÓN Y COMANDO DE VARIADOR DE VELOCIDAD - COMANDO -	
ESC.			PLANO Nº: Hoja (3/3)
S/N			Reemplaza a:

ANEXO III

Hoja de datos del producto

6SE6400-3CC01-0AB3



Corriente de salida / valor nominal	8.1 A
Pérdida de potencia efectiva	
• a 50 Hz	11.5 W
• a 60 Hz	14.5 W
Sección del conductor conectable	
• para el conductor de alimentación de línea	6 mm ²
• para el alimentador saliente del lado de la carga	1.5 mm ²
Diseño de la conexión eléctrica / para el conductor PE	Tornillo M5
Clase de protección IP	IP20
Anchura	75.5 mm
Altura	201 mm
Profundidad	50 mm
Peso neto	1.3 kg

Figura A.III.1: Hoja de datos de la inductancia Siemens.

ANEXO IV

Analizador De Armónicos De Potencia Metrel MI 2092

Características principales

- › Función de registro profesional
- › Medición de energía precisa: activa y reactiva, importación y exportación, inductiva y capacitiva, registros separados para el período de integración total y sub-total
- › Análisis completo de armónicos de voltaje y corriente hasta 41°
- › Medición de alta precisión y registro de parámetros de calidad de potencia (U, I, f, cos, PF, P, Q, S, armónicos de corriente y tensión, etc.)
- › Mediciones de 4 cuadrantes (generador y carga con carácter capacitivo o inductivo)
- › Contador de energía
- › La función de alcance en línea permite que se muestren formas de onda de voltaje y corriente, muchos rangos de amplitud proporcionan una vista clara de la forma de onda
- › El analizador de armónicos de potencia Metrel MI 2092 se puede programar directamente o a través de una PC
- › Gran pantalla LCD de alta resolución con retroiluminación
- › Compatible con Windows Metrel PowerLink. Admite la descarga, programación, comunicación con el instrumento y la transferencia de datos grabados a otros programas de MS (Excel, Word, etc.)
- › Compatible con MS Windows Metrel PC SW PowerLink sirve para la descarga, la gestión de datos grabados y la preparación de informes de prueba

El analizador de armónicos de potencia Metrel MI 2092 es un analizador de potencia portátil simple y trifásico completo para uso en la industria, los servicios públicos y para el diagnóstico de la calidad de la energía en general.

La amplia gama de accesorios hace que el analizador de armónicos de potencia Metrel MI 2092 sea adecuado para una variedad de aplicaciones diferentes.

Aplicaciones del equipo

- › Evaluación general de la calidad de energía en sistemas eléctricos de distribución y de baja y media tensión de distribución
- › Captura y registro de eventos de suministro de energía (paradas, interrupciones, caídas, caídas)
- › Mediciones del equipo de corrección del factor de potencia
- › Mediciones de armónicos y selección de filtros
- › Grabación del perfil de consumo



Figura A.IV.1: Fotografía de Analizador de armónicos Metrel MI 2092.

