

UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA

FACULTAD DE INGENIERÍA ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA



**EFFECTOS EN LAS MÁQUINAS ELÉCTRICAS INDUSTRIALES
A CAUSA DE LAS SEÑALES PWM
DEL VARIADOR DE FRECUENCIA ELECTRÓNICO**

**INFORME DE SUFICIENCIA
PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE:
INGENIERO ELECTRÓNICO**

**PRESENTADO POR:
JOSÉ RAUL VASSALLO CORNEJO**

**PROMOCIÓN
2003-II**

**LIMA-PERÚ
2014**

**EFFECTOS EN LAS MÁQUINAS ELÉCTRICAS INDUSTRIALES
A CAUSA DE LAS SEÑALES PWM
DEL VARIADOR DE FRECUENCIA ELECTRÓNICO**

DEDICATORIA:

A mi esposa Karina y a mis hijos
Joaquín y Alexia
Quienes soportaron mi ausencia
durante mis investigaciones para la
culminación de esta meta

SUMARIO

En el presente trabajo se realiza el estudio de los efectos en las máquinas eléctricas industriales a causa de las señales PWM del variador de frecuencia electrónico.

Para ilustrar ello, se exponen tres casos de estudio a los cuales se les realiza el diagnóstico de los sistemas de máquinas eléctricas industriales aplicando el análisis de los sistemas de comando mediante PWM sobre los variadores de frecuencia. Luego de las mediciones y diagnósticos, se plantean soluciones a fin de incrementar la disponibilidad/confiabilidad de esos sistemas.

Este análisis es necesario por cuanto la industria debe cumplir plazos para lo cual debe asegurar que sus sistemas de producción estén disponibles, no fallen o su restauración del servicio sea breve. Para los usuarios, es una necesidad crítica que los sistemas de máquinas eléctricas permanezcan siempre en operación y que adicionalmente su desempeño sea óptimo.

El análisis consiste en realizar pruebas tanto en línea como fuera de línea. Luego del diagnóstico se plantean soluciones para reducir o eliminar cualquier deficiencia detectada previendo así la ocurrencia de una falla.

El informe se enfoca en la realización del diagnóstico de sistemas de motores de inducción mediante el análisis de los sistemas de comando PWM de los variadores de frecuencia. Los casos de estudio son: Rodillo de máquina de textiles no tejido, ventilador de socavón y bomba de alta presión.

ÍNDICE

INTRODUCCIÓN	1
CAPÍTULO I	
PLANTEAMIENTO DE INGENIERÍA DEL PROBLEMA	3
1.1 Enunciado del problema.....	3
1.2 Objetivos del trabajo.....	3
1.3 Evaluación del problema.....	3
1.3.1 Acciones preventivas.....	3
1.3.2 Influencia de la calidad de energía	4
1.3.3 Casos de estudio analizados	4
1.3.4 Ampliación de la problemática	4
1.3.5 Justificación económica	8
1.4 Alcance del trabajo	8
CAPÍTULO II	
TEORIA DE MÁQUINAS ELECTRICAS	10
2.1 Motores de inducción	10
2.1.1 Aspectos teóricos/conceptuales.....	10
2.1.2 Descripción de modos de falla	13
2.1.3 Circuito equivalente de motor eléctrico.....	14
2.1.4 Circuito equivalente capacitivo.....	15
2.2 Calidad de energía	16
2.2.1 Fuente de distorsión a la calidad de energía.....	16
2.2.2 Descripción y aspectos normativos.....	16
2.2.3 Efectos asociados a la calidad de energía	17
2.2.4 Influencia en el sistema motriz.....	17
2.2.5 Soluciones para atenuación de armónicos	18
2.3 Sistemas de comando PWM.....	20
2.3.1 Sistemas de comando PWM Escalar.....	21
2.3.2 Sistemas de comando PWM Vectorial.....	26
2.4 Pruebas de motores	26
2.4.1 Pruebas fuera de línea (estáticas)	26
2.4.2 Pruebas en línea (Dinámicas).....	27
CAPÍTULO III	
CASOS DE ESTUDIO	32
3.1 Primer caso de estudio- Rodillo de máquina de textiles no tejido.....	32

3.1.1	Mediciones.....	33
3.1.2	Resultados.....	38
3.1.3	Conclusión	39
3.1.4	Recomendaciones.....	40
3.2	Segundo caso de estudio- Ventilador de socavón	40
3.2.1	Mediciones.....	41
3.2.2	Resultados.....	46
3.2.3	Conclusión	46
3.2.4	Recomendaciones.....	46
3.3	Tercer caso de estudio- Bomba de alta presión	46
3.3.1	Mediciones.....	48
3.3.2	Resultados.....	52
3.3.3	Conclusión	52
3.3.4	Recomendaciones.....	52
	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	54
	BIBLIOGRAFÍA.....	56

INTRODUCCIÓN

El trabajo surge por la necesidad de los usuarios de sistemas de máquinas eléctricas de asegurar la disponibilidad de sus sistemas de producción, por ello se recurre a la realización de pruebas para detectar cualquier defecto que pueda provocar a futuro una posible falla y parada del equipamiento eléctrico.

En el presente informe se analizan los efectos en las máquinas eléctricas industriales a causa de las señales PWM del variador de frecuencia electrónico.

Los motores son regularmente sujetos a pruebas (en línea y fuera de línea). Las pruebas consisten de varias mediciones reguladas por normativas. Cada una de las pruebas arroja resultados que deben ser interpretados a fin de optar por una alternativa que mejore las condiciones de operación del motor. Así se descartan fallas tales como degradación del aislamiento, daños en el hierro, deflexión del eje, etc.

Un aspecto resaltante del análisis es la influencia de la calidad de energía entregada por los variadores al sistema motriz. Las características de la onda entregada deben ser lo más "puras", lo que se ve alterada por la cantidad de armónicos, el rizado de la onda, desbalances y deformación de onda. Pero la responsabilidad de que los variadores entreguen la mejor onda depende del sistema de comando PWM (modulación por ancho de pulso) que se utilice.

El informe está organizado de la siguiente manera:

- Capítulo I "Planteamiento de ingeniería del problema".- Se explica el problema de ingeniería y se precisan los objetivos. También se hace una evaluación de la problemática y se establecen los alcances del proyecto desarrollado.
- Capítulo II "Marco teórico conceptual".- Donde se exponen las bases teóricas conceptuales más importantes para la comprensión del sistema descrito en el presente informe. Se desarrollan los siguientes temas: Motores de inducción (Aspectos teóricos/conceptuales, Descripción de modos de falla, Circuito equivalente de motor eléctrico, Circuito equivalente capacitivo), Calidad de energía (Fuente de distorsión a la calidad de energía, Descripción y aspectos normativos, Efectos asociados a la calidad de energía, Influencia en el sistema motriz, Soluciones para atenuación de armónicos), Sistemas de comando PWM (Sistemas de comando PWM Escalar, Sistemas de comando PWM Vectorial), Pruebas de motores (Pruebas fuera de línea o estáticas, pruebas en línea o Dinámicas).

- Capítulo III "Casos de estudio".- En donde se muestra las mediciones y el análisis para la calidad de energía y firma Eléctrica en tres variadores de las marcas usadas en la industria local (Siemens, ABB, Allen Bradley). Las pruebas dinámicas se realizaron con el analizador de máquinas eléctricas ATPOL II. Los casos de estudio son: Rodillo de máquina de textiles no tejido. ventilador de socavón, bomba de alta presión. Se presenta las mediciones, resultados, conclusiones y recomendaciones para cada caso.

El informe presenta adicionalmente conclusiones y recomendaciones referentes a los diferentes sistemas analizados.

CAPÍTULO I PLANTEAMIENTO DE INGENIERÍA DEL PROBLEMA

En este capítulo se explica el problema de ingeniería y se precisan los objetivos. También se hace una evaluación de la problemática y se establecen los alcances del proyecto desarrollado.

1.1 Enunciado del problema

Necesidad de establecerse el estado de los sistemas de motores de inducción con la finalidad de ejecutar acciones orientadas a evitar las paradas inesperadas de la planta, minimizar las fallas imprevistas, así como para mantener elevada la confiabilidad de los equipos.

Es imprescindible mantener operativos los motores de los casos de estudio (máquina textil, ventilador de socavón minero, bomba de alta presión en planta desalinizadora), ya que la falla de ellos ocasionarían serios inconvenientes (pérdidas económicas, daños en la integridad física del personal, y falta de abastecimiento de agua potable, según sea el caso).

1.2 Objetivos del trabajo

Realizar el diagnóstico de sistemas de motores de inducción industriales mediante el análisis de los sistemas de comando PWM de los variadores de frecuencia. Asimismo plantear soluciones a fin de incrementar la disponibilidad/confiabilidad del sistema. Los efectos en la máquinas eléctricas se ilustran mediante tres casos de estudio, cuya problemática es explicada en la siguiente sección.

1.3 Evaluación del problema

Las máquinas eléctricas más utilizadas en la industria son los motores de inducción, ello debido a su bajo costo y a la facilidad para ser adquiridos en el mercado nacional.

Las fábricas tienen plazos que cumplir y deben asegurarse que sus sistemas de producción estén disponibles, no fallen o su restauración del servicio sea lo más corto posible. Por lo que los usuarios de los sistemas de máquinas eléctricas de inducción ven como una necesidad crítica que los motores permanezcan operativos y asimismo su desempeño sea el óptimo.

1.3.1 Acciones preventivas

Los motores son regularmente sujetos a pruebas (en línea y fuera de línea). De su

diagnóstico se pueden plantear soluciones para mermar o corregir los defectos encontrados en previsión de la ocurrencia de una falla en el motor. Las pruebas consisten de varias mediciones reguladas por normativas. Cada una de las pruebas arroja resultados que deben ser interpretados a fin de optar por una alternativa que mejore las condiciones de operación del motor. Así se descartan fallas tales como degradación del aislamiento, daños en el hierro, deflexión del eje, etc.

1.3.2 Influencia de la calidad de energía

Un aspecto resaltante del análisis es la influencia de la calidad de energía entregada por los variadores al sistema motriz. Las características de la onda entregada deben ser lo más "puras", lo que se ve alterada por la cantidad de armónicos, el rizado de la onda, desbalances y deformación de onda. Pero la responsabilidad de que los variadores entreguen la mejor onda depende del sistema de comando PWM (modulación por ancho de pulso) que se utilice.

1.3.3 Casos de estudio analizados

Para alcanzar los objetivos se realiza en este informe el análisis de los sistemas de comando PWM con el fin de diagnosticar el estado de los motores de inducción industriales. Conceptos básicos a desarrollar en el Capítulo 2 "Marco Teórico" corresponden a los motores de inducción, la calidad de energía, los sistemas de comando PWM y finalmente las pruebas de los motores.

Para la ilustración de la metodología se recurre a tres casos de estudio en diferentes sectores productivos:

- **Rodillo de máquina de textiles no tejido.**- En la planta textil, cada parada no programada representa un costo económico, se requiere mínimo 4 horas para volver a poner operativo el sistema con pérdidas de producción, pérdidas de material, costo de tener stock de repuestos y horas extras del personal de mantenimiento, estas pérdidas se estima en unos 28,000 dólares por cada hora de parada de planta de 4 horas.

- **Ventilador de socavón.**- En la ventilación de minería una falla del sistema motriz pone en peligro la salud del personal, se procede a evacuar al personal y parar la producción, los costos superan los 100,000 dólares dependiendo de la cantidad de toneladas procesadas por día.

- **Bomba de alta presión.**- Bombas de alta presión son utilizadas para hacer circular el agua de mar en una planta desalinizadora en un proceso de operación continua necesaria para la operación de las turbinas con el consecuente abastecimiento de agua potable.

1.3.4 Ampliación de la problemática

Para ampliar la problemática y la justificación del análisis materia del presente

informe, se puede hacer incidencia en el caso de la planta textil en donde ocurrió una parada de la planta por la falla de un motor principal accionado por variador. Este es el caso con mayores condiciones potenciales de falla en su sistema motriz. En los otros dos casos se describe como se evitan estas condiciones anómalas.

a. Caso planta Textil

Los instrumentos de monitoreo de parámetros eléctricos no detectaron anomalías o alarmas que anuncien la falla, por lo que no se pudieron efectuar las acciones oportunas para evitar daños en la máquina y proceso. Por los hechos descritos se vio la necesidad de aplicar tecnologías y prácticas de mantenimiento que permitieran predecir estas fallas y/o conocer las condiciones que generan fallas en los sistemas de accionamiento de motores a fin de corregir estas condiciones y aumentar la confiabilidad y disponibilidad de las máquinas eléctricas para la producción.

El personal electricista de planta textil desconocía las características especiales de los sistemas de motores eléctricos controlados por señales PWM de variador de frecuencia, esto llevó a deficiencias en el diseño, mantenimiento y operación de estos sistemas y condujo a condiciones potenciales de falla en el diseño, planes de mantenimiento y operación.

Las condiciones potenciales de falla de los sistemas de motor controlados por variador de frecuencias PWM pueden ser diversas tales como: La calidad de energía de la onda PWM donde sus armónicos dañan sus sistemas de aislamiento. La longitud de los conductores entre el variador de frecuencia y el motor producen transitorios de sobre voltaje, las características del motor para soportar los armónicos y distorsiones, el proceso como una consideración a su sensibilidad a las vibraciones.

En planta textil se encontró las condiciones para falla de sistema motriz, en la excesiva longitud del conductor, clase de aislamiento y en la onda PWM. Los modos de falla analizados fueron: nivel de transitorios de voltaje, nivel de vibración, componentes armónicos.

La planta textil para su proceso emplea una máquina que tiene un rodillo bobinador, este rodillo es indispensable para la producción, el rodillo presentaba vibraciones excesivas, que perjudicaban la calidad y cantidad de la producción, las vibraciones no podían ser asociadas e identificadas a problemas mecánicos, por lo que se determinó realizar pruebas eléctricas dinámicas en el sistema motriz.

El rodillo bobinador es accionado por un motor eléctrico trifásico estándar (clase de aislamiento B) controlado desde unos 100 metros por un variador de velocidad estándar (sin reactor en bus DC), no cuenta con reactores y/o filtros de red, en la figura 1.1 se muestra un esquema eléctrico del sistema motriz.

Las pruebas eléctricas se realizaron en la entrada del variador, salida del variador y borneras del motor, en la figura 1.1 se marca con elipses los puntos donde se realizaron las mediciones. Los resultados de las pruebas eléctricas dinámicas mostraron los modos potenciales de falla en los conductores, en la onda PWM y en los rodamientos.

La longitud del conductor eléctrico desde el variador al motor supera los 100 metros, para los cortos tiempos de conmutación de la onda PWM el acople de impedancias entre el conductor y el motor es inadecuado, en las borneras del motor las ondas de voltaje son reflejadas y sumadas a las onda PWM dando origen a picos transitorios de sobre voltaje, en la figura 1.1 se muestra la onda PWM entregada por el variador y la onda en la entrada del motor que es distorsionada con transitorios de sobre voltaje, estos transitorios de voltaje son destructivos para el aislamiento de barniz de los conductores. Para esta condición del suministro eléctrico con distorsiones de sobre voltaje hay que tener consideración especial en la selección de la clase de aislamiento del motor de inducción, recomendándose la clase especial H.

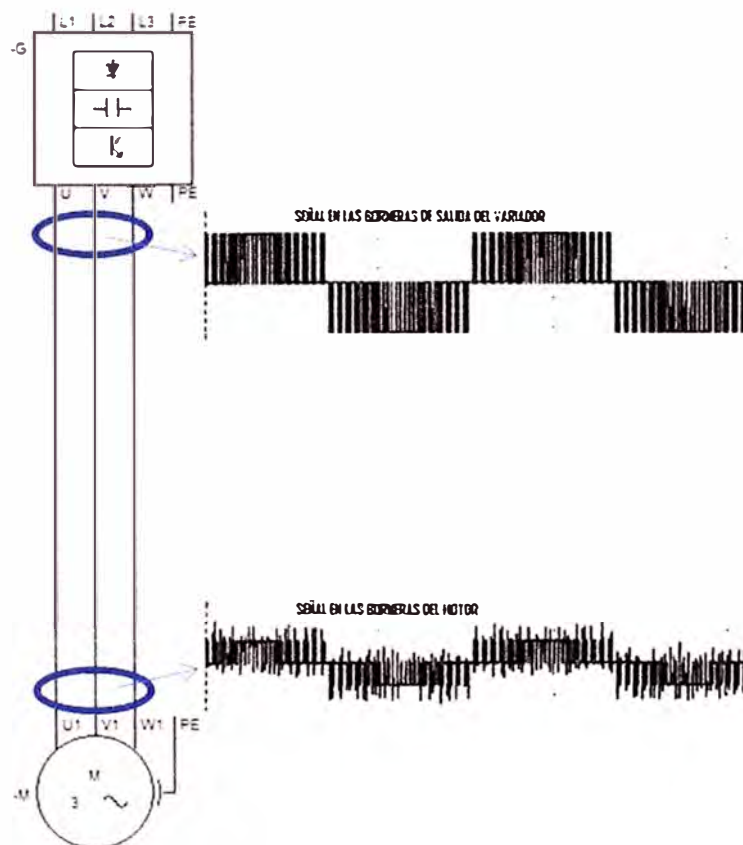


Figura 1.1 Onda PWM del variador llega distorsionada al motor (Fuente: Referencia [42])

La onda PWM que alimenta al motor presenta armónicos de corriente de orden 8 y 11 (figura 1.2) estos armónicos son de secuencia negativa (inversión de secuencia de fases), los armónicos de secuencia negativa tienen invertido la secuencia de fases y el campo magnético giratorio que crean tienen sentido contrario al giro del eje generando fuerzas torsionales que producen vibraciones mecánicas de origen eléctrico. Para reducir

los armónicos de secuencia negativa se recomienda instalar a la salida del variador filtros sintonizados en los armónicos de orden 8 y 11. Los rodamientos del rodillo soporta un gran masa variable y las vibraciones inducidas acelera el incremento de fallas mecánicas pequeñas.

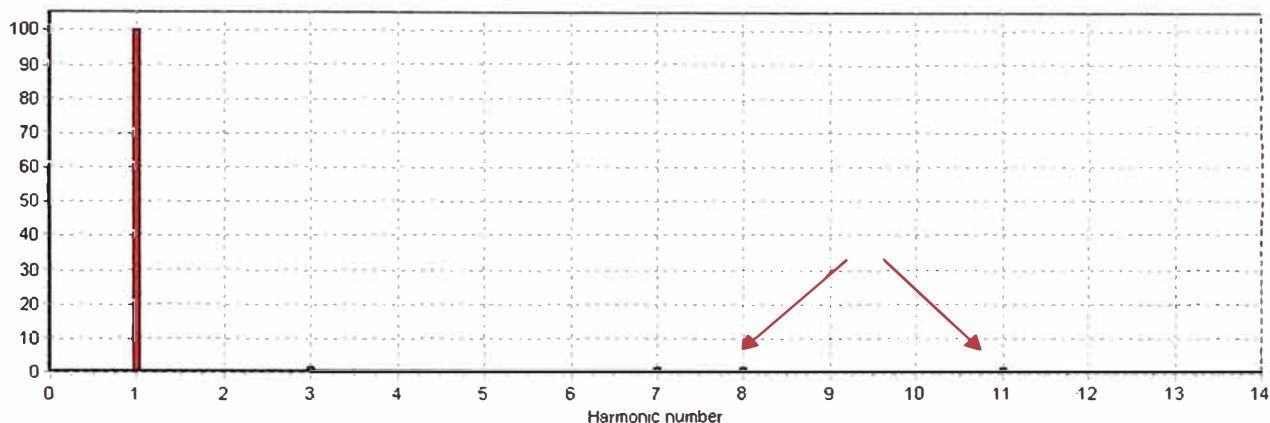


Figura 1.2 Distorsión armónico de corriente PWM (Fuente: propia [45])

El voltaje PWM que alimenta el motor hay presencia de componentes armónicos de orden superior a 40 como se muestran en la figura 1.3. Ante la presencia de armónicos de orden alto el sistema de aislamiento es analizado mediante la representación de un circuito capacitivo. El sistema de aislamiento a tierra y ofrecen una impedancia menor cuanto mayor es la componente armónica. Para los componentes armónicos de orden 40 la impedancia a tierra es 40 veces menor que la impedancia a la frecuencia de red de 60 Hz. Este circuito de baja impedancia a tierra pasa a través de los rodamientos y produce descargas eléctricas en el rodamiento que dañan sus pistas internas. Para evitar el paso de corriente a través de los rodamientos se recomienda utilizar rodamientos eléctricamente aislados.

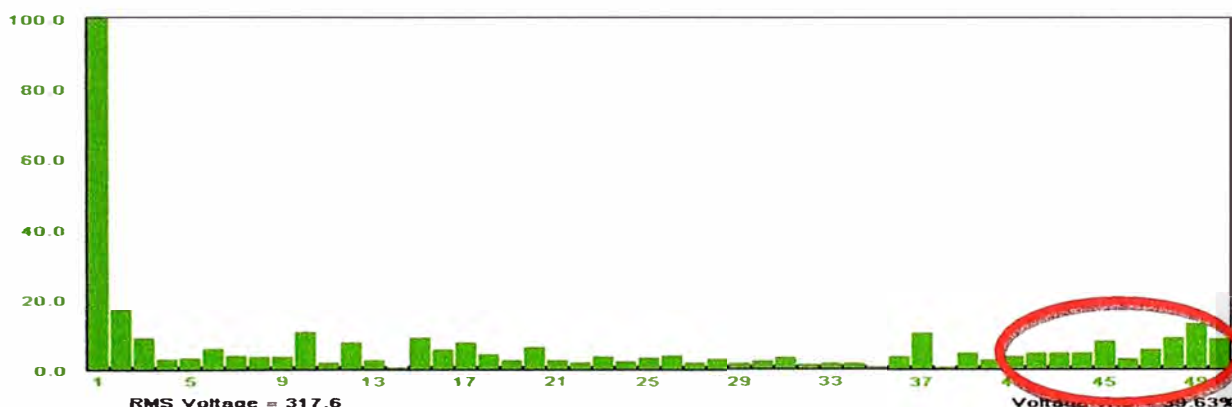


Figura 1.3 Distorsión armónica de voltaje PWM de orden superior (Fuente: propia [46])

b. Casos complementarios

En el análisis del sistema de ventilación de mina se valida que cuando la longitud de conductor entre variador y motor es de 30 metros no se presentan transitorios de voltaje

en las borneras del motor evitando daños en el aislamiento.

En el análisis de la bomba de alta presión de la Planta de desalinización muestra que el filtro a la salida del variador elimina el desbalance de modo común y limitan el paso de armónicos de frecuencias altas evitando los daños por descargas en el rodamiento.