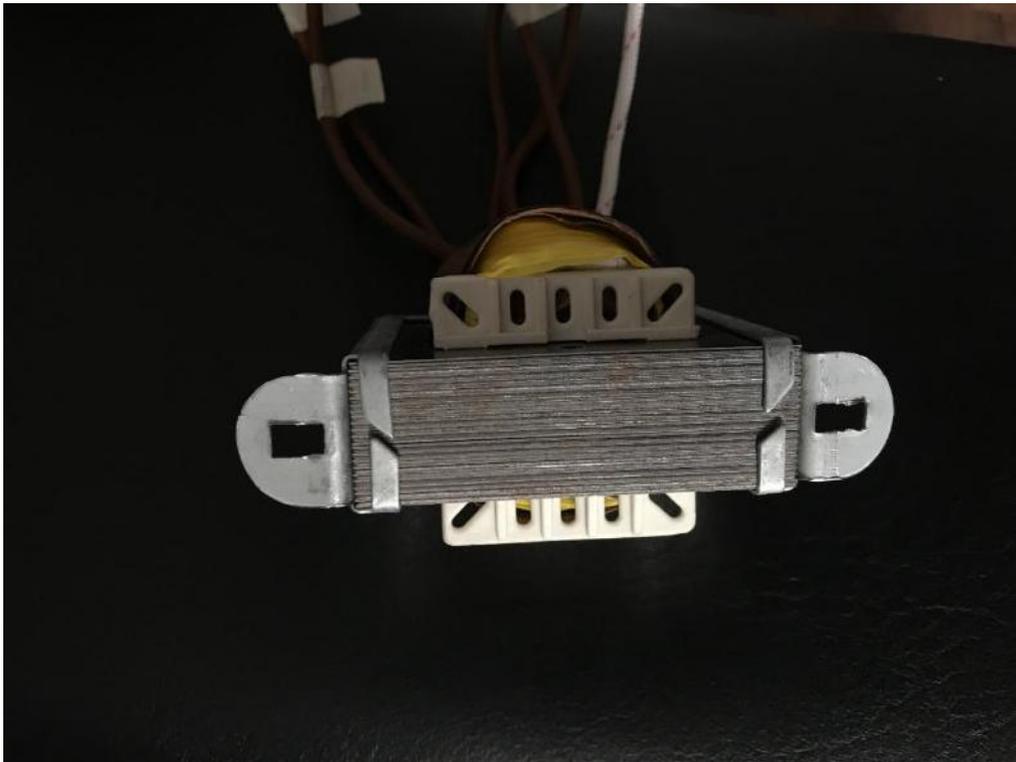
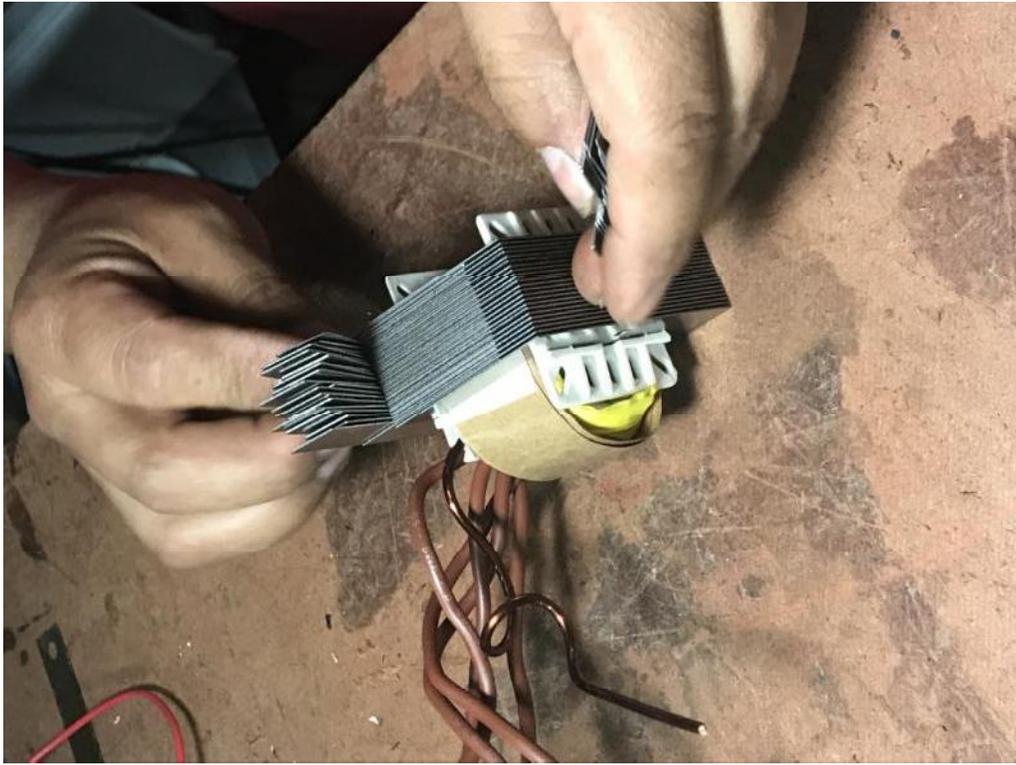