1.3.5 Justificación económica

Para destacar la importancia del análisis realizado como medida para evitar grandes pérdidas económicas, se puede mencionar que, para el caso de la planta textil, la solución recomendada consistía en:

- Contratar un servicio de análisis de calidad de energía y firma eléctrica con el objetivo de dimensionar las características del filtro de línea. El costo del servicio fue de 7,000 dólares; el filtro de línea tiene un costo de 2,000 dólares.
- Reemplazar los rodamientos normalizados por rodamientos aislados. El aislamiento en los rodamientos es de unos 500 dólares.

Como puede notarse, la solución recomendada implica una inversión de 9,500 dólares, menor en comparación con los 28,000 dólares perdidos en una parada de planta. De lo expuesto, lo desarrollado en el presente informe es justificado.

1.4 Alcance del trabajo

En este informe se describe la realización del diagnóstico de sistemas de motores de inducción mediante el análisis de los sistemas de comando PWM de los variadores de frecuencia, planteando luego las alternativas de solución, para lo cual se recurrirá a tres casos de estudio.

En este trabajo se plantea el análisis de las condiciones que conducen a una falla en los sistemas de motor de inducción accionado por variador, se exponen las pautas para identificar los modos de falla y su relación con las características del sistema. El conocimiento de la relación de la falla con la característica del sistema permite realizar las recomendaciones para corregir las condiciones y monitorear los modos de falla.

Como aspecto preliminar se desarrolla el marco teórico conceptual relacionado con el objetivo del informe, el cual se organiza de la siguiente manera:

- Motores de inducción.- Aspectos teóricos/conceptuales y descripción de modos de falla.
- Calidad de energía.- Descripción y aspectos normativos, su influencia en el sistema motriz, calidad de energía suministrada por los variadores y filtros
- Sistemas de comando PWM.
- Variadores y filtros industriales comerciales.
- Pruebas de motores.- En línea y fuera de línea

Como aspecto ilustrativo se recurre a tres casos de estudio, presentando para cada uno de ellos los aspectos generales del caso de estudio, las mediciones, los resultados,

la conclusión del diagnóstico, y finalmente las recomendaciones del caso:

- Rodillo de máquina de textiles no tejido.
- Ventilador de socavón.
- Bomba de alta presión.

Para los tres casos de estudio, se realizan y analizan los sistemas de comando PWM luego de las mediciones de calidad de energía y de Firma Eléctrica en tres variadores de las marcas usadas en la industria local (Siemens, ABB, Allen Bradley). Las pruebas dinámicas se realizaron con el analizador de máquinas eléctricas ATPOL II.

Para cada caso de estudio se presenta/describe sus aspectos principales y la descripción del motor y del variador, para luego presentar las mediciones de cada prueba y su respectivo análisis, luego se presenta un resumen de los resultados, y seguidamente el resumen de conclusiones del diagnóstico. Se finaliza presentando las recomendaciones para corregir cada defecto detectado.

CAPÍTULO II TEORIA DE MÁQUINAS ELECTRICAS

En este capítulo se exponen las bases teóricas conceptuales más importantes para la comprensión del sistema descrito en el presente informe.

2.1 Motores de inducción

El motor de inducción trifásico (asíncrono) es actualmente el motor más usado para aplicaciones industriales, es sencillo y de bajo costo. Para poder controlar su velocidad se requiere un control más complejo que para otros tipos de motores

2.1.1 Aspectos teóricos/conceptuales

El motor de inducción trifásico (figura 2.1) se conforma de un estator fijo, devanado trifásico alimentado por la red eléctrica trifásica y un rotor giratorio. No hay conexión eléctrica entre el rotor y estator. La fuerza electromotriz en el rotor se induce por el flujo electromagnético a través del entrehierro. El Estator y Rotor están contruidos por láminas de hierro altamente magnetizables, la laminación permite pérdidas por corrientes de Foucault e histéresis bajas.

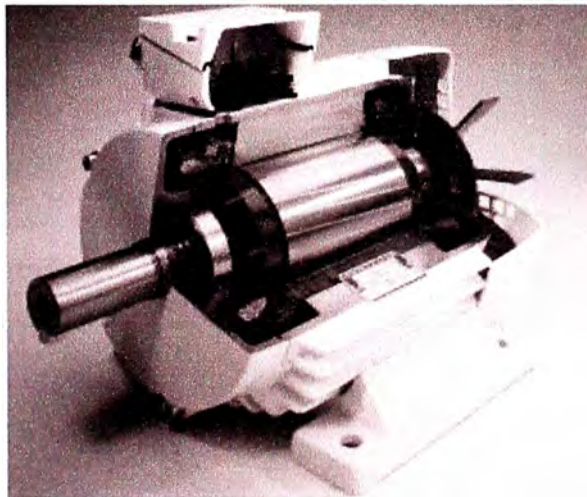


Figura 2.1 Motor Trifásico Jaula de Ardilla (Fuente: Referencia [1])

A continuación se explica lo siguiente: Estator, rotor, aislamiento, motores diseñados para ser controlado por variador.

a. Estator

El devanado del estator (cobre) está formado por tres bobinas individuales que están desfasados geométricamente 120 grados (figura 2.2). Cuando se conecta a la red la corriente de entrada magnetiza al estator y esta corriente de magnetización genera un

campo rotativo que gira a velocidad de sincronismo (60 Hz si es red y variable si la provee un Variador de frecuencia).

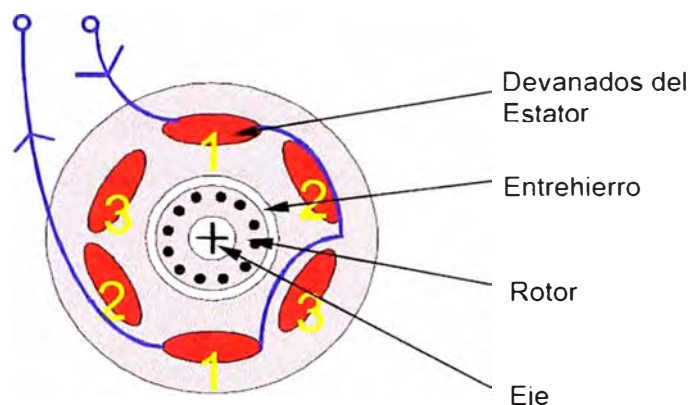


Figura 2.2 Devanado de motor de inducción (Fuente: Referencia [30])

El núcleo del estator (hierro) es donde se aloja el devanado de estator y donde circulan los campos magnéticos generados. El núcleo está formado de hierro de baja reluctancia con láminas aisladas entre sí para reducir las corrientes de Foucault. Los campos magnéticos cruzan el entrehierro entre el estator y rotor induciendo corrientes en el devanado del rotor, afectándose así con toda distorsión que sufra el devanado del estator.

b. Rotor

Los motores de inducción trifásicos más usados son los de jaula de ardilla. En estos motores el rotor está formado por unas láminas cilíndricas de hierro apiladas formando un cilindro ranurado para permitir el paso de barras de aluminio o de cobre unidos por anillos en los extremos para formar circuitos cerrados.

c. Aislamiento

Las pérdidas eléctricas en un motor ocurren con la consiguiente transformación de esas pérdidas en energía térmica en diversas partes de la máquina.

La energía térmica produce el calentamiento del aislamiento, el cual se comienza a degradar rápidamente cuando supera su temperatura característica.

Los materiales aislantes que se utilizan en las máquinas eléctricas se clasifican térmicamente, según la IEC (International Electrotechnical Commission) [38].

- CLASE B: comprende materiales a base de poliéster y poliméricos aglutinados con materiales orgánicos o saturados con éstos. La temperatura característica de esta clase es de 130 grados centígrados.

- CLASE F: comprende materiales a base de mica, amianto y fibra de vidrio aglutinados con materiales sintéticos, en general siliconados, poliéster o epóxidos. Temperatura característica de 155 grados centígrados.

- CLASE H: comprende materiales a base de mica, asbestos o fibra de vidrio aglutinados

típicamente con siliconas de alta estabilidad térmica, presentando una temperatura característica de 180 grados centígrados.

La temperatura característica es el límite superior de operación nominal del aislamiento en la cual se estima un periodo de vida largo.

La degradación de aislamiento reduce la vida útil del material, en la ecuación 2.1 [39] la vida útil guarda relación exponencial con la temperatura de operación y clase de aislamiento.

$$T_{\text{UTIL}} = C e^{-\alpha T} \quad (2.1)$$

Donde:

T_{UTIL} : representa la vida útil del aislamiento esperada, en años.

C y α : son constantes que dependen de la clase de aislamiento.

T : representa la temperatura de operación en grados centígrados con la cual el aislamiento trabaja continuamente.

Los valores típicos de α son alrededor de 0.08, que reemplazando en la ecuación 2.1 se puede observar que un incremento de temperatura de 8 grados la vida útil se ve reducida por un factor de 2.

d. Motores diseñados para ser controlado por variador

Los motores requieren ser controlados según el requerimiento y/o dificultad del proceso, de allí la importancia del control.

d.1 Arranque y control de motores

El control simple o arranque directo, es en el cual la energía es aplicada sin ninguna regulación de voltaje y/o frecuencia.

Este sistema se utiliza en plantas antiguas y el control de flujo o velocidad se realiza por métodos mecánicos como válvulas y engranajes. En este tipo de arranque el motor toma su velocidad nominal inmediatamente presentándose grandes corrientes de arranque.

El control estrella triángulo limita el voltaje mediante la conexión de las bobinas, reduce el par y la corriente durante el arranque, luego de unos segundos hace la conmutación a arranque directo.

Mediante el arrancador suave se controla electrónicamente el voltaje durante el arranque, luego de unos segundos se realiza la conmutación a arranque directo

Cuando el proceso requiere control de flujo y velocidad (caudal de bombas, velocidad de fajas) se utiliza accionamientos mecánicos amortiguadores, acoplamiento hidráulico, válvulas de estrangulamiento, estos tienen una eficiencia muy baja así como difícil automatización.

Los variadores de velocidad permiten un control de proceso con una eficiencia mayor

que los accionamientos mecánicos.

d.2 Consideraciones de selección de motor para ser accionado con variador

Para un motor accionado por variador de velocidad los sistemas de aislamientos y partes mecánicas como rodamientos, ventiladores merecen atención especial.

Si las partes mecánicas giran a bajas velocidades debe evaluarse la lubricación de los rodamientos, la ventilación del motor y el ruido electromagnético y si giran a altas velocidades debe prestarse especial atención a la construcción de los rodamientos, la lubricación, el ruido del ventilador, el balanceo, las velocidades críticas, los sellos de los ejes y el momento máximo del motor.

El sistema de aislamiento debe soportar voltajes transitorios elevados repetitivos, elevadas diferencias de tensión (dv/dt) por lo que las clases térmicas de aislamiento adecuadas para motores accionados por variador de velocidad son las F y H.

2.1.2 Descripción de modos de falla

Esta sección se enfoca en las fallas eléctricas pero se mencionan aspectos generales de las fallas mecánicas.

a. Fallas mecánicas

Las fallas mecánicas se manifiestan en vibraciones produciendo fatiga en los elementos. Entre las fuentes principales del desbalance esta la acumulación de polvo en los álabes del ventilador, excentricidad del rotor, deflexión del eje, rodamientos, alojamiento de los rodamientos, vibraciones.

b. Fallas eléctricas

El devanado del estator de un motor eléctrico tiene dos sistemas principales de aislamiento: entre devanado y tierra, y entre espiras. Las fallas eléctricas en los motores eléctricos son: Fallas de aislamiento a tierra, fallas eléctricas en el aislamiento de bobinas, conexiones flojas, contaminación, sobrecalentamiento, rotor con excentricidad, rotor con barras fisuradas, problemas de fundición de motor.

b.1 Fallas eléctricas en aislamiento de las bobinas

La mayoría de las fallas en el devanado del motor están relacionadas con los daños en el aislamiento, produciendo los desbalances que generan calentamiento, movimiento de las bobinas, corrientes elevadas, desencadenándose en cortos entre espiras, bobinas, fases y a tierra.

- Corto entre espiras, bobinas y fases.- Esta falla en el aislamiento es causado en por la presencia de contaminantes como polvo, humedad, lubricantes, vibraciones picos de voltaje o transitorios.

- Falla por desbalance de voltaje.- La degradación del aislamiento de una fase se puede deber a un desbalance de voltaje usualmente originado por un desbalance de cargas en

el sistema de distribución eléctrico de planta, conexiones flojas. Un desbalance de voltaje puede resultar en un desbalance de voltaje mayor.

- Falla por sobrecarga.- El deterioro similar de las tres fases del aislamiento del devanado es causado típicamente por cargas superiores a la potencia nominal excediendo los voltajes y corrientes de los estándares NEMA MG 1-2009 [3]

b.2 Causas de las fallas eléctricas en aislamiento de las bobinas

Las fallas eléctricas se presentan en los bobinados del estator y el rotor. Las fallas eléctricas empiezan pequeñas, se acentúan y terminan en falla. Un factor de falla es el ozono, un gas muy corrosivo que se emite con la degradación del aislamiento (arcos entre espiras), entonces la tasa se acelera.

Los factores que originan las fallas eléctricas son: Sobrecarga, vibración, contaminación, edad, calor, controladores VFD, ciclos de Arranque/paro frecuentes, defectos de construcción, calidad de alimentación, distorsión armónica.

Las fallas eléctricas en el devanado del estator pueden darse por asimetrías en el estator debido a defectos de construcción cuando no se siguen las normas mínimas necesarios para realizar este tipo de trabajos (rebobinados). La asimetría en el devanado produce pequeños campos magnéticos en sentido contrario al campo principal, estos campos producen esfuerzos proporcionales al cuadrado de la corriente, estos esfuerzos tienen su máximo valor en el arranque cuando la corriente toma varias veces la corriente nominal.

Esta falla en motores trifásicos se produce cuando una fase se abre por una falla en el suministro, controlador, fusible o conexiones.

2.1.3 Circuito equivalente de motor eléctrico

Para el cálculo de la influencia de una carga fuente armónica en la red es necesario conocer la impedancia equivalente vs la frecuencia para la carga y la red. La carga es representada como una fuente de corrientes armónicas y la red con su circuito equivalente.

El Teorema de Thevenin establece que el circuito eléctrico comprendido entre dos terminales puede sustituirse por un circuito equivalente constituido por una fuente y una impedancia.

La impedancia de Thevenin entre los dos puntos se encuentra de la corriente que fluye entre dichos puntos y la tensión entre esos puntos.

La máxima impedancia de corto circuito (ISC) se encuentra a partir de la impedancia Thevenin cuando Z_{ext} (impedancia de la carga) es cero (corto circuito).

En la figura 2.3 se grafica la fuente e impedancia Thevenin. En la ecuación 2.2 en corto circuito la impedancia Z_{CC} es igual a Z_{th} y U_n es la tensión nominal

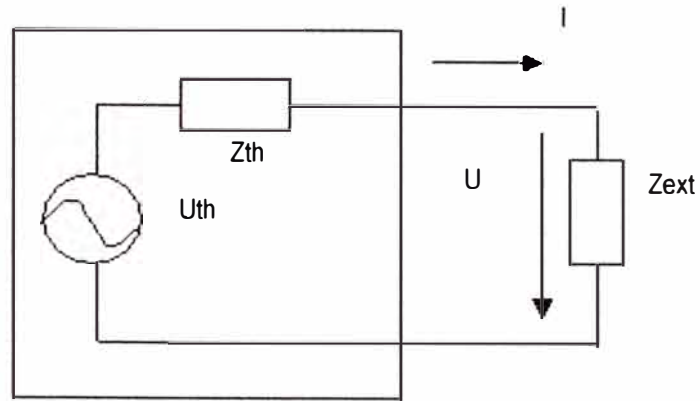


Figura 2.3 Circuito Equivalente de motor eléctrico (Fuente: Referencia [40])

$$S_{cc} = \frac{U_n^2}{Z_{cc}} \quad (2.2)$$

Entonces:

$$I_{sc} = \frac{S_{cc}}{Z_{th}} \quad (2.3)$$

2.1.4 Circuito equivalente capacitivo

Los circuitos por donde fluyen las corrientes de modo común pueden ser reconocidos en el modelo de circuito equivalente para altas frecuencias en los cuales los aislamientos son representados por capacitancias las cuales representan menor impedancia a mayores frecuencias las cuales están presentes en los voltajes de modo común de las ondas PWM.

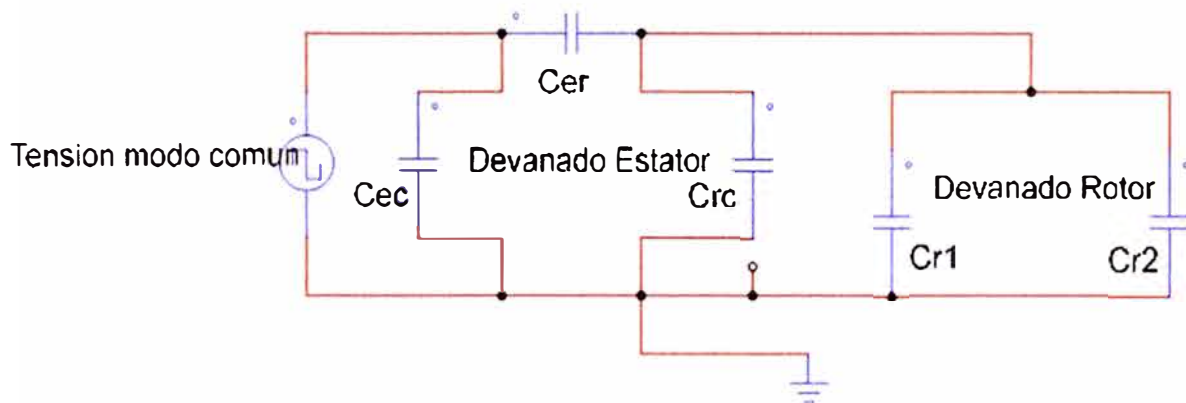


Figura 2.4 Circuito equivalente Capacitivo (Fuente: Referencia [43])

Donde:

- C_{er} Capacitor formado entre el devanado estatórico y las chapas del rotor (Dieléctrico=Entrehierro + aislante de ranura + aislamiento de los alambres).
- C_{rc} Capacitor formado entre las chapas del rotor y el estator (Dieléctrico = entrehierro)
- C_{ec} Capacitor formado entre devanado estatórico y carcasa (Dieléctrico = aislamiento)

de ranura + el aislamiento de los alambres)

- C_{r1} y C_{r2} Capacitancias de los cojinetes delantero y trasero, formadas por las pistas de desplazamiento de los anillos internos y externos, teniendo las bolas (o rodillos) metálicos en el interior. (Dieléctrico= espacios entre las pistas de desplazamiento y las bolas + grasa del rodamiento)

2.2 Calidad de energía

La energía eléctrica es la principal fuente de energía para mover las industrias, la correcta administración de esta energía permite ahorros de energía, reducir costos de operación y mantenimiento.

La calidad de energía eléctrica es referida a las distorsiones y estabilidad del voltaje, frecuencia y la continuidad del servicio eléctrico. Estas distorsiones pueden ser: interrupciones, desbalances, deformaciones producidos por transitorios y armónicos.

Los generadores de las centrales eléctricas son por lo general trifásicos. Esta tensión trifásica es de amplio uso en la industria para mover motores trifásicos. La onda trifásica de las centrales debe ser una onda sinusoidal con baja distorsión según la regulación de distorsión en el Perú.

2.2.1 Fuente de distorsión a la calidad de energía

Para aumentar la competitividad las empresas optimizan sus procesos productivos mediante control y automatización de la operación de sus motores eléctricos.

Los equipos de control y automatización con equipos de electrónica de potencia son una de las principales fuentes de distorsiones de la forma de onda de voltaje y corriente.

Estas cargas no lineales son fuentes de perturbación de los sistemas eléctricos, inyectan armónicos de corriente, distorsionando su forma de onda. Esta forma de onda de corriente al interactuar con la impedancia del sistema distorsiona el voltaje y provoca mal funcionamiento en los equipos asociados al sistema. Para establecer responsabilidades entre el cliente y Distribuidor se ha creado normativas entre las más utilizadas tenemos las IEEE 519 [4]

2.2.2 Descripción y aspectos normativos

La norma IEEE 519 – 1992 trata principalmente de los armónicos generados por cargas no lineales con la finalidad de que estos problemas puedan ser prevenidos, su cumplimiento está siendo solicitado cada día más debido al incremento del uso de variadores de velocidad y otras cargas no lineales. En la norma se definen los tipos de cargas, la topología de variadores y la distorsión armónica así como sus límites permisibles aceptables por el consumidor.

La Norma IEC 61000-4 define los métodos de ensayo y de medición para definir la calidad de energía y exige cuatro periodos de inspección de la calidad de las tres ondas

de voltaje. Estos Intervalos son:

- 200 ms para 12 ciclos 16 ms
- 3 segundos intervalos muy cortos
- 10 minutos intervalos cortos
- 2 horas intervalos largos

Para obtener valores

- Tensión eficaz rms
- Frecuencia
- Armónicos
- Flicker
- Desequilibrio de voltajes.

La norma EN 50160 describe, en el punto de entrega de energía al cliente, las características de la tensión suministrada en condiciones de demanda normales. Las características de tensión suministrada son:

- Frecuencia.
- Amplitud.
- Forma de Onda.
- Simetría.

2.2.3 Efectos asociados a la calidad de energía

Los efectos asociados con la calidad de energía son:

- Incrementos de pérdidas en el motor, las pérdidas en cables eléctricos y transformadores con un 12 por ciento del consumo eléctrico [5].
- Reducción de la vida útil del aislamiento debido al calentamiento.
- Reducción de la producción e incremento del costo de producción.
- Daño a la imagen empresarial y clima laboral.

2.2.4 Influencia en el sistema motriz

El sistema Electromotriz está formado por:

- En el suministro de energía (Generador, Transformadores, cables)
- Controles PLC Arrancadores Suaves, VFD, contactores, relés.
- Motores (Estator, rotor , entre hierro)
- Proceso (Torque, ciclos, criticidades)

Los efectos de los armónicos reducen el tiempo de vida de capacitores transformadores y motores, dado que un incremento de 10% en la tensión nominal (aporte de voltaje por los armónicos) reduce la vida a la mitad. Las causas de las anomalías generadas por los armónicos están basados en los fenómenos de efecto Joule, Skin y Foucault.

En los cables conductores las corrientes armónicas aumentan la corriente eficaz y su consecuente efecto en el calentamiento de conductores por efecto Joule. Los armónicos superiores a medida que aumenta la frecuencia acentúan el efecto Skin haciendo menor la sección efectiva de los conductores.

En los controles, PLC, arrancadores suaves, VFD, contactores, relés, las intensidades armónicas aumentan las corrientes RMS y este aumento produce disparos intempestivos de protección. Las corrientes armónicas producen EMI interferencias electromagnéticas que producen fallas en los controles electrónicos.