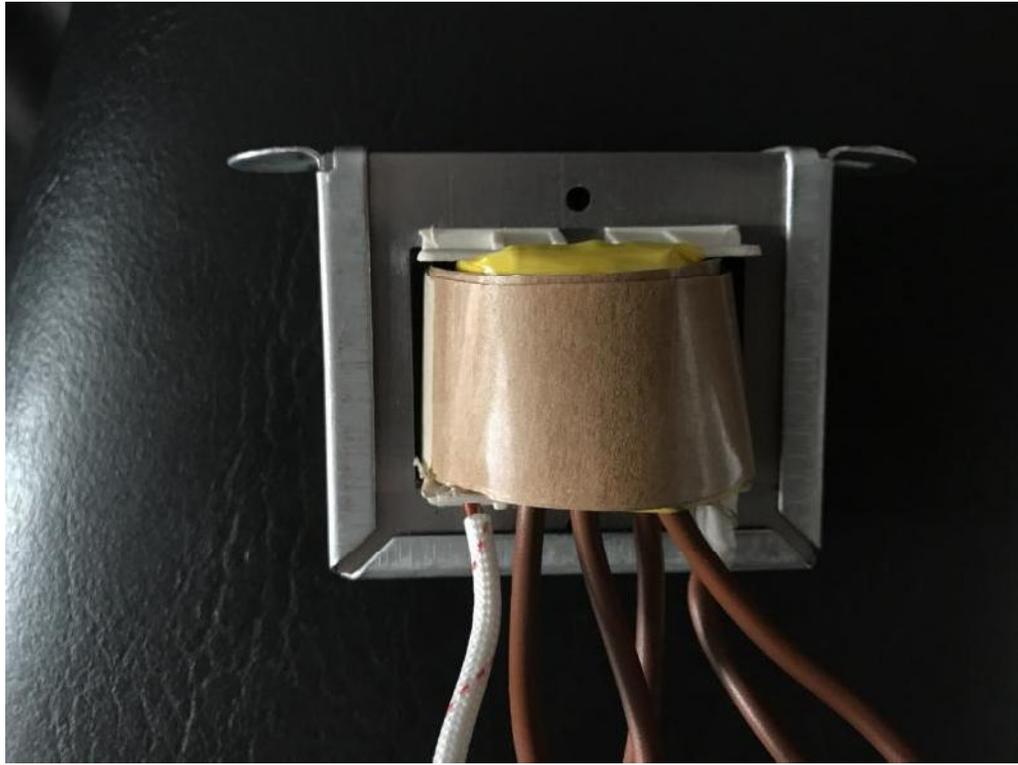
ANEXO V

REGISTRO FOTOGRÁFICO DE CONSTRUCCIÓN DE BOBINA DE LÍNEA





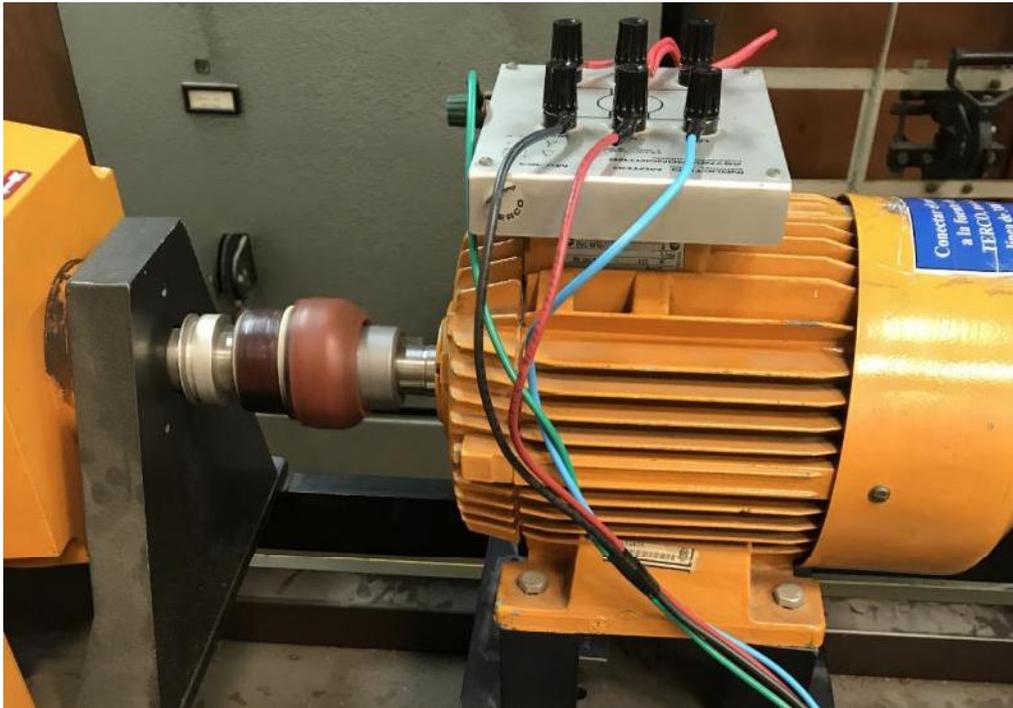






REGISTRO FOTOGRÁFICO DEL BANCO DE ENSAYOS Y MEDICIONES





BIBLIOGRAFÍA

CUADERNO TÉCNICO SCHNEIDER N° 183 - ARMÓNICOS: RECTIFICADORES Y COMPENSADORES ACTIVOS - Eric Bettega Jean Noël Fiorina

GUÍA DE DISEÑO DE INSTALACIONES ELÉCTRICAS 08 SCHNEIDER - CAPÍTULO M: DETECCIÓN Y FILTRADO DE ARMÓNICOS

“DISTORSIÓN ARMÓNICA PRODUCIDA POR VARIADORES DE FRECUENCIA PARA MEJORAR EL DESEMPEÑO DE MOTORES ELÉCTRICOS TRIFÁSICOS EN EL LABORATORIO DE AUTOMATIZACIÓN INDUSTRIAL DE LA FACULTAD DE ..INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA” - Universidad Técnica De Ambato - Egdo. Darwin Abraham López Ati - 2013

SCHNEIDER ELECTRIC - ELIMINACIÓN DE ARMÓNICOS EN INSTALACIONES - Edición de 09/2015

SINAMICS - COMPATIBILIDAD ELECTROMAGNÉTICA (CEM) - Resumen técnico - Edición 09/2014

REACTORES TRIFÁSICOS REACTORES DE LÍNEA / CARGA - www.mtecorp.com

SCHNEIDER ELECTRIC - AHORRO DE ENERGÍA Y MEJORA DE LA CALIDAD DE ENERGÍA CORRIENDO EL FACTOR DE POTENCIA TOTAL - Carlos Felipe Salcedo

“DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE FILTROS PASIVOS DE PEQUEÑA POTENCIA PARA LA REDUCCIÓN DE PROBLEMAS DE DISTORSIÓN EN CARGAS NO LINEALES” - Universidad De El Salvador Facultad De Ingeniería Y Arquitectura Escuela De Ingeniería Eléctrica - Rene Rodil Gomez Funes, Ulises Edgardo Mendoza Delgado, Ensor Gustavo Ortiz - Febrero del 2009.

PRACTICAS FUNDAMENTALES DE ELECTRICIDAD Y ELECTRÓNICA -Paul B. Zbar, Joseph G. Sloop. 1984.

TRANSFORMADORES - Ing. Francisco L. Singer

TRATADO DE BOBINADOS - Ing. Francisco L. Singer

IEEE 519 (2014) – “Práctica Recomendada y Requisitos para el Control Armónico en Sistemas de Energía Eléctrica”.

IEC 61000-2-2 (1993) - EMC Parte 2. Ambiente. Sección 2: Niveles de compatibilidad para perturbaciones dirigidas de baja frecuencia y señalización en sistemas públicos de alimentación de Baja Tensión.

IEC 61000-3-2 (2004) - EMC Parte 3: Límites. Sección 2: Límites para emisiones de corrientes armónicas (Equipos con entrada de corriente inferior a 16A por fase).