En los transformadores las corrientes armónicas aumentan la corriente eficaz y su consecuente efecto en calentamiento de conductores por efecto Joule. Las pérdidas por corrientes de Foucault en el núcleo son proporcionales a la frecuencia, desclasificación de la capacidad de carga de un transformador en función del factor K de la carga [6].

En los motores las corrientes armónicas aumentan la corriente eficaz y su consecuente efecto en calentamiento de conductores por efecto Joule.

Hay daños en los rodamientos pues las pérdidas por corrientes de Foucault en el núcleo son proporcionales a la frecuencia. Los armónicos de alta frecuencia producen incrementos de pérdidas, sobrecalentamiento, vibraciones, generación de pares parasitarios y reducción del par útil.

2.2.5 Soluciones para atenuación de armónicos

Las soluciones de armónicos pasa por el conocimiento del tipo de perturbación así como de las instalaciones para elegir las soluciones: modificación en las instalaciones o instalación de dispositivos en la red.

a. Modificaciones en las instalaciones

Una vez identificadas las cargas que genera las perturbaciones hay que posicionar un circuito para agrupar estas cargas lo más cerca del transformador general con un circuito de menor impedancia que hacia las cargas sensibles. Una solución más robusta es utilizar transformadores independientes para cargas perturbadoras.

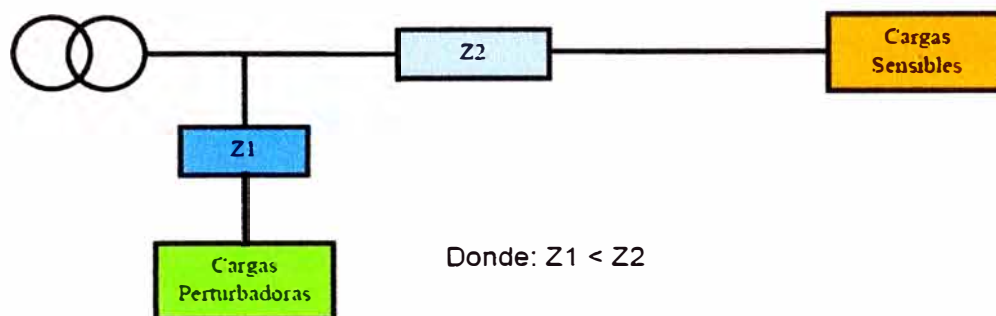


Figura 2.5 Circuito para cargas perturbadoras (Fuente: Referencia [17])

b. Filtros de armónicos

Entre las soluciones con instalación de dispositivos en la red se tienen soluciones con

dispositivos pasivos (R, L, C) y activos (electrónica de potencia).

- Reactancia de red.- La reactancia de red es una solución básica y económica para cuando el variador generador de perturbación no tiene ningún tipo de filtro de armónicos, una reactancia de 3-5% puede reducir los armónicos de orden 5 y 7.

- Reactancia CC en el bus DC.- Estas reactancias suelen estar integradas en los variadores de prestaciones avanzadas y permiten una corriente más constante en el bus DC requiere de menor tamaño que la reactancia de red por consiguiente menores pérdidas térmicas (Ver figura 2.6).

- Rectificadores múltiples.- Cuando las cargas sensibles exigen un THD bajo, una solución es el uso de rectificadores múltiples con el uso de rectificadores de 12 pulsos formado por 2 rectificadores de 6 pulsos en paralelo para generar armónicos de orden 11, 13 y superiores y con un THD de entre 8 y 15 por ciento [4]. El diagrama de un rectificador de 12 pulsos se muestra en la Figura 2.7.

- Filtros Pasivos.- Los filtros pasivos son constituidos con inductancias y capacitancias sintonizadas en la frecuencia del armónico, generando un circuito de baja impedancia para la corriente armónica, entonces esta corriente fluye por el filtro. Hay que tener especial atención con las resonancias en la red, el filtro pasivo puede ser un circuito de baja impedancia para otras cargas generando circulación de corrientes capacitivas (2.8).

- Filtros Activos.- Los filtros activos solucionan la emisión de armónicos generados por los dispositivos de potencia con un algoritmo de control que regenera la onda de corriente de entrada, una caso particular son los variadores con rectificadores activos con IGBT, que reemplazan los comunes diodos por IGBT controlados para reducir la emisión de armónicos (Figura 2.9).

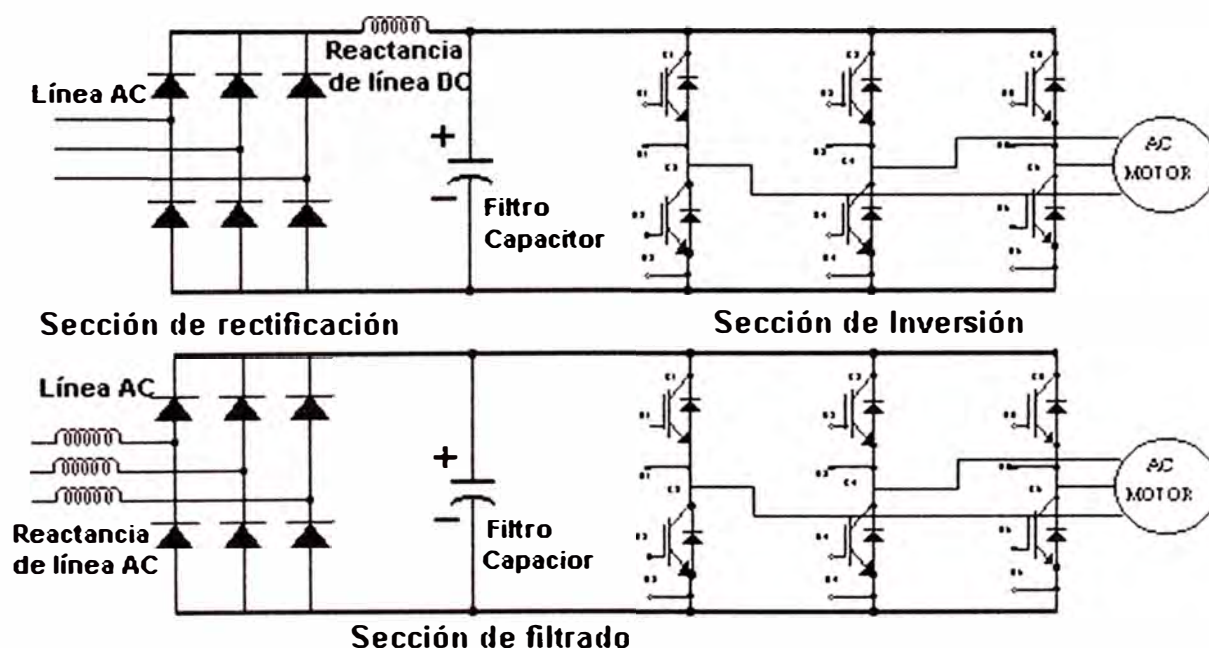


Figura 2.6 Reactancia de red e inductancia CC (Fuente: Referencia [18])

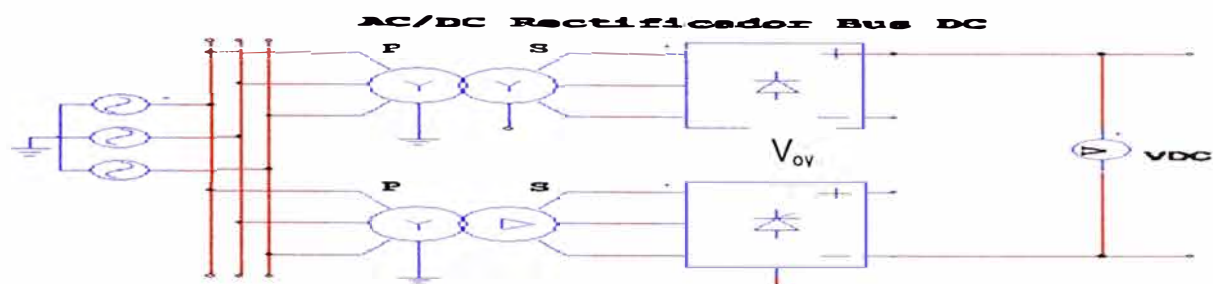


Figura 2.7 Rectificador Trifásico 12 pulsos (Fuente: Referencia [9])

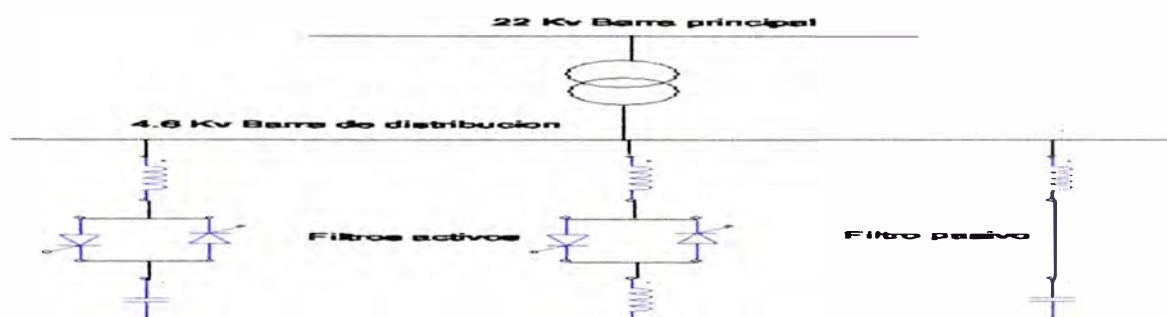


Figura 2.8 Diagrama unifilar con filtro (Fuente: Referencia [43])

2.3 Sistemas de comando PWM

Las aplicaciones industriales requieren del control de la velocidad y del torque de los motores eléctricos.

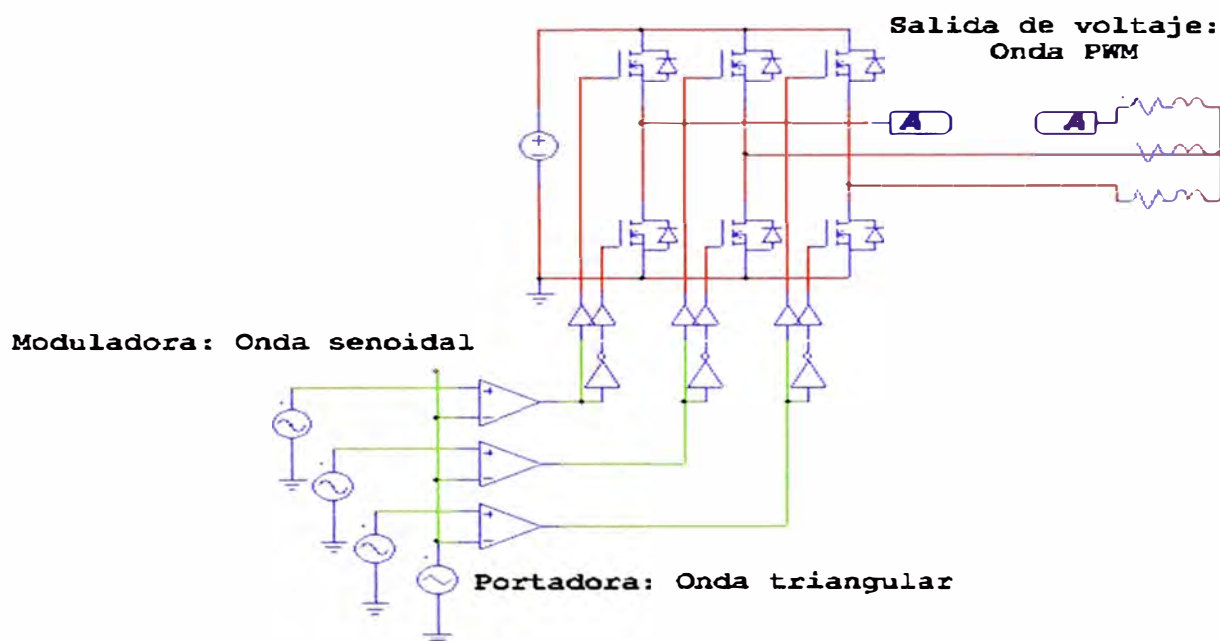


Figura 2.9 Circuito inversor PWM (Fuente: Referencia [43])

motores eléctricos.

La técnica de PWM consiste en generar un pulso rectangular con un ciclo de trabajo controlable, este control puede ser de 0 a 100 %, en la figura 2.10 se puede observar ciclos cortos (10%) y ciclos largos (90%). El número de casos intermedios de duración de ciclo se denomina resolución de PWM.

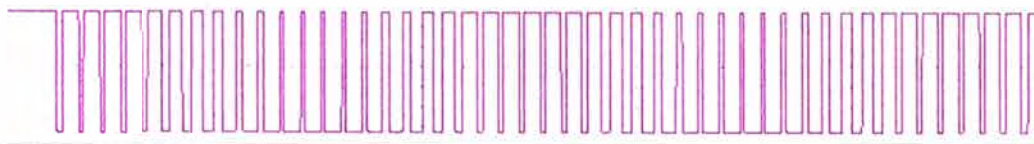


Figura 2.10 Pulso rectangular (Fuente: Referencia [23])

2.3.1 Sistemas de comando PWM Escalar

Las aplicaciones más comunes (bombas y ventiladores) requieren del control de velocidad. Con este objetivo se emplea la técnica de modulación de pulso PWM.

De este modo, con el comando PWM se controla el voltaje y la frecuencia del campo girante y por consiguiente la velocidad mecánica.

El método PWM no utiliza un dispositivo de realimentación, denominándose control escalar o accionamiento de lazo abierto, el estado del rotor se ignora. Por lo tanto el par se ignora.

En la ecuación 2.4 [7] se puede controlar el flujo con el control de voltaje y frecuencia que entrega el control PWM, como ya se tiene controlado el flujo, en la ecuación 2.5 [11] se nota que el torque depende de la corriente y la corriente depende de la carga concluyendo que, para el control PWM, el torque es proporcional a la carga, no teniendo control del torque.

$$\phi_m = k_2 \frac{V_1}{f_1} \quad (2.4)$$

$$T = k_1 \phi_m I_2 \quad (2.5)$$

La componente DC se elimina usando conmutación de voltaje bipolar, por lo tanto los inversores PWM son capaces de controlar la magnitud de tensión y la frecuencia de la componente fundamental.

a. Modulación PWM basado en portadora

Una señal sinusoidal de baja frecuencia (60Hz), llamada señal moduladora, se compara con una señal portadora típicamente una señal triangular, ambas señales se identifican por su amplitud y frecuencia, en base a estos parámetros se definen las características del modulador (Figura 2.10).

- Índice de modulación de amplitud, m_a .- Es la relación entre señal moduladora y señal portadora.

- Índice de modulación en frecuencia, m_f .- Es la relación entre frecuencia de portadora y frecuencia de señal moduladora

- Frecuencia de portadora.

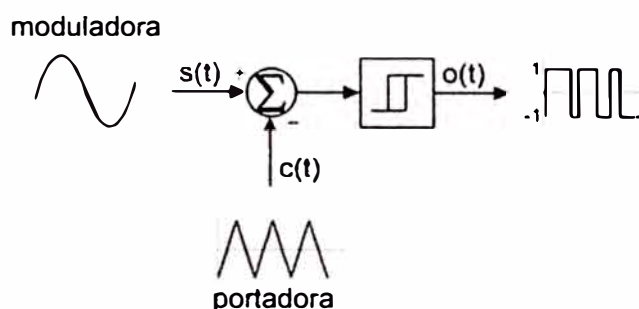


Figura 2.11 Modulación PWM (Fuente: Referencia [24])

Según la amplitud de la señal moduladora los pulsos cambian de anchura, en la figura 2.12 la modulación es menor que 1. La razón de modulación en frecuencia es mucho mayor que 1.

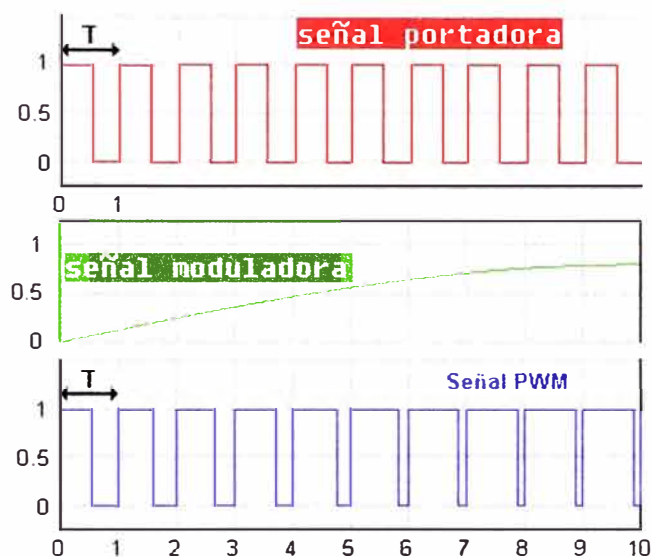


Figura 2.12 Señales comparadas PWM (Fuente: Referencia [25])

El aumento de frecuencia de portadora ocasiona un desplazamiento de los armónicos generados por la portadora hacia frecuencias mayores

b. Modulación PWM unipolar

En el puente completo de la figura 2.13 con el control por modulación PWM unipolar se logra el voltaje entre A y B este entre 0 y la tensión de la fuente de del bus DC siguiendo a polaridad de la moduladora.

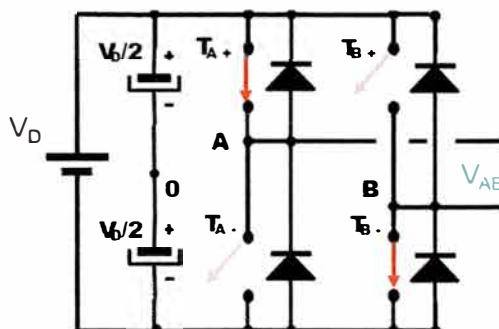


Figura 2.13 Puente inversor de onda completa (Fuente: Referencia [27])

Cuando el valor instantáneo de la señal de referencia es positiva, la señal estará entre 0 y $+V_D$. Cuando el valor de la señal de referencia es negativo, la señal estará entre 0 y $-V_D$.

Para implementar el control por modulación PWM unipolar, en el puente de onda completa se requiere 2 señales de control:

- IGBT A+ conduce cuando el voltaje de control es mayor que la portadora.
- IGBT A- conduce cuando el voltaje de control es menor que la portadora.
- IGBT B+ conduce cuando el (-voltaje de control) es mayor que la portadora.
- IGBT B- conduce cuando el (-voltaje de control) es menor que la portadora.

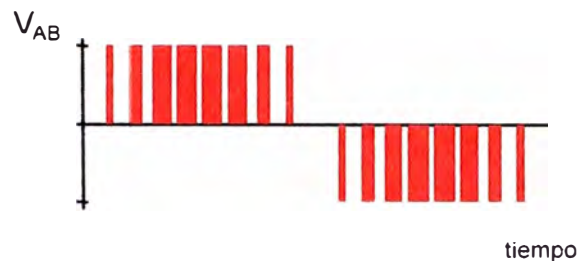


Figura 2.14 Modulación Unipolar (Fuente: Referencia [27])

c. Modulación PWM bipolar

En el puente completo de la figura 2.13 con el control por modulación PWM bipolar se logra que el voltaje entre A y B es alterno entre $+$ y $-$ la tensión de la fuente de del bus DC.

Cuando el valor instantáneo de la señal de referencia es mayor que la portadora la señal estará en $+V_D$, cuando el valor de la señal de referencia es menor será $-V_D$.

Para implementar el control por modulación PWM bipolar en el puente de onda completa:

- Los conductores IGBT A+ y IGBT B- en rojo conducen cuando el voltaje de la moduladora es mayor que el voltaje en la portadora.
- Los conductores IGBT A- y IGBT B+ en rojo conducen cuando el voltaje de la moduladora es menor que el voltaje en la portadora.

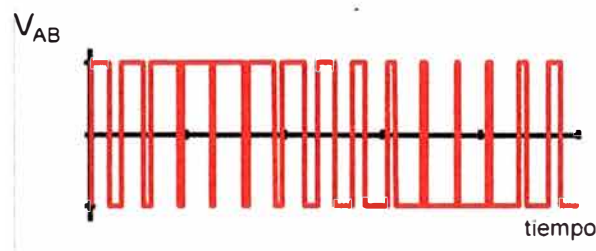


Figura 2.15 Modulación Bipolar (Fuente: Referencia [27])

d. Espectro de PWM Escalar

En la mayoría de los casos la razón de modulación de frecuencia suele ser mucho mayor que la unidad, es número entero e impar para evitar los armónicos, debe ser impar

para evitar los indeseables armónicos de secuencia negativa.

La señal PWM no entrega onda sinusoidal pura debido a las armónicas que producen las altas frecuencias de conmutación de los IGBT, así tanto voltaje y corriente no son las señales deseadas. Existe alto contenido de distorsión armónica THD, rizado en la corriente. En el mejor de los casos la señal de corriente entregada por los variadores contiene armónicos cercanos al 5% admisible por la norma.

Si se conecta la señal rectangular a un analizador de espectros es fácil ver su contenido en frecuencia. En su espectro se observa la componente DC, la componente fundamental y sus armónicas.

e. Armónicos de la modulación PWM Escalar

La señal obtenida en la modulación PWM escalar contiene distorsión a partir de la señal objetivo entre 0 y 60 Hz (frecuencia moduladora). La distorsión de armónicos a partir de la fundamental las identificamos con la FFT (Transformada Rápida de Fourier).

Los niveles y orden de distorsiones de armónicos dependen del Índice de modulación de amplitud, modulación de frecuencia y frecuencias de portadora/moduladora.

La amplitud del primer armónico de tensión es proporcional a la tensión de entrada y al índice de modulación.

En una modulación con $m_a=0.8$ la distorsión de armónicos de la señal PWM se encuentran alrededor del índice de modulación de frecuencia por la frecuencia de moduladora y sus múltiplos. Ver figura 2.16

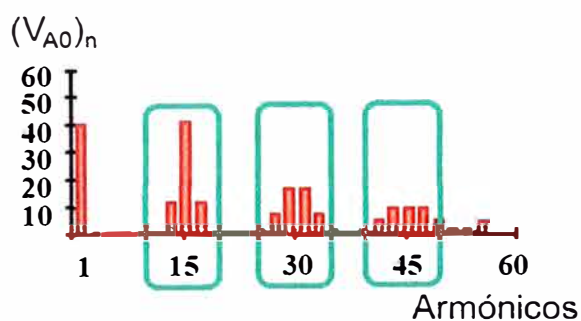


Figura 2.16 Armónicos de la señal PWM (Fuente: Referencia [27])

En una modulación típica de $m_f = 15$, cuando la m_a es mayor que la unidad los armónicos se incrementan en armónicas de baja frecuencias.

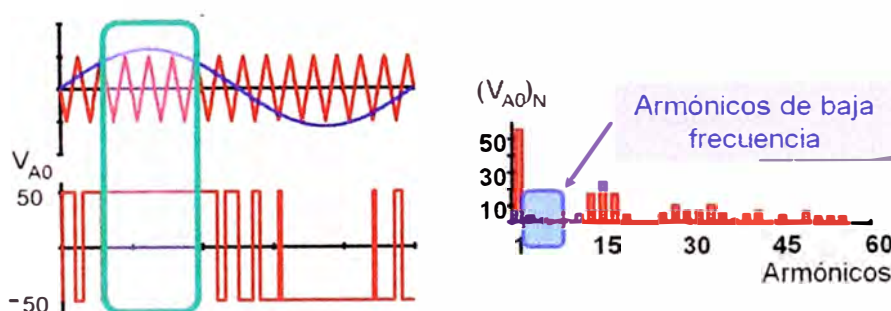


Figura 2.17 Armónicos de la señal PWM (Fuente: Referencia [27])

f. PWM tensiones de modo común

La señal de Voltaje PWM a la salida de un variador no es equilibrada, la suma vectorial instantánea del voltaje en las tres fases no es cero, por lo que el neutro no se encuentra a 0 voltios. En la señal de voltaje PWM la suma de la componente fundamental (descomposición de la onda cuadrada) de las ondas trifásicas de salida está equilibrada, no así las sumas de las tres tensiones instantáneas.

En la figura 2.17 se muestra las tres señales de fases y la suma instantánea de tensión de modo común.

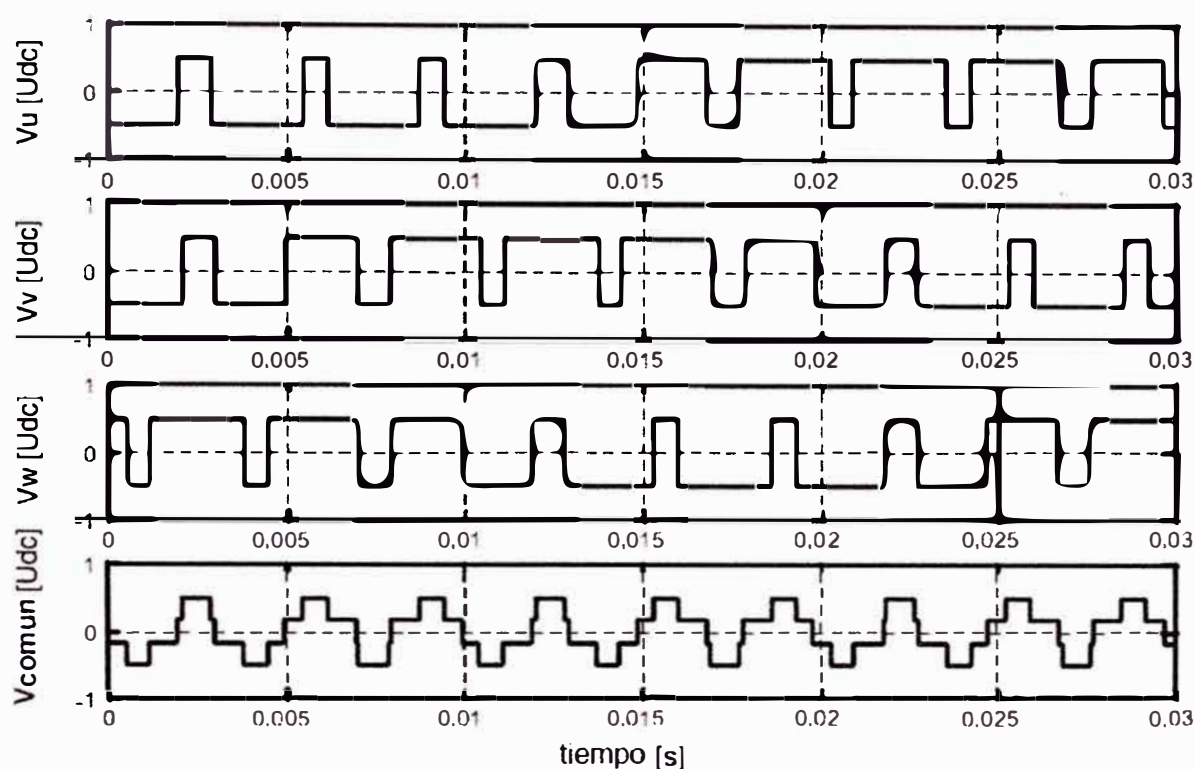


Figura 2.17 Aislamientos de motor eléctrico (Fuente: Referencia [41])

g. PWM de secuencia negativa y positiva

La secuencia se refiere al sentido de giro de cada descomposición armónica con respecto a la fundamental. Esta secuencia indicará el sentido en que cada orden de armónica ejercerá torsión en el eje. Las armónicas que se presentan en sistemas balanceados tienen una relación directa con las componentes de secuencia positiva, negativa y cero. Esto se puede ver en el siguiente sistema trifásico balanceado.

$$I_a = I \sin(h\delta_a) \quad I_b = I \sin(h\delta_b) \quad I_c = I \sin(h\delta_c) \quad (2.6)$$

Donde para que sea un sistema trifásico balanceado, entonces

$$\delta_a = \omega t \quad \delta_b = \omega t - 120^\circ \quad \delta_c = \omega t + 120^\circ \quad (2.7)$$

De esta manera para los diferentes valores de h se tiene que:

Para $h=1$ (secuencia positiva)

$$I_a = I \sin(\omega t) \quad I_b = I \sin(\omega t - 120^\circ) \quad I_c = I \sin(\omega t + 120^\circ) \quad (2.8)$$

Para $h=2$ (secuencia negativa)

$$I_a = I \sin(2\omega t) \quad I_b = I \sin(2\omega t + 120^\circ) \quad I_c = I \sin(2\omega t - 120^\circ) \quad (2.9)$$

Para $h=3$ (secuencia cero)

$$I_a = I \sin(3\omega t) \quad I_b = I \sin(3\omega t) \quad I_c = I \sin(3\omega t) \quad (2.10)$$

2.3.2 Sistemas de comando PWM Vectorial

Las aplicaciones como fajas transportadoras y rodillos (papeleras y minería) que requiere control de torque preciso, requiere del control del flujo que está relacionado con el torque. La técnica de modulación de ancho de pulso por vector de espacio permite mejorar la respuesta dinámica del motor de inducción que se caracteriza por su robustez, bajo costo y simplicidad.

Con el uso de modulación PWM vectorial, los motores de inducción aproximan su funcionalidad al de un motor de corriente continua.

2.4 Pruebas de motores

El objetivo de las pruebas de motor es optimizar las tareas de mantenimiento. Si bien el mantenimiento preventivo se basa en tiempo de operación, el mantenimiento predictivo se basa en la condición para programar los mantenimientos de los motores eléctricos.

Las fallas mecánicas y eléctricas de motores eléctricos se pueden identificar en etapa inicial con pruebas eléctricas estáticas y dinámicas.

2.4.1 Pruebas fuera de línea (estáticas)

Las pruebas estáticas se realizan con el motor desenergizado y pueden ser aplicadas a motores de inducción, síncronos de rotor devanado y generadores.



Figura 2.18 Pruebas estáticas de motor (Fuente: Referencia [34])

Existen diferentes pruebas de diagnóstico de motores. Antes de elegir la prueba

adecuada se deben conocer las características del aislamiento del motor. Si el aislamiento está en buen estado este puede soportar peaks de voltaje (correspondiente a pruebas de alto voltaje).

a. Prueba de desbalance de devanado

Se suministra una señal sinusoidal de bajo voltaje al devanado y se mide la respuesta en corriente para identificar cualquier desbalance o una falla potencial.

El análisis de circuito de máquinas eléctricas hace las mediciones de:

- Resistencia (R).
- Inductancia (L).
- Impedancia (Z).
- Ángulo de Fase (Fi).
- Relación Corriente Frecuencia (I/F).

b. Prueba de resistencia de aislamiento a tierra (conocido como megado)

En esta prueba se aplica un voltaje DC entre devanado y la carcasa del motor (la cual debe estar conectada a tierra).

c. Prueba de índice de polarización (IP)

Es una prueba similar a la prueba de resistencia de aislamiento a tierra, se lleva a cabo durante 10 minutos, y se compara la corriente de fuga a tierra en el primer minuto y como esta corriente disminuye con el tiempo debido a la polarización del papel de aislamiento de las ranuras del estator.

d. Prueba de impulso (IP)

Esta prueba se realiza entre fases del devanado con el objetivo de conocer la condición del aislamiento de las espiras. Automáticamente el equipo aumenta lentamente el voltaje de 0 a la tensión de prueba establecida. Se generará una forma de onda basada en la inductancia de la bobina, la distorsión de la forma de onda indicará una anomalía.

e. Prueba de Alto potencial (Hi pot)

Esta prueba se utiliza para someter a esfuerzo el aislamiento a tierra de un motor eléctrico. El voltaje de prueba CA es 2 veces el voltaje nominal más 1000 voltios [32].

2.4.2 Pruebas en línea (Dinámicas)

Las pruebas de motores energizadas se conocen como pruebas de firma eléctrica, que se refiere a la evaluación de forma de onda de voltaje y corriente. Utiliza las herramientas de transformada de Fourier y de demodulación.

Las pruebas se realizan a través de pinzas de corriente y guías de voltaje desde los TCs (Transformadores de corriente) y TPs (Transformadores de potencia) desde el Centro de control de motores.

La figura 2.19 muestra la conexión de las pinzas y guías de voltaje en los transformadores de corriente y voltaje de la línea.

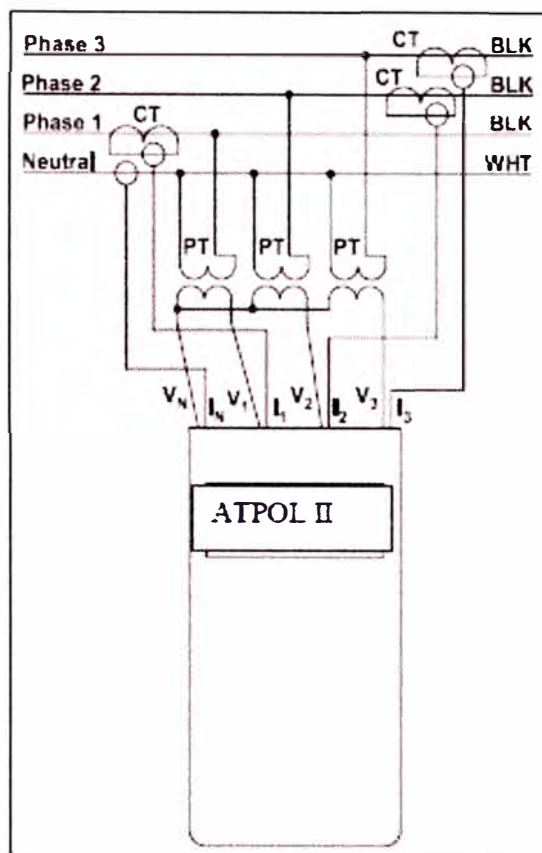


Figura 2.19 Pruebas estáticas de motor (Fuente: Referencia [35])

a. Capacidades de las pruebas en línea

Las capacidades de las pruebas en línea se enfocan en la calidad de suministro así como en la detección de fallas en el motor.

En el análisis de calidad de energía, ve los siguientes parámetros:

- Desbalance de corriente/voltaje
- Armónicos
- Factor de potencia.
- Distorsión de forma de onda.

En la detección de fallas del motor eléctricas y mecánicas se verifica lo siguiente:

- Conexiones.
- Devanado.
- Estator.
- Rotor.
- Entrehierro.
- Rodamientos.
- Acoplamiento.
- Problemas en la carga.

- Desalineación/desbalance.

b. Valores obtenidos de las pruebas en línea

Las mediciones de forma de onda voltaje y corriente permite obtener los valores necesarios para evaluar fallas en el sistema motriz comprendido por la energía, componentes de motor (eléctricas y mecánicas) así como la carga y el proceso.

c. Captura de datos

La captura de onda de voltaje y corriente se realiza simultánea en las tres fases.

c.1 Captura de onda de alta frecuencia.

Para una señal de red de 60 Hz y con el objetivo de poder ver las perturbaciones armónicas de hasta orden 80 (múltiplo) se debe tener una frecuencia máxima de aproximadamente 5000 Hz, según la ecuación 2.11 [33] se obtiene un periodo de muestra mínima cada 78 micro segundos.

$$\text{Periodo de muestreo} = 1 / (2.56F_{\text{max}}) \quad (2.11)$$

En el espectro de frecuencias, los armónicos de la frecuencia de línea 60 Hz y sus armónicos presentes (fallas mecánicas y eléctricas) requieren ser analizados con un filtro de banda de ancho de 1 Hz. En la ecuación 2.12 [33] la F_{max} es 5000 Hz y el ancho del filtro de banda 1 Hz, se obtiene que se requiere 400 líneas de resolución.

$$\text{Anchura de Banda} = F_{\text{max}} / \# \text{ líneas de Resolución} \quad (2.12)$$

Cada línea de espectro requiere 2.56 muestras; para el espectro de 5000 líneas se requiere 12800 muestras.

Las 12800 muestras de 78 microsegundos de periodo dan un total tiempo de muestra de 1 segundo.

c.2 Captura de onda de baja frecuencia

Para la señal de red de 60Hz, con el objetivo de discriminar fallas relacionadas con la energía (dos veces la frecuencia de red) y los problemas mecánicos (a la velocidad de operación) relacionados con el deslizamiento que se fluctúa entre valores de 2- 40 rpm en motores de alta eficiencia, se requiere como F_{max} 120 Hz y el ancho del filtro de banda 0.02 Hz (1.2 rpm).

De la ecuación 2.11 se obtiene un periodo de muestra mínima cada 3255 micro segundos.

En la ecuación 2.12 las F_{max} es 120 Hz y el ancho del filtro de banda 0.02 Hz, de lo que se concluye que se requiere 6000 líneas de resolución.

Cada línea de espectro requiere 2.56 muestras, para el espectro de 6000 líneas se requiere 15360 muestras.

Las 15360 muestras de 3255 microsegundo de periodo dan un total tiempo de muestra de 50 segundos.

c.3 Equipo utilizado para pruebas dinámicas

El equipo utilizado para las pruebas dinámicas es el analizador de motores: ALL-TEST PRO ON-LINE II

EL ALL-TEST PRO ON-LINE II es un instrumento para Análisis de Energía y Firma Eléctrica de poder de análisis para motores AC y DC, motores síncronos, generadores y transformadores. Establece los parámetros para el análisis moderno de la firma de corriente y voltaje. El sistema se basa en las ondas de voltaje y corriente, transformada rápida de Fourier (FFT) y corriente demodulada. El software de análisis de potencia y de análisis de firma electrónica permite realizar un análisis del sistema eléctrico y de motor.

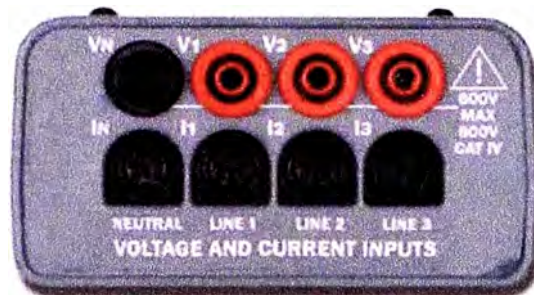


Figura 2.21 Analizador de motores ATPOL II (Fuente: Referencia [36])

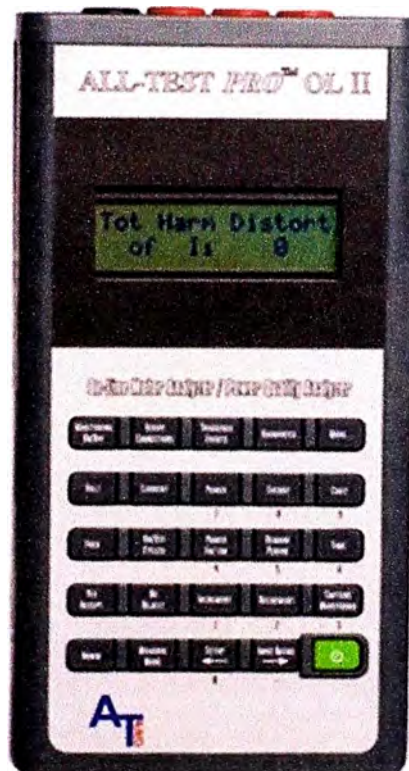


Figura 2.22 Analizador de motores ATPOL II (Fuente: Referencia [36])

Las especificaciones del equipo analizador deben permitir recolectar los datos con la seguridad, precisión y exactitud.

Las características en las que se presta especial atención son:

- Especificaciones de seguridad

- Frecuencia de muestreo
- Capacidad de detección simultanea
- Orden de máximo armónico detectado
- Especificaciones de las sondas de voltaje
- Especificaciones de las sondas de corriente
- Indicador de degradación de aislamiento de bobinado
- Captura de forma de onda

CAPÍTULO III CASOS DE ESTUDIO

Se han realizado y analizado mediciones de calidad de energía y Firma Eléctrica en 3 variadores de las marcas usadas en la industria local (Siemens, ABB, Allen Bradley). Las pruebas dinámicas se realizaron con el analizador de máquinas eléctricas ATPOL II.

Se desarrollan los siguientes casos de estudio:

- 1º Caso de estudio- Rodillo de máquina de textiles no tejido.
- 2º Caso de estudio- Ventilador de socavón.
- 3º Caso de estudio- Bomba de alta presión.

3.1 Primer caso de estudio- Rodillo bobinador de máquina de textiles no tejido

La empresa local fabricante internacional de textiles no tejidos cuenta para su proceso con el rodillo bobinador, este rodillo presentaba vibraciones excesivas, que perjudicaba la calidad y cantidad de la producción, estas vibraciones no podían ser asociadas e identificadas con problemas mecánicos, por lo que se determinó realizar pruebas eléctricas dinámicas en la entrada y salida del variador.

El rodillo que es accionado por un motor eléctrico trifásico asíncrono controlado por variador, no cuenta con reactores y/o filtros de red (Figura 3.1).

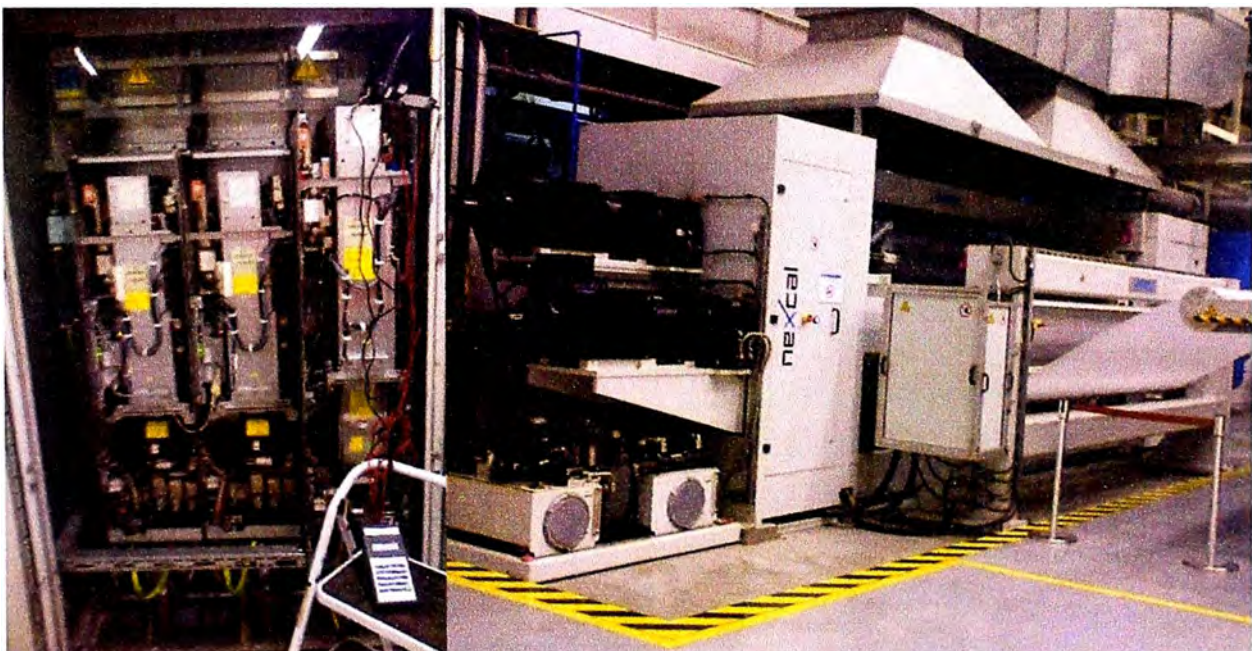


Figura 3.1 Rodillo bobinador y motor eléctrico trifásico asíncrono

La distancia entre el Variador y el motor supera los 100 metros.

Tabla 3.1 Datos del Motor

Fabricante	Siemens	
Tipo de motor	De Inducción	
Potencia	150.00	HP
RPM	1750	Rpm
Polos	4	
Fases:	3	
Voltaje	460.0	Volt
Corriente nominal	203.00	Amp

Se presenta a continuación las mediciones, los resultados y el diagnóstico (conclusión y recomendaciones)

3.1.1 Mediciones

Las mediciones dinámicas se realizaron en tres zonas

- A la entrada del variador.
- A la salida del variador.
- En las borneras del motor.

a. Pruebas a la entrada del variador

Se muestran los siguientes resultados (Figura 3.2 y 3.3).

- El nivel de armónicos de corriente THD Total es de 74.42%.
- El nivel de armónicos de tensión THD Total es de 6.42%.

La operación de los diodos del rectificador del variador genera distorsión de onda principalmente armónica de corriente del quinto orden.

El quinto armónico detectado está generando vibraciones mecánicas y calentamiento de conductores y la consecuente degradación del aislamiento.

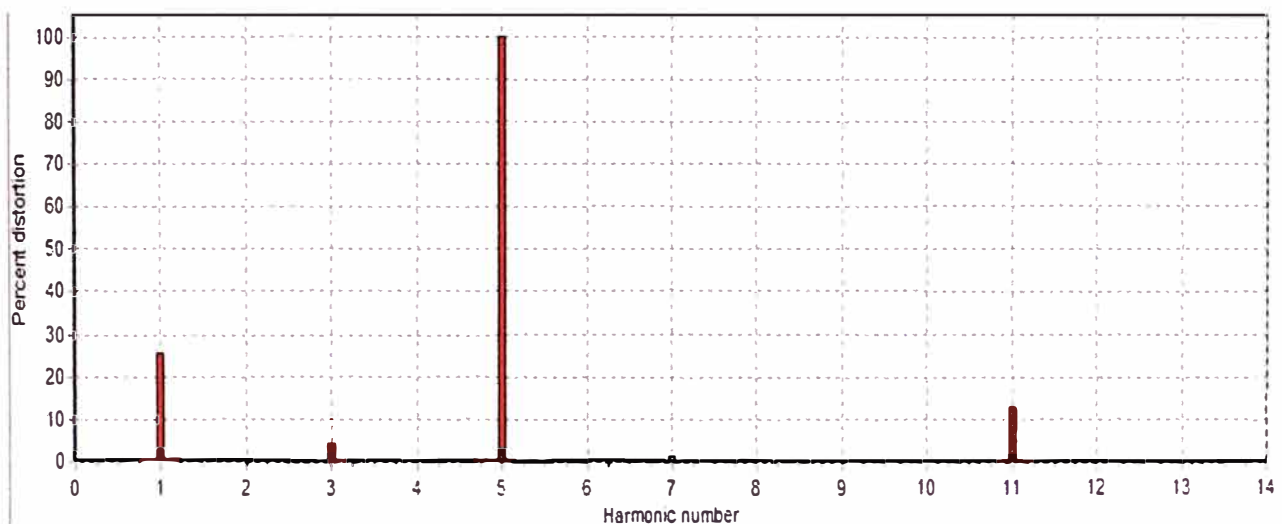


Figura 3.2 Distorsión armónica de corriente

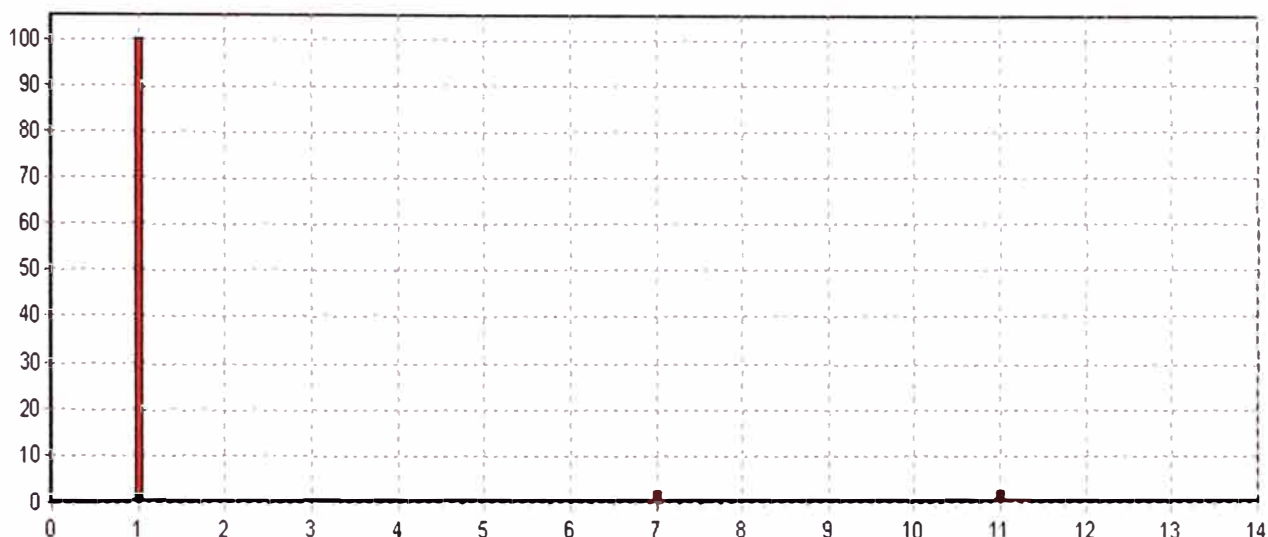


Figura 3.3 Distorsión armónica de voltaje

La interacción del variador con la subestación divide la tensión generada según el circuito equivalente de la subestación, cable y motor, la subestación es quien absorbe la mayor parte de esta corriente generada, los armónicos de orden 7 (secuencia positiva) y 11 (secuencia negativa) están quedando presentes en la red (Figura 3.3).

Se puede observar el ciclo de operación de cada uno de los 6 diodos de la Etapa de rectificación, en cada ciclo de los diodos rectificadores se observan picos de corrientes negativas (Figura 3.4).

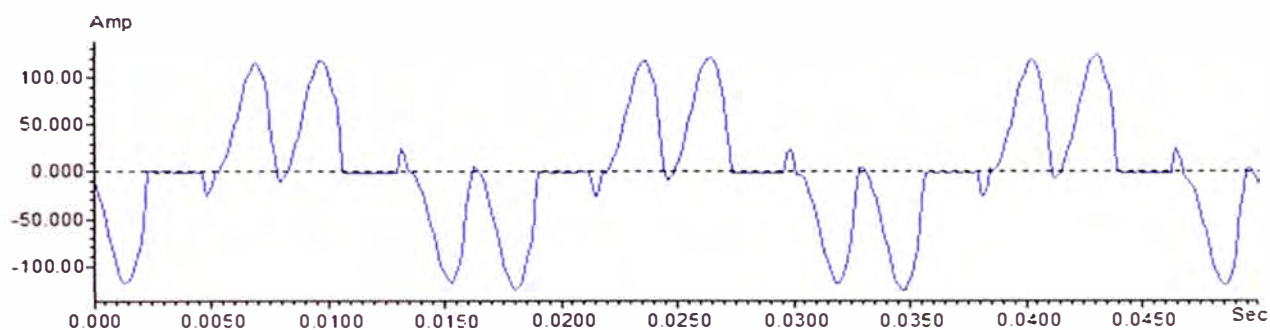


Figura 3.4 Forma de onda de corriente

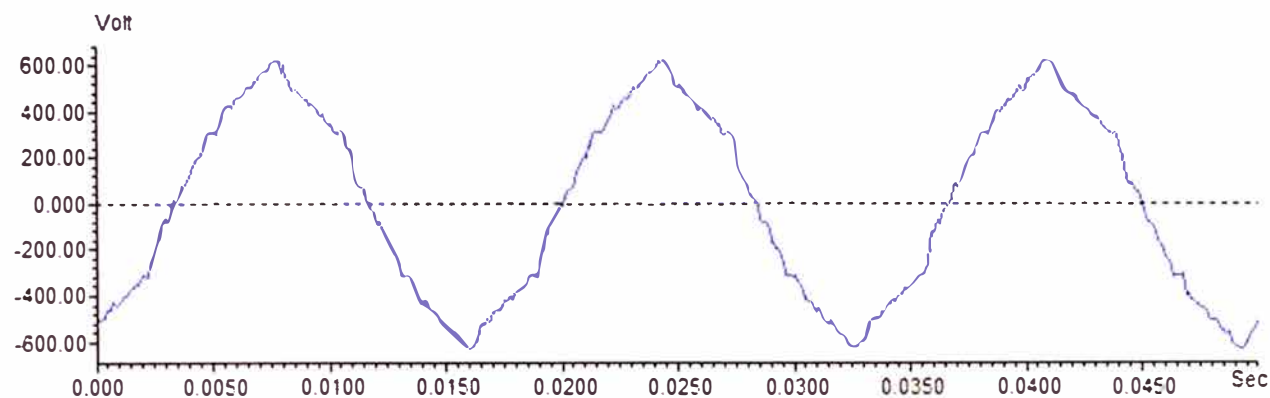


Figura 3.5 Forma de onda de voltaje

La alta distorsión de corriente, no se refleja en gran manera en la forma de onda de

voltaje (Figura 3.5) debido a que la impedancia de entrada del variador es significativa en relación a la impedancia del transformador de suministro.

b. Pruebas a la salida del variador

Muestran los siguientes resultados.

- Velocidad de giro del motor = 1035 RPM
- Frecuencia de paso de polos = 11 RPM

Tabla 3.2 Resultados a la salida del variador

	Factor de potencia	Impedancia	Potencia Aparente Kva	Potencia Real Kw	Potencia Reactiva Kvars
Fase 1	0.26	3.40	19.75	5.19	19.06
Fase 2	0.27	3.38	19.65	5.37	18.90
Fase 3	0.26	3.39	19.76	5.26	19.04

La distorsión armónica de corriente (Figura 3.6) esta atenuada con respecto de la distorsión armónica de la onda de voltaje PWM aplicada, no se están filtrando las frecuencias de secuencia negativa armónicos 8 y 11.

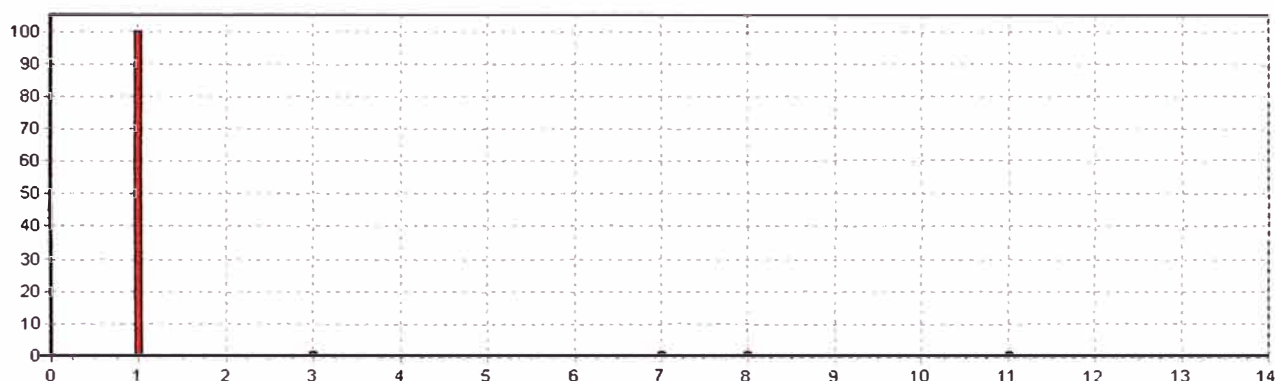


Figura 3.6 Distorsión armónica de corriente

La distorsión armónica total de la onda de voltaje PWM es de 39.63% con armónicas de hasta orden cincuenta en secuencia positiva y negativa (Figura 3.7).

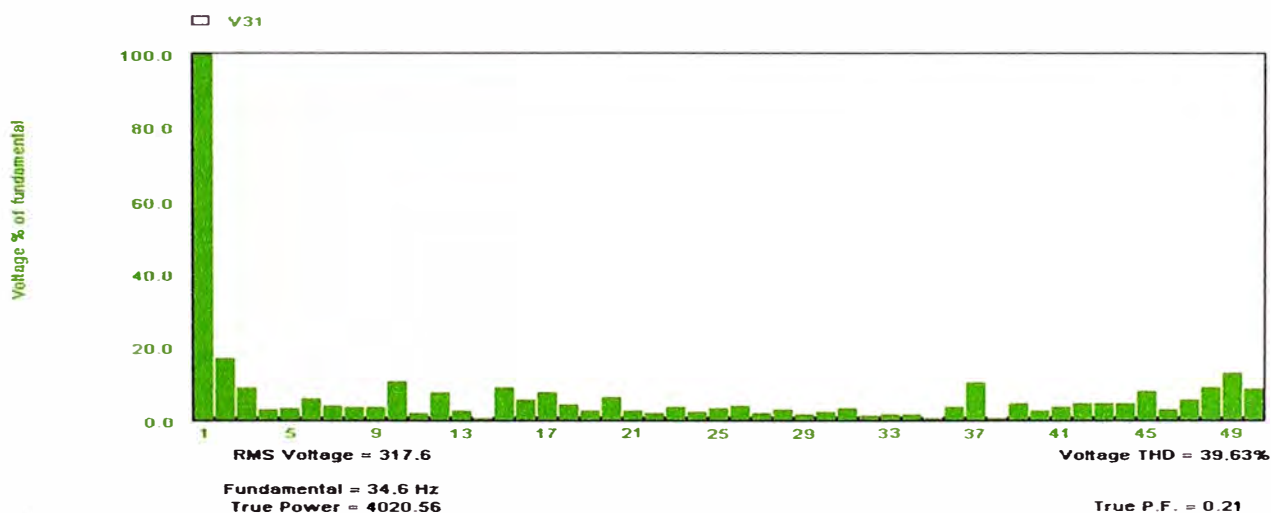


Figura 3.7 Distorsión armónica de la onda PWM armónica aplicada al motor

Forma de onda de corriente muestra la distorsión torsional producto de armónicos de secuencias negativas generando vibraciones (Figura 3.8).

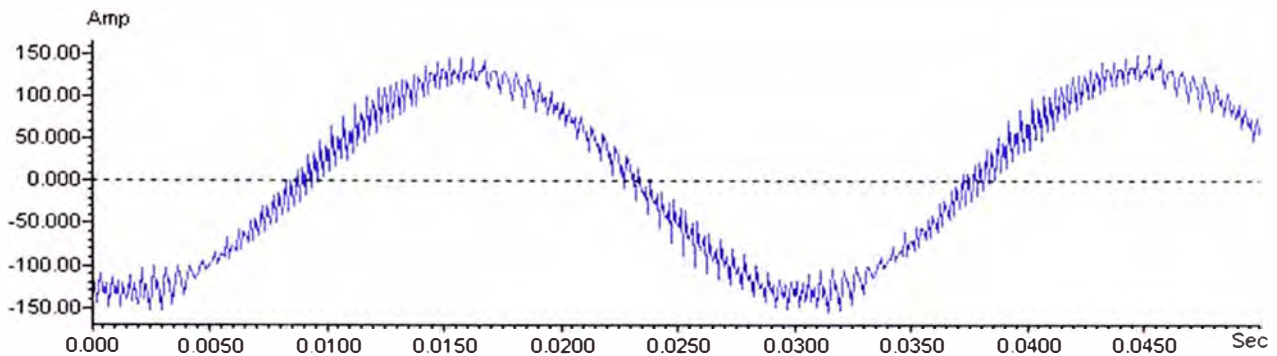


Figura 3.8 Forma de Onda de corriente

En el espectro de frecuencias de corriente (figura 3.9) se puede observar el marcador de frecuencia de fallo en 2240 Hz como múltiplo de 130 veces la velocidad del eje con una amplitud 48dB relativos a la frecuencia fundamental, lo que indica falla de rodamiento.

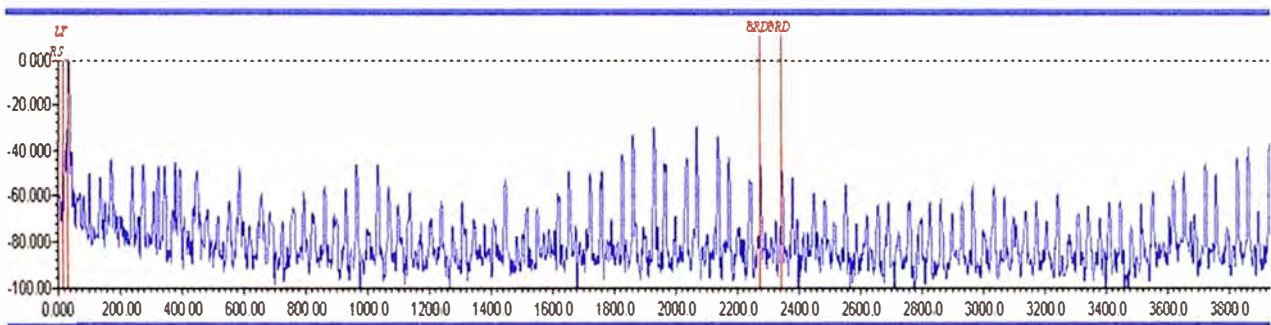


Figura 3.9 Espectro de frecuencias

La forma de Onda de voltaje PWM (Figura 3.10) muestra que las frecuencias de conmutación mayores de 5 KHz incrementan las corrientes por los rodamientos, aumenta los armónicos de la serie de fourier de la tensión alimentada con las consecuencias de incremento de temperatura y ruido.

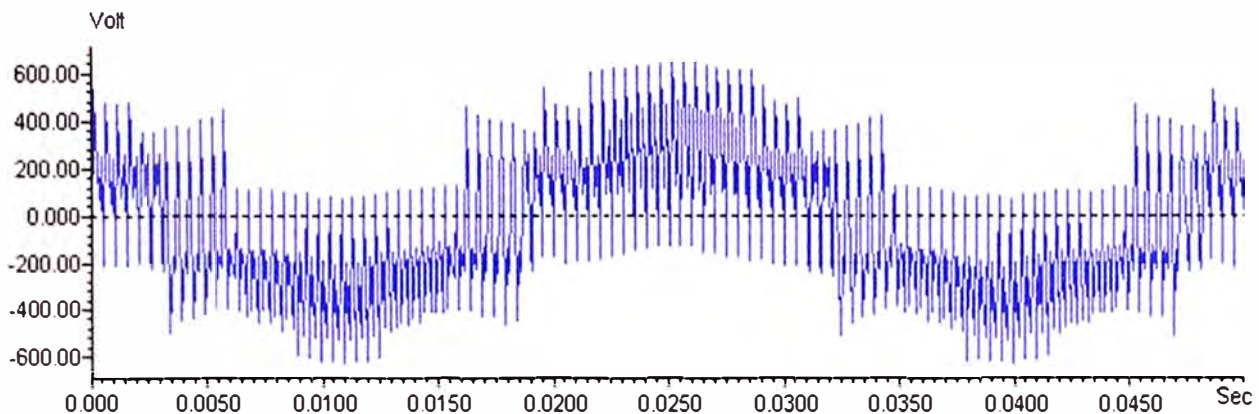


Figura 3.10 Onda de voltaje PWM con frecuencia de conmutación alta

La comparación de espectros de voltaje y corriente muestran que el espectro de corriente es correspondiente a la de voltaje indicando que la vibración tienen origen en

los armónicos de voltaje (armónicos de secuencia negativa), ver la figura 3.11.

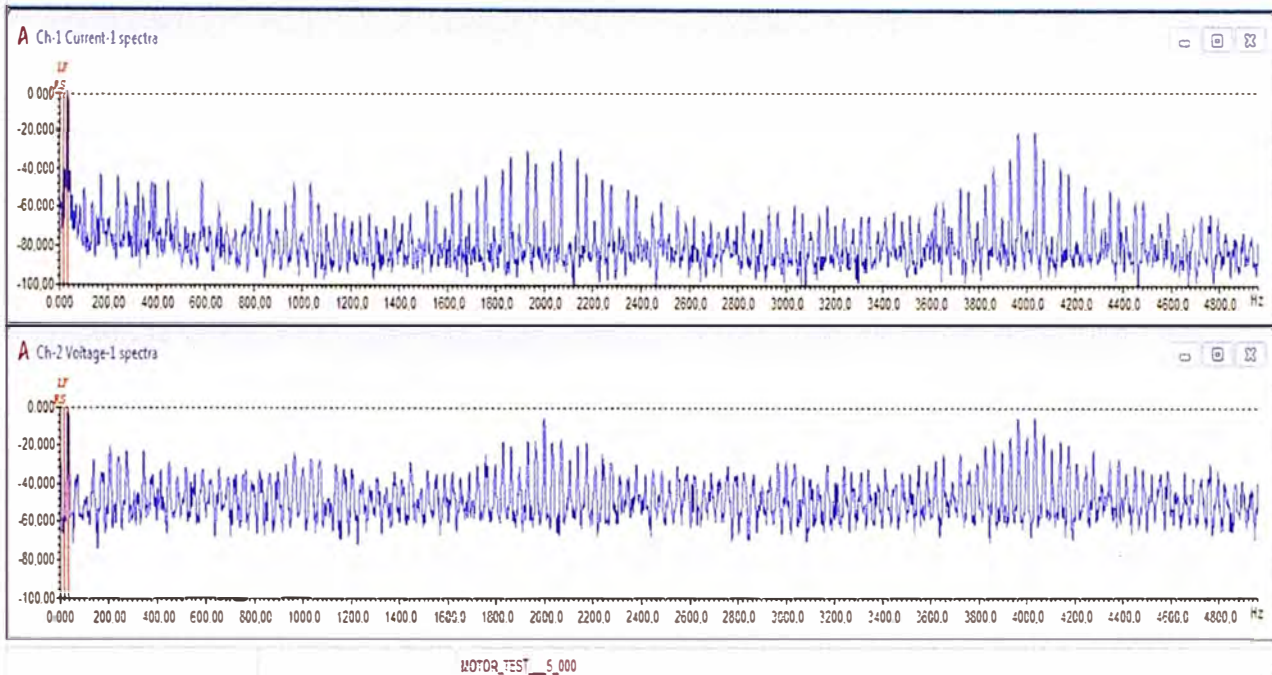


Figura 3.11 Comparación de espectros de voltaje y corriente

En la figura 3.12 se observa el voltaje de modo común (pase por cero) desequilibrado (6.7 voltios), en el circuito capacitivo para alta frecuencia armónicas de orden alto este voltaje es descargado a tierra desde el rotor a través del rodamiento hacia la carcasa y tierra. Se observa la frecuencia de cuatro ciclos en un milisegundo, con periodo de 250 microsegundos, correspondiendo ello a una frecuencia de conmutación de portadora de 10 KHz.

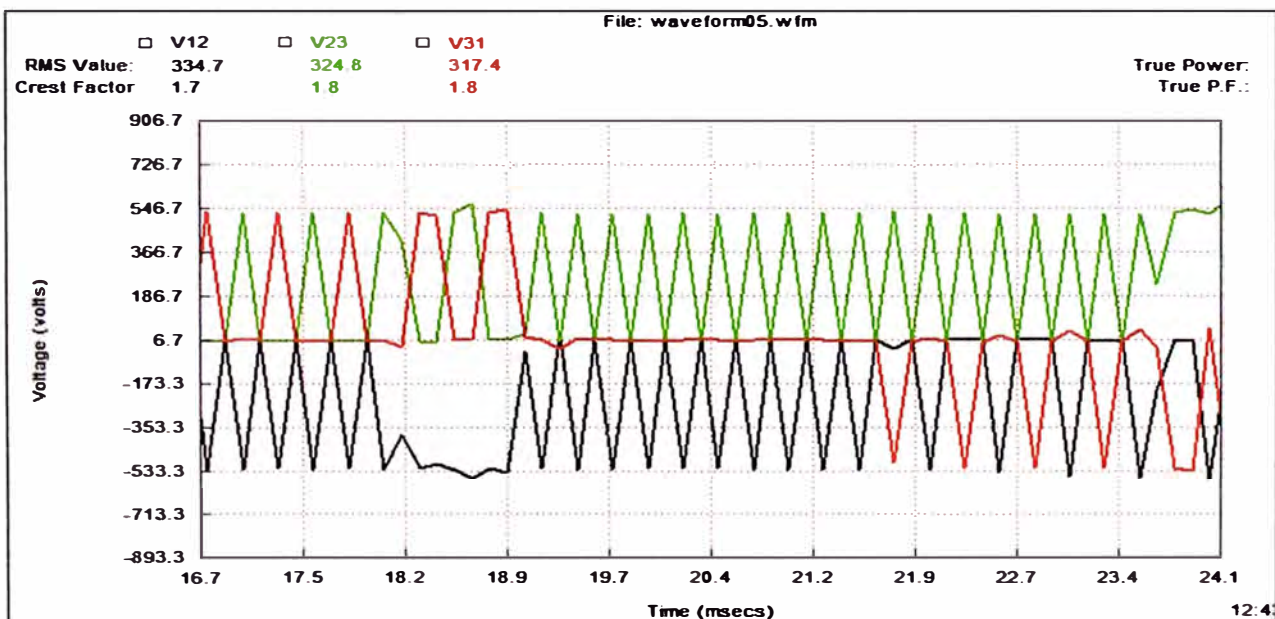


Figura 3.12 incremento de las corrientes por los rodamientos

La frecuencia de conmutación de 10 KHz incrementa las corrientes por los rodamientos, aumenta el orden de los armónicos de la serie de Fourier de la tensión

alimentada con las consecuencias de incremento de temperatura y ruido.

c. Pruebas de calidad de energía en las borneras del motor

Se detectaron transitorios de voltaje en las borneras del motor, transitorios de corta duración de hasta 3632 microsegundos que no existían a la salida del variador y se generaron en el acople de impedancias entre el conductor y el motor.

El excesivo largo del cable (>100 m) no permite aprovechar la baja impedancia de entrada del variador para absorber las reflexiones de voltaje en la caja de borneras sumandose estas a las tensiones nominales.

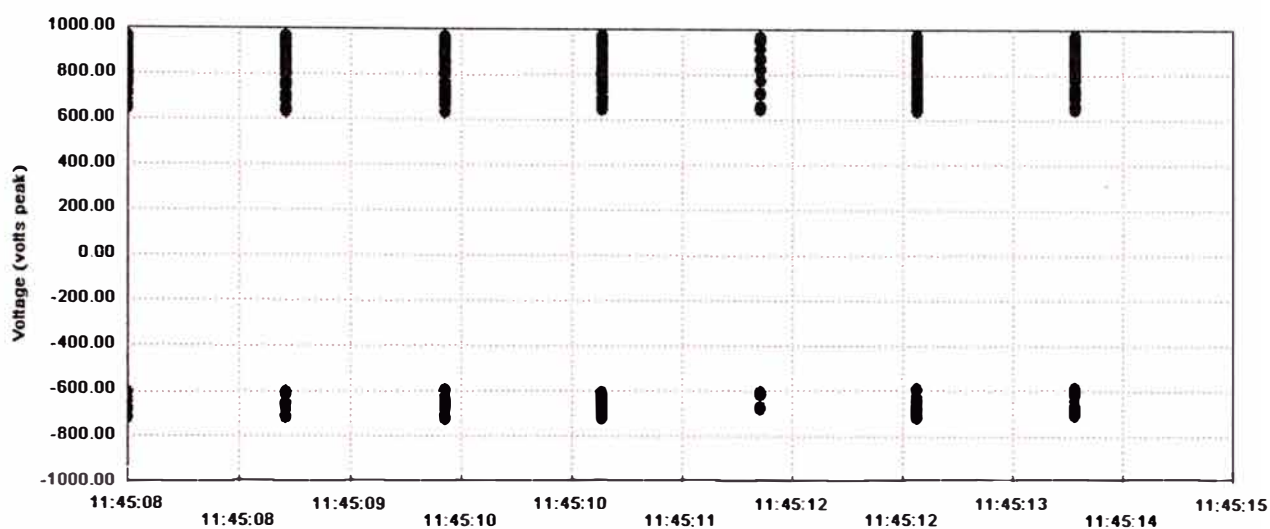


Figura 3.13 Transitorios de voltaje

Tabla 3.3 Reporte de transitorios

Time	Onda	Tipo	μ segundos	Voltios pico
11:45:12	V31	Abs	1752	661.84
11:45:12	V31	Abs	1888	-695.15
11:45:12	V31	Abs	2024	726.02
11:45:12	V31	Abs	2312	782.35
11:45:12	V31	Abs	2536	835.26
11:45:12	V31	Abs	2840	879.84
11:45:12	V31	Abs	3136	923.44
11:45:12	V31	Abs	3360	956.76
11:45:12	V31	Abs	3632	971.45
11:45:12	V31	Abs	1712	-648.12
11:45:12	V31	Abs	1848	682.91

3.1.2 Resultados

A la Red

- Presencia de armónica de corriente de armónicos de orden 5 y 11.
- Presencia de armónicos de voltaje en la Red a las frecuencias de orden 11 (secuencia

negativa).

- Se observan picos de corrientes negativas en los diodos.

Hacia el motor

- Presencia de armónica de corriente de orden 8 y 11.
- Distorsión armónica total de la onda PWM es de 39.63% con armónicos de hasta orden cincuenta, en secuencia positiva y negativa.
- Presencia de frecuencia de fallo de rodamiento a 2240 Hz con amplitud 48dB relativos a la frecuencia fundamental.
- Frecuencia de conmutación de portadora de 10 KHz.
- El espectro de corriente es correspondiente al espectro de voltaje.
- Voltaje de modo comun (pase por cero) de 6.7 voltios.

Borneras del motor

- Se detectaron transitorios de voltaje en las borneras del motor de duracion 3632 μ segundos y amplitud de 971.45 voltios.

3.1.3 Conclusión

A la Red

La operación de los diodos del rectificador del variador genera distorsión de onda principalmente armónica de corriente del quinto orden.

Los armónicos de corriente de orden 5 y 11 (secuencia negativas) producen perturbaciones en la red y son atenuados en el cable y el transformador como vibracion mecánica, calentamiento del hierro y del conductor.

La atenuación de distorsión de voltaje indica interacción del variador con la Subestación, división de tensión según circuito equivalente de Subestación, cable y motor. La Sub estación es quien absorbe la mayor parte de esta corriente generada.

El quinto armónico detectado genera vibraciones mecánicas y el calentamiento de conductores y la consecuente degradación de aislamiento.

Las corrientes negativas en los diodos rectificadores indican degradación de estos componentes.

Hacia el motor

La distorsión armónica de voltaje total de 39.63% no se refleja en gran manera en la forma de onda de corriente debido a que es atenuada en el motor como vibracion mecanica, calentamiento del hierro y conductor.

El calentamiento del conductor y aislamiento producen degradación del aislamiento.

La tabla de distorsión armónica de corriente está atenuada con respecto a la distorsión armónica de la onda de voltaje PWM aplicado. No se están filtrando las frecuencias de secuencia negativa armónicos 8 y 11.

El espectro de corriente muestra un pico de frecuencia múltiplo de la velocidad del eje como una amplitud 48dB relativos a la frecuencia fundamental, ello indica una falla de rodamiento.

La frecuencia de conmutación de 10 KHz incrementa las corrientes por los rodamientos, aumenta el orden de los armónicos de la tensión alimentada con las consecuencias de incremento de temperatura y ruido.

La comparación de espectros de voltaje y corriente muestran que el espectro de corriente es correspondiente a la de voltaje indicando que la vibración tiene origen en los armónicos de voltaje (armónicos de secuencia negativa).

El voltaje de modo común (pase por cero) desequilibrado (6.7voltios) en el circuito capacitivo equivalente para alta frecuencia (armónicas de orden alto) presenta baja impedancia y este voltaje es descargado a tierra desde el rotor a través del rodamiento hacia la carcasa y tierra ocasionando daños por las descargas.

Borneras del motor

Se detectaron transitorios de voltaje en las borneras del motor, transitorios que no se evidenciaron a la salida del variador, estas perturbaciones se generaron en el acople de impedancias entre el conductor y el motor.

El excesivo largo del cable (>100 m) no permite aprovechar la baja impedancia de entrada del variador para absorber las reflexiones de voltaje en la caja de borneras sumándose estas a las tensiones nominales.

Se puede observar picos de corriente de 20 dB a la misma frecuencia de los armónicos de voltaje a 2000 Hz y 4000 Hz, concluyéndose que los armónicos PWM generados en el inversor de variador están produciendo las vibraciones que afectan la calidad de la producción.

Los 6.7 voltios de modo común para ondas de alta frecuencia presentan baja impedancia de descarga a tierra.

3.1.4 Recomendaciones

Se recomienda lo siguiente:

- Reducir la longitud y/o Impedancia del cable sección de conductor
- Reemplazar los rodamientos por rodamientos aislados
- Filtros activos a la entrada del variador.
- Filtros pasivos a la salida del variador instalados próximos al convertidor.
- Supresor de transitorios instalados próximos al motor.

3.2 Segundo caso de estudio- Ventilador de socavón

La empresa minera de polimetales cuenta con ventiladores de extracción de gases del socavón, estos ventiladores son críticos para la salud y producción.

El control de arranque y velocidad del motor es por medio de un variador. El ventilador presentaba niveles de vibraciones inaceptables y se requiere determinar el origen de los mismos.

La distancia entre el variador y el motor es alrededor de 30 metros. El motor es de alta eficiencia. El variador cuenta con reactancia interna en el bus DC.

Tabla 3.4 Datos del Motor

Fabricante Variador	ABB	
Tipo de motor	Inducción	
Potencia	300.00	HP
RPM	1790	Rpm
Polos	4	
Fases:	3	
Voltaje	460.0	Volt
Corriente nominal	330.00	Amp



Figura 3.14 Variador y ventiladores de extracción de gases del socavón

3.2.1 Mediciones

Las mediciones dinámicas se realizaron en tres zonas

- A la entrada del variador
- A la salida del variador
- En las borneras del motor

a. Pruebas a la entrada del variador

Muestran los siguientes resultados.

- El nivel de armónicos de corriente THD Total es de 24.52%.
- El nivel de armónicos de tensión THD Total es de 5.58%.

La generación de armónicos de corriente (Figura 3.15) del rectificador es atenuada por el reactor interno en el bus DC.

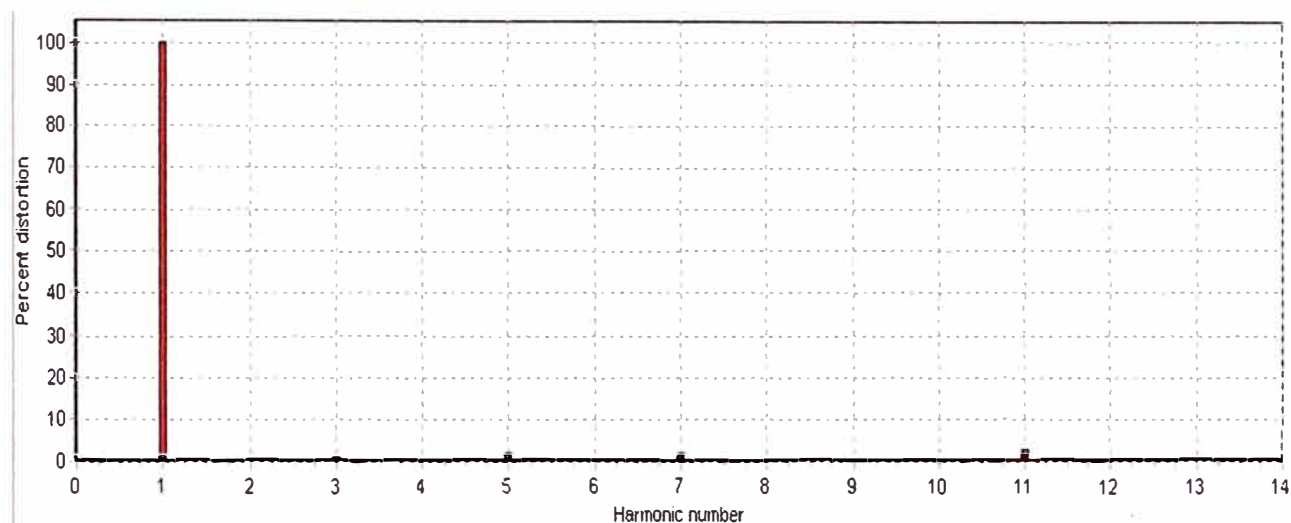


Figura 3.15 Armónicos de corriente

La interacción del variador con la Subestación divide la tensión generada según el circuito equivalente de subestación cable y motor, la subestación es quien absorbe la mayor parte de esta corriente generada (Figura 3.16).

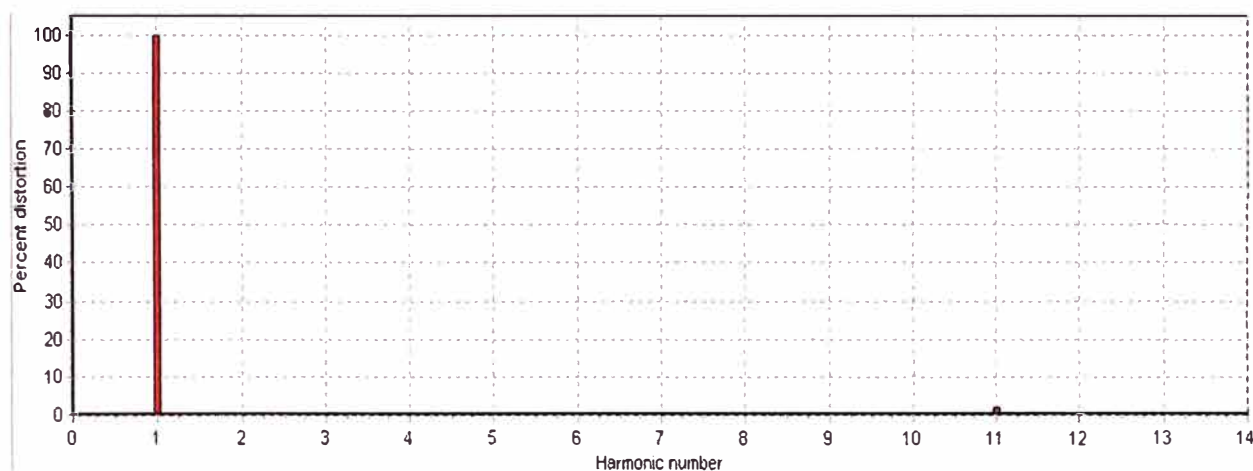


Figura 3.16 Armónicos de voltaje

La forma de onda de corriente (Figura 3.17) muestra buen ciclo de operación de los diodos.

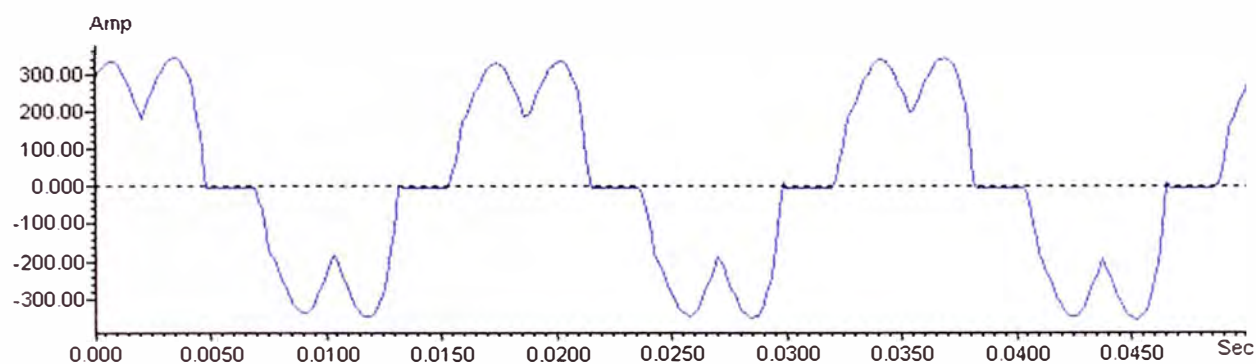


Figura 3.17 Forma de Onda de corriente de entrada.

La forma de onda de voltaje es la siguiente

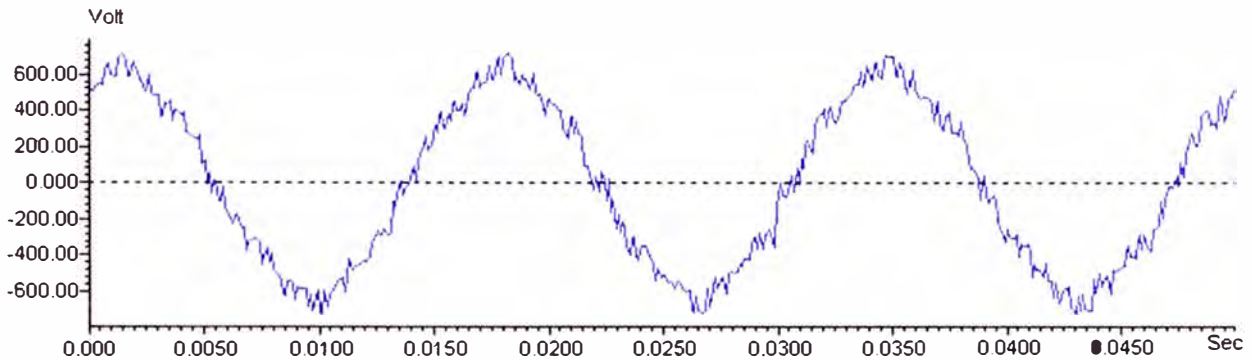


Figura 3.18 Forma de Onda de voltaje

b. Pruebas a la salida del variador

Se muestran los siguientes resultados.

- Velocidad de giro del motor = 1789 RPM
- Frecuencia de paso de polos = 22 RPM

Tabla 3.5 Resultados a la salida del variador

			Potencia Aparente	Potencia Real	Potencia Reactiva
	Factor de potencia	Impedancia	Kva	Kw	Kvars
Fase 1	0.76	1.99	61.46	46.93	39.68
Fase 2	0.74	2.01	62.73	46.65	41.94
Fase 3	0.74	2.00	61.55	46.06	40.83

La gráfica de distorsión armónica (Figura 3.19) de corriente muestra una onda con baja distorsión armónica.

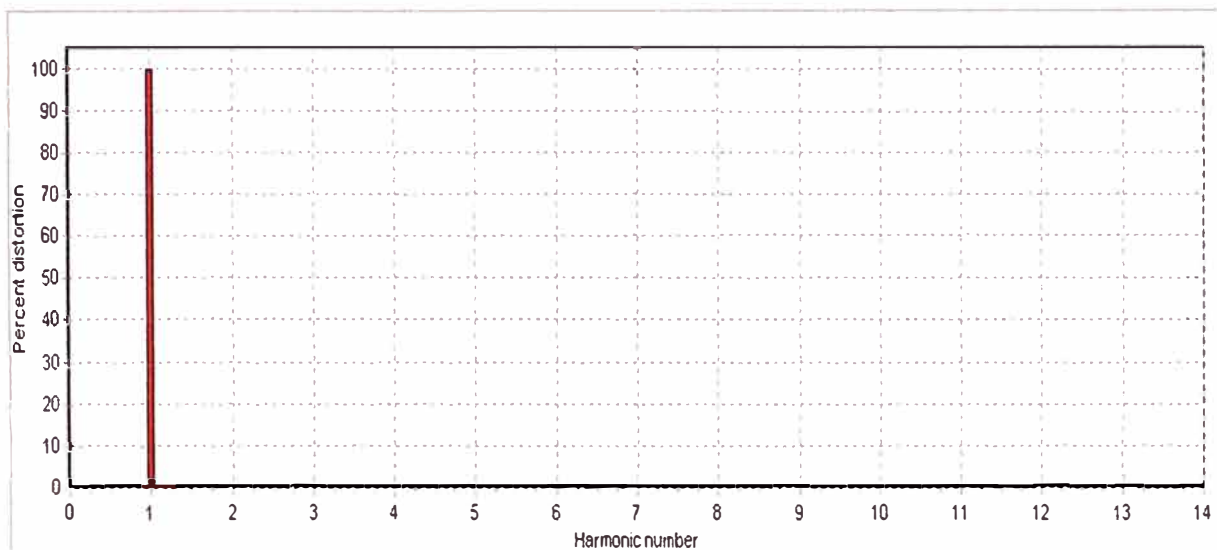


Figura 3.19 Gráfica de distorsión armónica de corriente

La distorsión armónica total de la onda de voltaje PWM es de 29% con armónicas de principales de orden 9 al 15 (Figura 3.20).

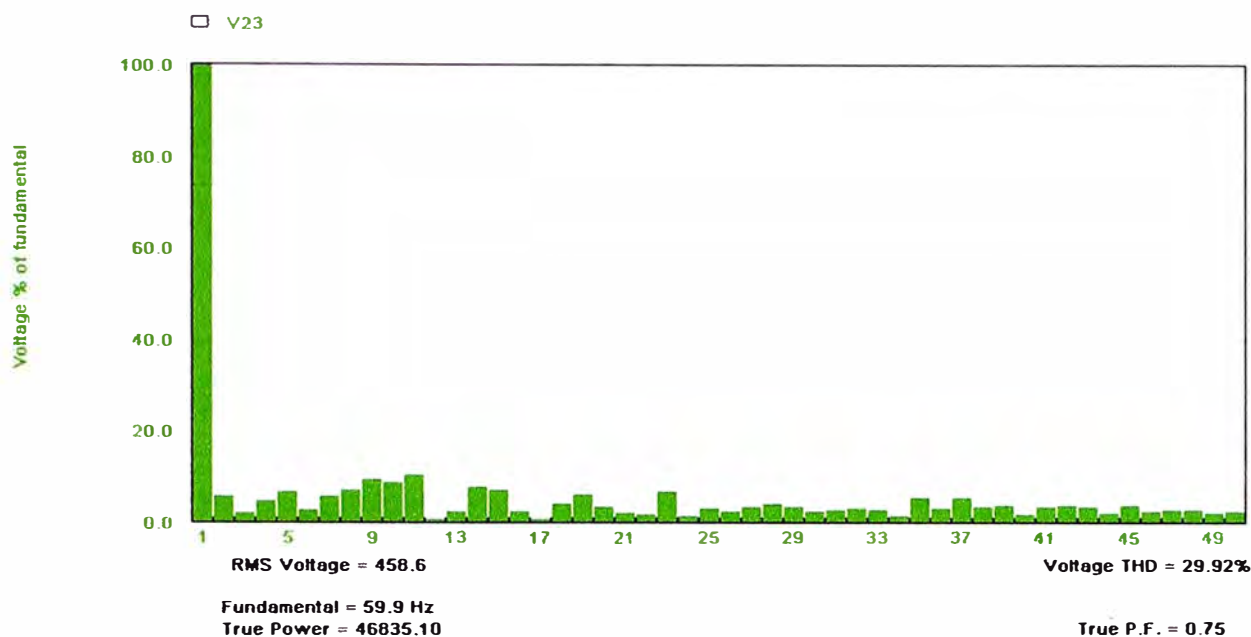


Figura 3.20 Distorsión armónica de la onda PWM armónica aplicada al motor

La forma de onda de corriente se muestra en la figura 3.21.

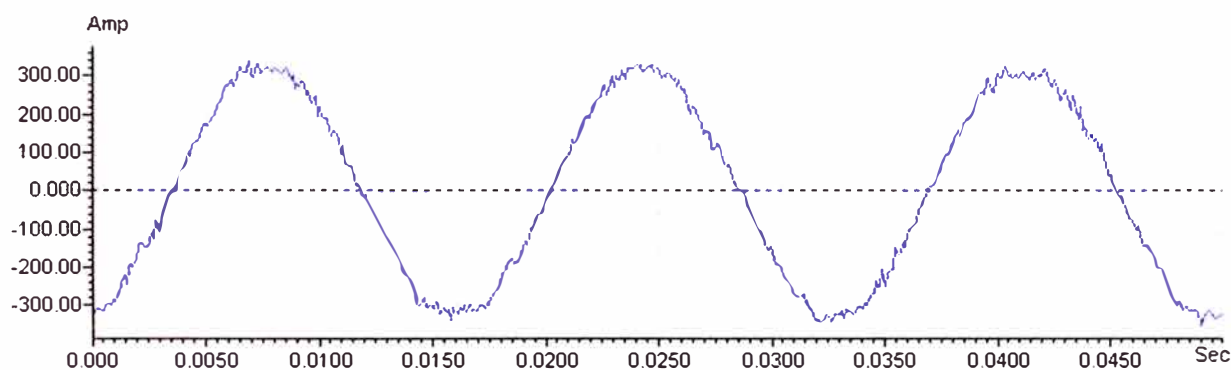


Figura 3.21 Forma de Onda de corriente

En el espectro de frecuencias no se presentan picos de frecuencia de fallo en rodamientos (Figura 3.22).

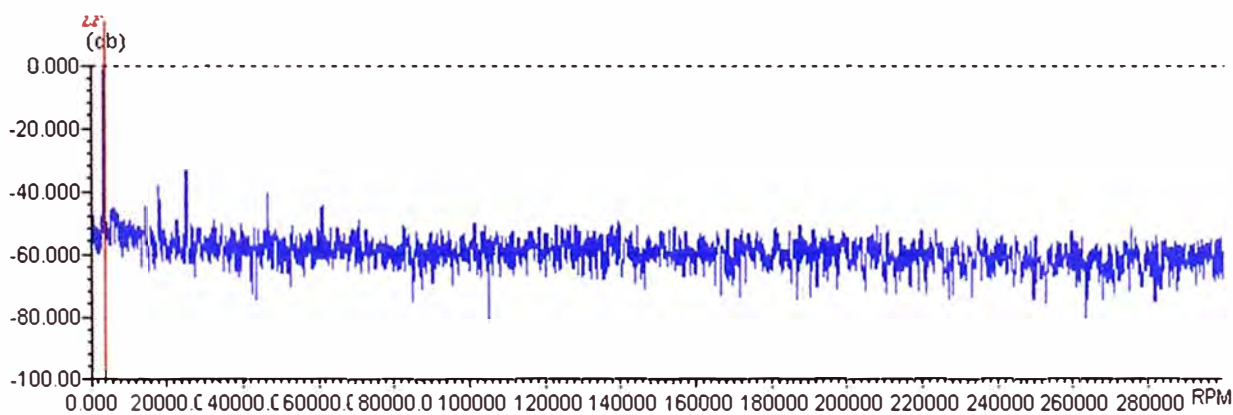


Figura 3.22 Espectro de frecuencias de corriente

La siguiente (Figura 3.23) es la forma de onda de voltaje PWM con frecuencia de cuatro ciclos en un milisegundo, con un periodo de 250 microsegundos correspondiendo ello a una frecuencia de conmutación de portadora de 5 KHz.

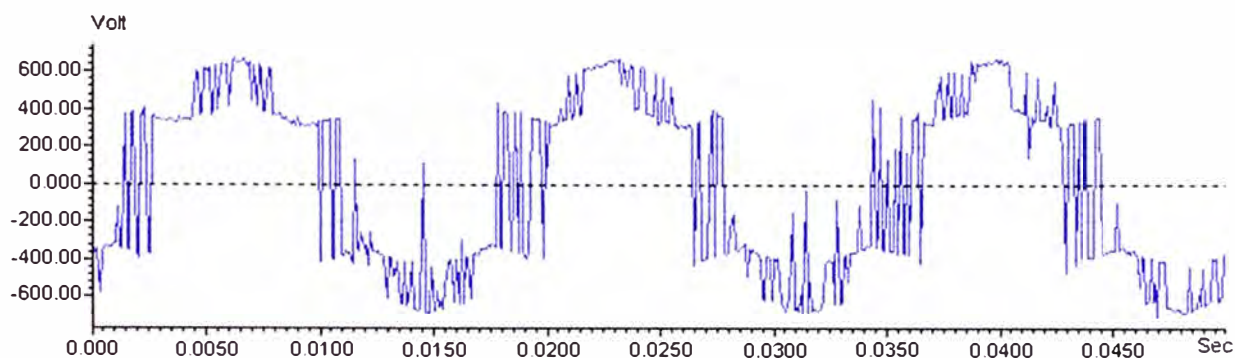


Figura 3.23 forma de Onda de voltaje PWM

La comparación de espectros de voltaje (Figura 3.24) y de corriente (Figura 3.22) muestra que el espectro de corriente muestra picos que no tienen origen en los picos de voltaje.

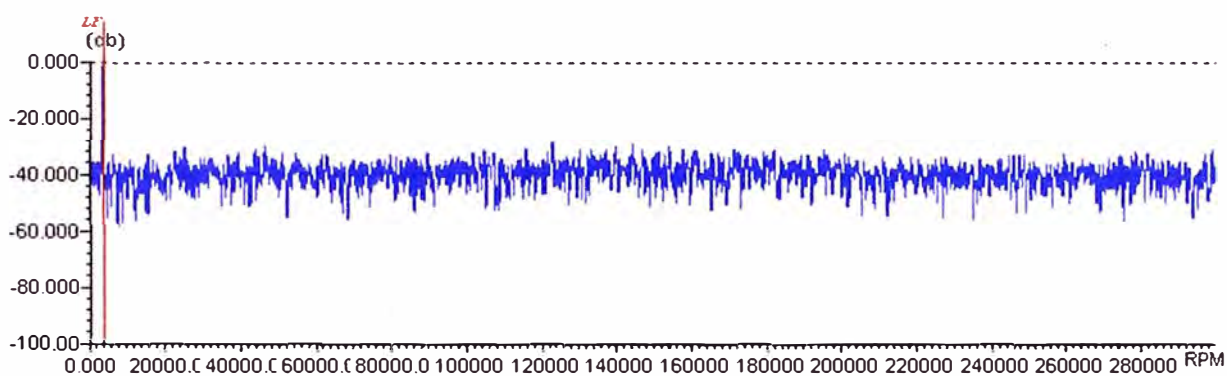


Figura 3.24 Espectros de voltaje

Se observa el voltaje de modo común (pase por cero) equilibrado (Figura 3.25)

	V12	V23	V31
Value:	459.8	449.2	456.7
Factor	1.4	1.4	1.4

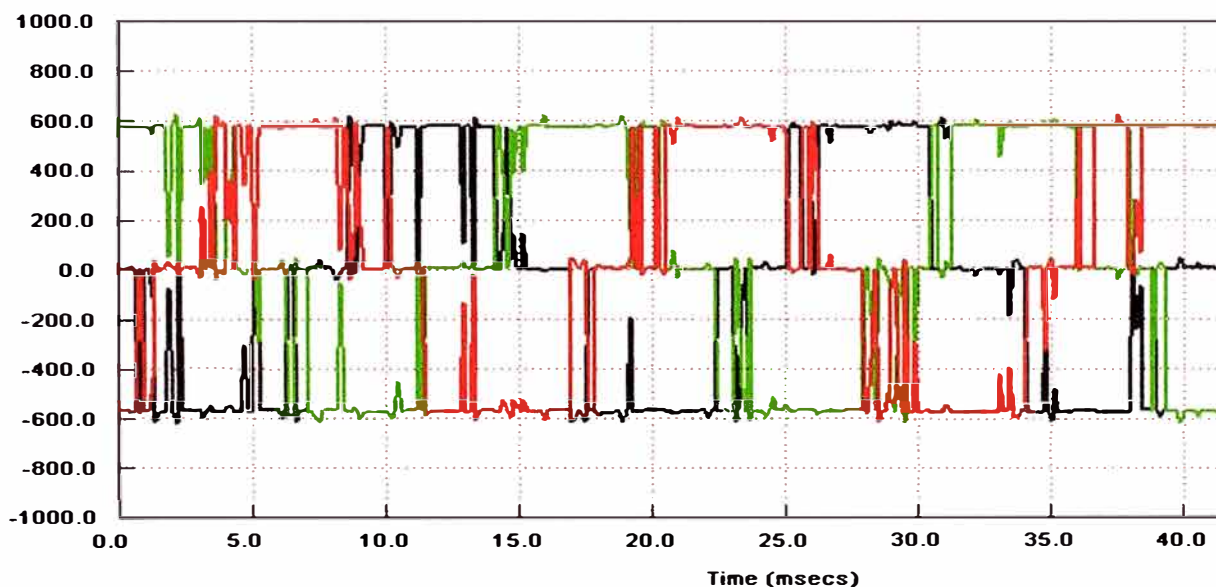


Figura 3.25 Resultados de pruebas de Calidad de energía en las borneras del moto

c. Pruebas de calidad de energía en las borneras del motor

No se detectaron transitorios de voltaje en las borneras del motor

3.2.2 Resultados

A la Red

- Bajos armónicos a la red.

Hacia el motor

- Baja distorsión armónica de corriente.
- Distorsión armónica total de la onda PWM de 29.9% con armónicas principales entre ordenes 7 y 19.
- En la onda y espectro de corriente no se detecta pico de frecuencia de fallo de rodamiento.
- Frecuencia de conmutación de portadora de 5 KHz.
- La comparación de espectros de voltaje y corriente muestra picos de corriente que no correspondiente a picos en el espectro de voltaje.
- Voltaje de modo comun equilibrado en cero.

Borneras del motor

No se detectaron transitorios

3.2.3 Conclusión

A la Red

La distorsión de onda de corriente a la red de la operación de los diodos es compensada por el reactor de línea en el bus DC.

Hacia el motor

La distorsión armónica de voltaje total de 29% no se refleja en gran manera en la forma de onda de corriente debido a que es atenuada en el motor de alta eficiencia.

La comparación de espectros de voltaje y corriente indican fallas mecánicas

El espectro de corriente muestra pico de frecuencia múltiplo de la velocidad del eje coincidiendo con fallo de desbalance de paso de alabes.

Borneras del motor

No se detectó transitorios de voltaje en las borneras del motor, en el caso hubieran están siendo absorbidas en el variador.

3.2.4 Recomendaciones

- Reactor de línea a la salida del variador instalados próximos al convertidor para evitar que el 29% de THD produzca calentamiento de conductores.
- Balancear los álabes del ventilador.

3.3 Tercer caso de estudio- Bomba de alta presión

La empresa generadora de energía Termoeléctrica de Ciclo combinado, por consideración de responsabilidad social utiliza agua de mar tratada en la planta desalinizadora, para lo cual el agua de mar es tratada a través de filtros los cuales

requieren bombas de alta presión para hacer circular el agua en un proceso de operación continua necesaria para la operación de las turbinas.

El motor para controlar la bomba de agua de alta presión se controla mediante un variador de frecuencia de marca Allen Bradley modelo Power Flex 700. La disponibilidad del sistema se está afectando por disparos de protección por sobre corrientes.



Figura 3.26 Resultados Variador Power Flex 700 (Fuente: Referencia [14])

La distancia entre el variador y el motor es alrededor de 40 metros. El motor es de alta eficiencia. El variador cuenta con reactores de red y reactores para motor.

Tabla 3.6 Datos del Motor

Fabricante	Allen Bradley	
Tipo de motor	Inducción	
Potencia	200.00	HP
RPM	3580	Rpm
Polos	2	
Fases:	3	
Voltaje	460.0	Volt
Corriente nominal	211.00	Amp

Variador: Power Flex 700

Características [13]:

- De 380 a 480 V: De 0.37 a 500 kW / 0.5 a 700 Hp / 1.1 a 875 A
- Control V/Hz, control vectorial sin sensores, control vectorial del flujo
- Excelente producción de par, estricta regulación de par y rápidos tiempos de actualización de entradas de par.

El variador tiene como accesorios reactores de línea para cada fase a la entrada de alimentación de red y las mediciones se realizaron aguas arriba del reactor de línea a la entrada del variador (Figura 3.27).

MEDICIONES

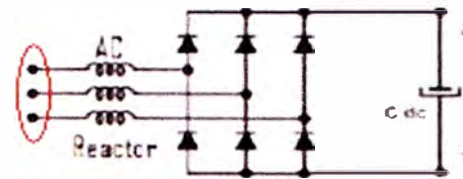


Figura 3.27 Reactor de línea para Variador (Fuente: Referencia [15])

3.3.1 Mediciones

Las mediciones dinámicas se realizaron en tres zonas

- A la entrada del variador
- A la salida del variador
- En las borneras del motor

a. Pruebas a la entrada del variador

Muestran los siguientes resultados.

- El nivel de armónicos de corriente THD Total es de 36.82%.
- El nivel de armónicos de tensión THD Total es de 1.97%.

La generación de armónicos de corriente de los diodos del rectificador no es atenuada por el reactor de red (Figura 3.28). La interacción del variador con la Subestación divide la tensión generada según el circuito equivalente de Subestación cable y motor, la Subestación es quien absorbe la mayor parte de la distorsión de voltaje (Figura 3.29).

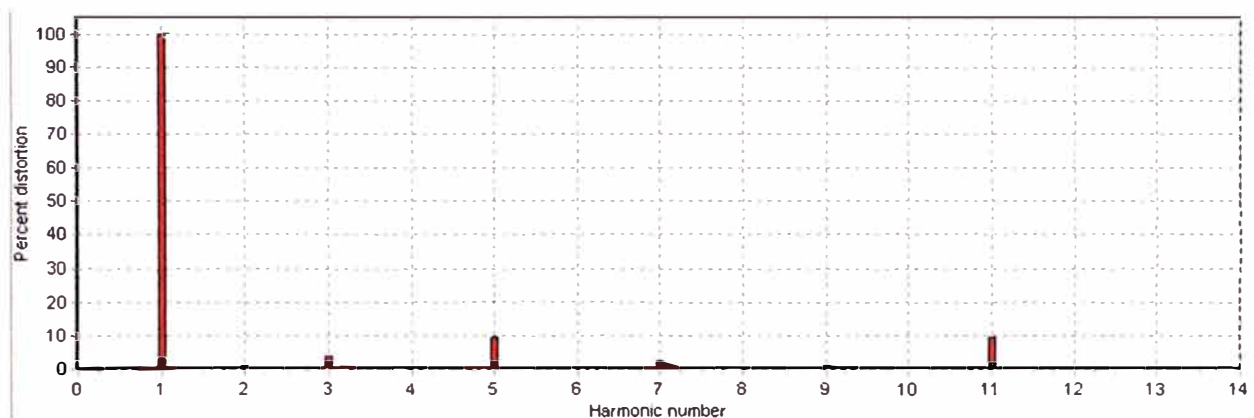


Figura 3.28 Gráfico de distorsión armónica de corriente

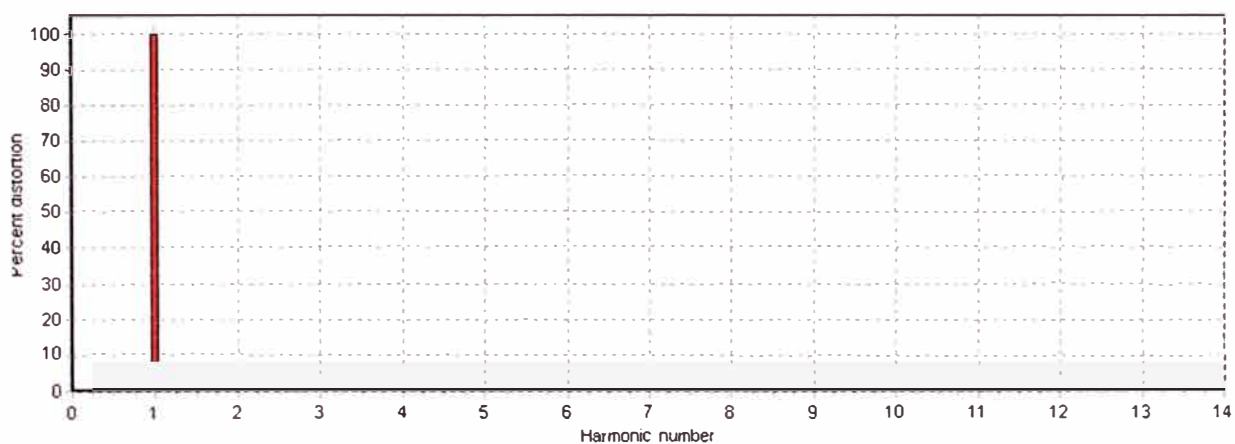


Figura 3.29 Gráfico de distorsión armónica de voltaje

La forma de onda de corriente muestra buen ciclo de operación de los diodos (Figura 3.30).

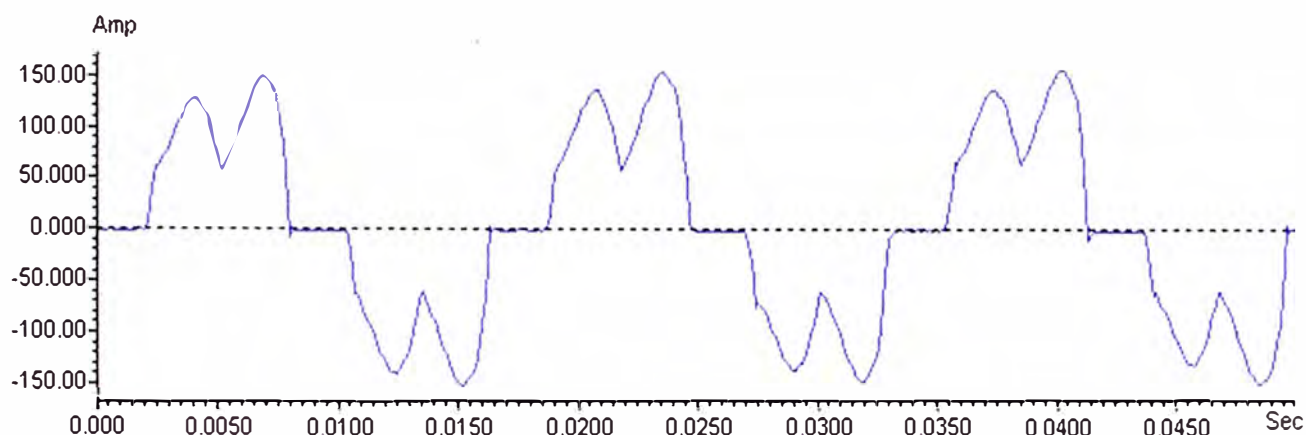


Figura 3.30 Forma de onda de corriente

La alta distorsión de corriente, no se refleja en gran manera en la forma de onda de voltaje debido a que la impedancia de entrada del variador es significativa en relación a la impedancia del transformador de suministro (Figura 3.31).

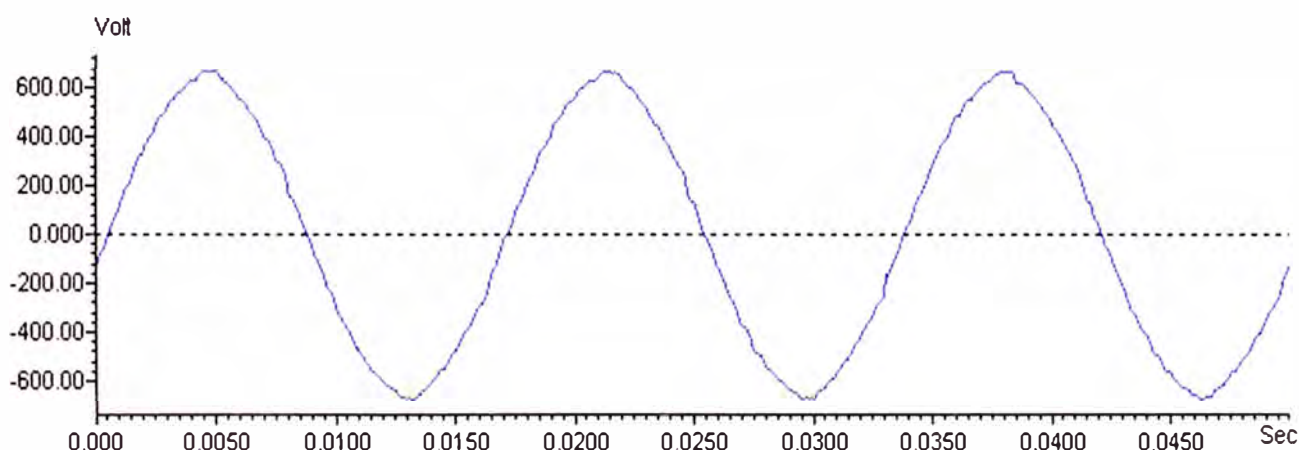


Figura 3.31 Forma de onda de voltaje

b. Pruebas a la salida del variador

Muestran los siguientes resultados.

- Velocidad de giro del motor = 2162 RPM
- Frecuencia de paso de polos = 24 RPM

Tabla 3.7 Resultados a la salida del variador

			Potencia Aparente kVA	Potencia Real kW	Potencia Reactiva kVARS
	Factor de impedancia	Impedancia			
Fase 1	0.740	2.198	33.153	24.520	22.313
Fase 2	0.752	2.331	31.977	24.050	21.074
Fase 3	0.742	2.293	32.881	24.400	22.041

En la gráfica de distorsión armónica de corriente se observa armónicos de orden 3 y 5 (Figura 3.32). La distorsión armónica total de la onda PWM es de 27% con armónicas predominantes de orden 5 y 13 (Figura 3.33).

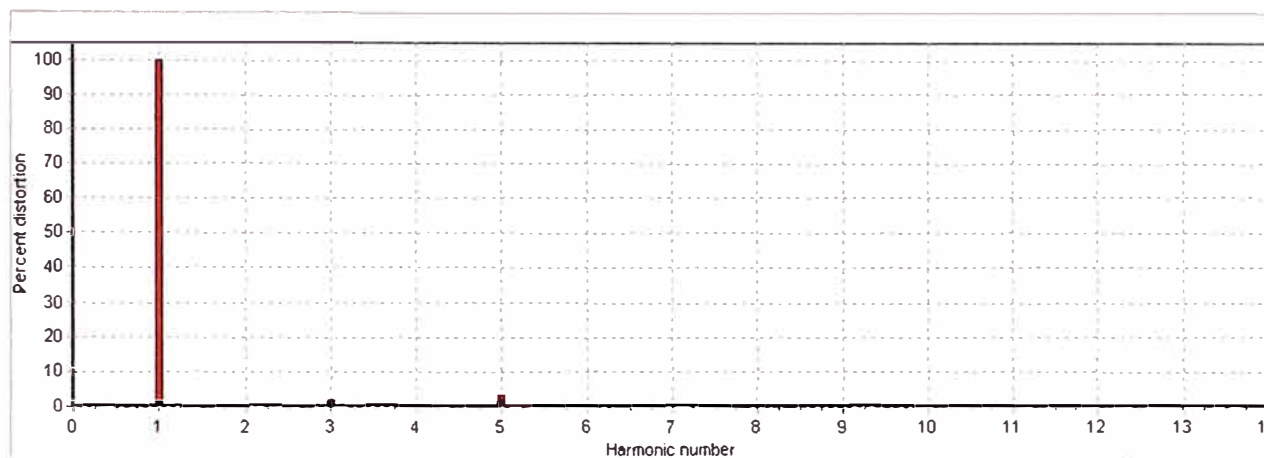


Figura 3.32 Gráfica de distorsión armónica de corriente

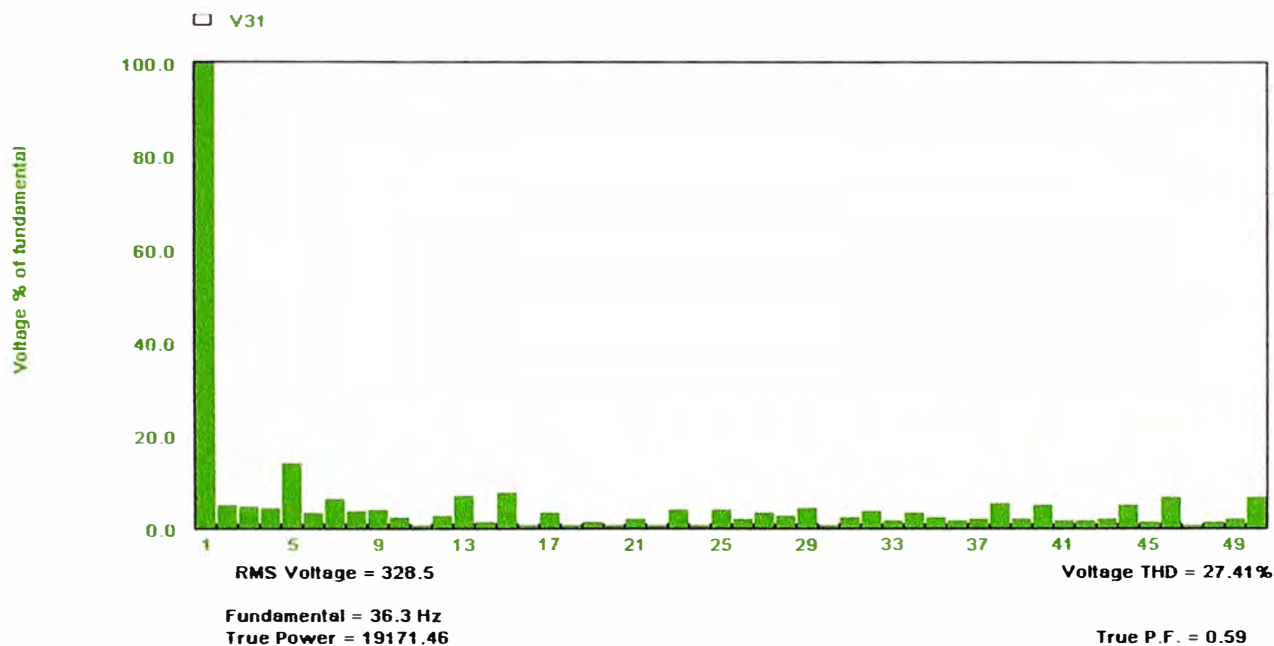


Figura 3.33 Distorsión armónica total de la onda PWM

Se muestra en la forma de onda de corriente la distorsión torsional (Figura 3.34).

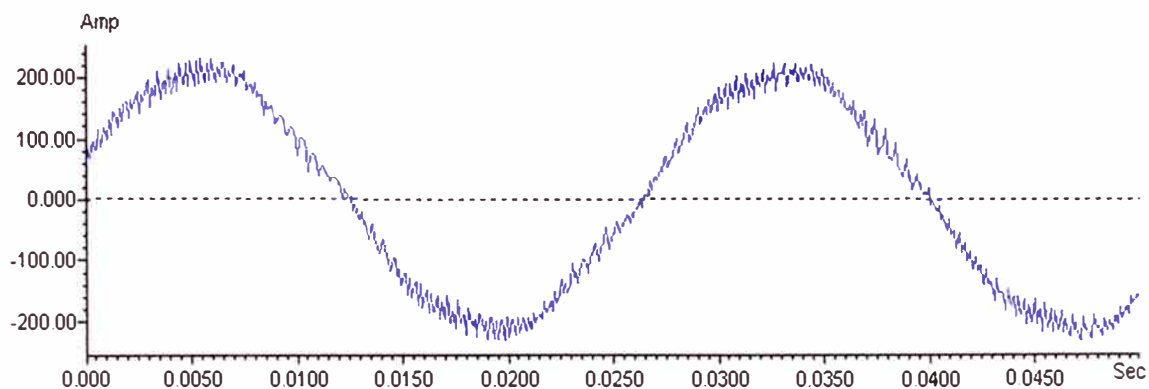


Figura 3.34 Forma de Onda de corriente muestra la distorsión torsional.

Este es el espectro de corriente

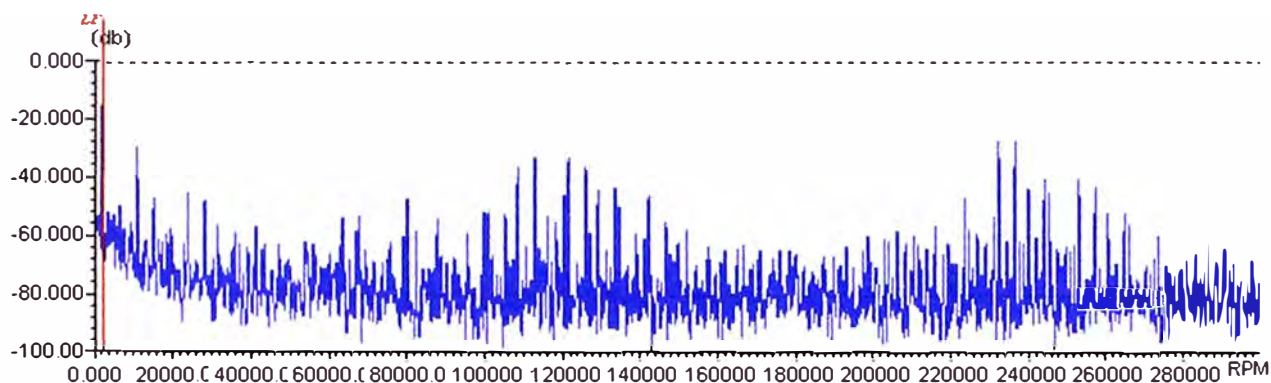


Figura 3.35 Espectro de corriente

La forma de onda de voltaje PWM (Figura 3.36) tiene una frecuencia de cuatro ciclos en un milisegundo, un periodo de 250 microsegundos correspondiendo ello a una frecuencia de conmutación de portadora de 5 KHz.

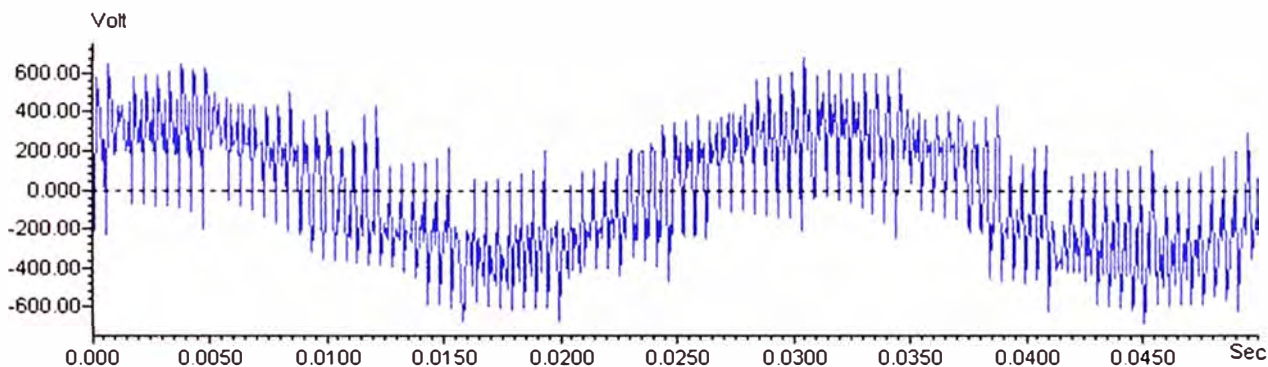


Figura 3.36 Forma de onda de voltaje PWM

La comparación de espectros de voltaje (Figura 3.37) y corriente (Figura 3.35) muestran que hay vibraciones correspondientes a la alimentación eléctrica y a problemas mecánicos.

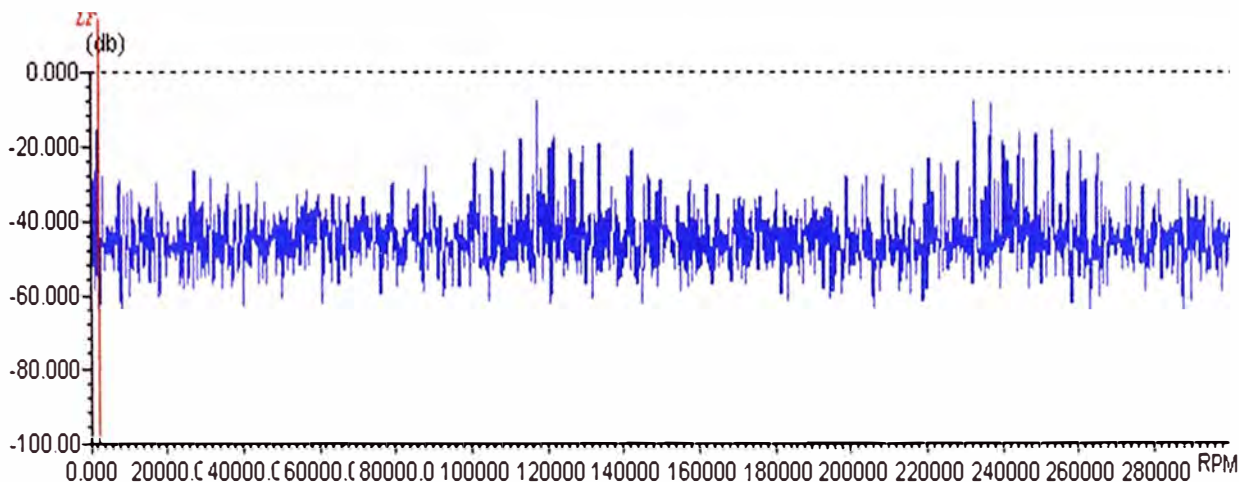


Figura 3.37 Espectros de voltaje

c. Las pruebas de Calidad de energía en las borneras del motor

No se detectaron transitorios de voltaje en las borneras del motor

3.3.2 Resultados

A la Red

- Los armónicos hacia la red son un poco mayor que en el caso de estudio 2 (reactor de línea en el bus DC).
- La distorsión de armónicos en la red es del orden 5 y 11.

Hacia el motor

- Pequeña distorsión armónica de corriente de orden 5.
- Distorsión armónica total de la onda PWM es de 27% con armónicas principales entre órdenes 5 y 15.
- En la onda y espectro de corriente no se detecta pico de frecuencia de fallo de rodamiento.
- Frecuencia de conmutación de portadora de 5 KHz.
- La comparación de espectros de voltaje y corriente muestra picos de corriente que correspondiente a picos en el espectro de voltaje.
- La comparación de espectros de voltaje y corriente muestra picos de corriente de 7160 rpm que no correspondiente a picos en el espectro de voltaje.
- Voltaje de modo común equilibrado en cero.

Borneras del motor

- No se detectaron transitorios

3.3.3 Conclusión

A la Red

- La distorsión de onda de corriente a la red de la operación de los diodos es parcialmente atenuada compensada por el reactor de línea.

Hacia el motor

- La distorsión armónica de voltaje total de 27% no se refleja en gran manera en la forma de onda de corriente debido a que es atenuada en el motor de alta eficiencia.
- La comparación de espectros de voltaje y corriente indican picos de vibración por calidad de energía suministrada.
- El espectro de corriente el pico de frecuencia de 7160 rpm corresponde al desalineamiento entre motor y bomba.

Borneras del motor

- No se detectó transitorios de voltaje en las borneras del motor, en el caso hubieran están siendo absorbidas en el variador.

3.3.4 Recomendaciones

- Dimensionar el reactor de línea adecuado en la entrada del variador.
- Dimensionar el reactor de línea para evitar que el 27% de THD produzca calentamiento

de conductores y vibraciones mecánicas.

- Realizar alineamiento de ejes del motor y bomba.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Conclusiones

1. En el variador de frecuencia ABB con reactor de línea en el bus DC, la distorsión armónica eléctrica THD de la onda de voltaje es 29%, esta distorsión es considerablemente menor que la distorsión armónica eléctrica del variador Siemens que se consideró sin reactor en el bus DC y que presenta 39% de distorsión armónica THD, por lo que se concluye que el reactor en el bus DC cumple el objetivo de reducción de distorsiones armónicas en la onda de voltaje PWM.
2. En los 3 casos de estudio, las ondas de voltaje PWM aplicados a los motores tienen distorsión armónica THD mayor a 25%, esta distorsión armónica de voltaje no se reflejan en la onda de corriente que para los 3 casos tienen menos de 5% de distorsión armónica, por lo que se concluye que parte de la energía eléctrica suministrada por el variador es absorbida en el hierro como pérdidas de flujo magnético y en el conductor con flujo de corrientes negativas.
3. La modulación PWM del variador Siemens con portadora de frecuencia de 10KHz genera armónicos de mayor orden superior a 50 y los variadores ABB y Allen Bradley con portadora de frecuencia de 5KHz generan armónicos de orden superior a 50, por lo que se concluye que el incremento de frecuencia portadora conlleva a un aumento del orden de los armónicos presentes en la onda de voltaje.
4. La maquina textil no cuenta con filtros de armónicos para limitar el paso de frecuencias superiores de la onda PWM, las corrientes de alta frecuencia descargan a tierra a través de los rodamientos produciendo descargas eléctricas que dañan la pista del rodamiento, esta falla se evidencia en la frecuencia de falla de rodamiento mostrada en la transformada de Fourier de la corriente, por lo que se concluye que los armónicos de orden superior del voltaje de la onda PWM aplicados al motor eléctrico generan corrientes de alta frecuencia que dañan los rodamientos de los motores.
5. La onda PWM aplicada a la maquina textil tienen componentes armónicas de secuencia negativa (orden 8 y 11) y el motor presenta alto nivel de vibración mecánica a estas frecuencias, los motores con variadores que entregan ondas PWM con armónicas de secuencia positiva (orden 5 y 7) tienen bajo nivel de vibración

mecánica, por lo que se concluye que las armónicas de secuencia negativa son fuentes de alto nivel de vibración mecánicas y consecuente daño de componentes de las máquinas eléctricas.

6. En la maquina textil se detecto transitorios de voltaje en la onda PWM que llega a las borneras del motor, esto demuestra que el acople de circuito en alta frecuencia (frecuencias armónicas de orden superior) entre el conductor y el circuito equivalente del motor produce el reflejo de ondas de voltajes que se van a sumar a la onda PWM original produciendo los transitorios.

Recomendaciones

1. Para reducir la cantidad y orden de los de armónicos de la onda PWM se recomienda elegir variadores con reactores en el bus DC y así obtener una mejor onda PWM y evitar transitorios de voltaje, descargas eléctricas por rodamientos y vibraciones productos de armónicos de secuencia negativa.
2. Elegir variadores con reactores en el bus DC para una buena interacción entre la generación de onda PWM y la red de distribución eléctrica y evitar daños en otros componentes electrónicos del sistema.
3. Colocar Filtros activos o filtros de armónicos de orden 5 a la entrada del variador para evitar las distorsiones en la red eléctrica y evitar daños en otros componentes eléctricos electrónicos del sistema.
4. Colocar Filtro de armónicos de orden 50 a la salida PWM del variador para evitar las vibraciones con origen en la onda PWM y daño del aislamiento del motor eléctrico por calentamiento.
5. Colocar Filtro de armónicos para atenuar los armónicos de orden 5 y 11 de la onda PWM con filtros sintonizados para evitar que las armónicas de secuencia negativas generen vibraciones mecánicas.
6. Para modulación de portadora mayor de 5KHz proteger los rodamientos con aislamiento para evitar descargas eléctricas.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] Rockwell Automation, Conceptos básicos sobre el uso de los motores de inducción trifásicos , Noviembre 2007 , Publicación WP-Motors-ES.
- [2] Motor Reliability Working group, "Report of large motor reliability survey of industrial Part I y Part II" IEEE Trans. Ind. Appl., 21-4, pp 853-872, July-Aug. 1985
- [3] National Electrical Manufacturers Association, NEMA Standards Publication MG1 - 2009.
- [4] Institute of Electrical and Electronics Engineers, Recommended Practice and Requirements for Harmonic Control in Electric Power Systems (IEEE Std. 519-1992) Estados Unidos, 1993.
- [5] PowerSines Ltd. SinuMEC Publication Oct -2009.
- [6] Institute of Electrical and Electronics Engineers, Derating de transformadores: IEEE C57.110-1998
- [7] WEG Equipamentos Eléctricos S.A., Motores de inducción alimentados por convertidores de frecuencia PWM, 2009
- [8] Monografias.com, Esquema del rectificador no controlado, <http://www.monografias.com/trabajos94/proyecto-e-implementacion-convertidor-cc-cc-tipo-buck-control-carga-balasto/image141.gif>.
- [9] Wikimedia Commons, File:Rect Trifásico doce.jpg, http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Rect_Trifasico_doce.jpg, September 2013
- [10] WEG Equipamientos Eléctricos S.A., Automatización Convertidores de Frecuencia, Octubre 2009.
- [11] Automatización, Productividad Y Calidad S.A, Distorsión Armónica, 2005.
- [12] All test pro, Software ESA mediciones en FITESA, 2013
- [13] Rockwell Automation, Publication PFLEX-TD001E-EN-P, January 2010
- [14] Mega Representaciones, servicio de ESA ,Diciembre 2013
- [15] https://encrypted-tbn3.gstatic.com/images?q=tbn:ANd9GcS0da13pdEq8qwZWempRO3v_JgRov_H0ZQNVienOuXgTJ0MZkiA
- [16] Fluke Corporation, Medida y localización de armónicos en sistemas de potencia, servicio de ESA , 2/2004

- [17] WEG, Soluciones para la atenuación de armónicos, 2012.
- [18] Ing Norman Toledo, Aclaraciones técnicas sobre Aparatos de maniobra de baja tensión,
- [19] Grupo Precisión, CALIDAD-FILTROS/Filtros de convertidores de 12/18 pulsos, 2012.
- [20] ABB AB, Reactive power compensation, 2009.
- [21] WEG, soluciones para atenuación de armónicos, 2009.
- [22] Posada Contreras, Johnny. Modulación por ancho de pulso (PWM) y modulación vectorial (SVM). Una introducción a las técnicas de modulación. El Hombre y la Máquina [en línea] 2005, (julio-diciembre) : [Fecha de consulta: 28 de marzo de 2014] Disponible en:<<http://estudiosterritoriales.org/articulo.oa?id=47802507>> ISSN 0121-0777
- [23] EURobotics, Modulación del ancho de pulsos, mayo 2002.
- [24] Alberto Pigazo Lopez, Sistemas Electrónicos de Potencia, 2006.
- [25] electrón, Ejemplos de modulaciones PAM PWM PPM PCM, http://88.12.10.114:8880/electron/franjagl/st/temas/pam_pwm_ppm.htm.
- [26] Universidad de Sevilla Grupo de Tecnología Electrónica, tema 17. convertidores cc/ca con salida sinusoidal, http://www.gte.us.es/~leopoldo/Store/tsp_17.pdf.
- [27] Universidad de Oviedo, Inversores PWM, www.uv.es/~emaset/iep00/descargas/Inversores%20PWM%2006-07.ppt.
- [28] Revista Colombiana de Tecnologías de Avanzada, Análisis Comparativo De La Distorsión Armónica en Inversores de Potencia, 2012.
- [29] Esperanza Camargo Casallas1, Control Vectorial De Motores De Inducción, Septiembre 2010.
- [30] Siemens-Martin Brown, Accionamientos Estándar Siemens, Diciembre 1997.
- [31] Pontificia Universidad Católica del Perú, Diseño y simulación de un inversor trifásico Accionamientos Estándar Siemens, Julio 2011.
- [32] SKF Baker, Pruebas eléctricas estáticas para un mantenimiento predictivo eficaz, 2010.
- [33] William Kruger-All test pro, Análisis de Firma Eléctrica, 2010.
- [34] All test pro LLC, Manual de Análisis del MCA, 2008.
- [35] All test pro LLC, ATPOL for Power Quality Operation, 2009.
- [36] ALL-TEST Pro, ATPOL II, 2009.
- [37] ALL-TEST Pro, Especificaciones del Analizador ATPOL II, 2010.

- [38] IEC (International Electrotechnical Commission), IEC 34-18-1 Máquinas eléctricas rotatorias. Evaluación funcional de los sistemas de aislamiento de las máquinas eléctricas rotatorias, 1998.
- [39] IEEE Std. C57.91-1995, IEEE Guide for loading mineral oil-immersed transformers, 1995.
- [40] Universidad Politécnica de Catalunya, Cálculo. de pot. de cortocircuito y de tasa armónica en MT mediante los datos adquiridos con un equipo registrador, 2004
- [41] ABB Automation Group Ltd, Corrientes de los cojinetes en sistemas de accionamiento de CA modernos, 2000
- [42] IEC (International Electrotechnical Commission) /TS 60034-18-41, Qualification and design tests for Type I electrical insulation systems used in rotating electrical machines fed from voltage converters, Octubre 2013.
- [43] PSIM, software de diseño y simulación de circuitos.