



**UNIVERSIDAD CATÓLICA
DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL**

**FACULTAD DE EDUCACIÓN TÉCNICA PARA EL DESARROLLO
CARRERA DE INGENIERÍA ELÉCTRICO-MECÁNICA**

TEMA:

**Análisis de los efectos que causan los armónicos en los motores
a inducción cuando usan los variadores de frecuencia**

AUTOR:

Canales Cevallos, Iván Mesías

**Trabajo de titulación previo a la obtención del título de
Ingeniero en Eléctrico-Mecánica con Mención en Gestión
Empresarial Industrial**

TUTOR:

MSc. Echeverria Parra, Ricardo Xavier

Guayaquil - Ecuador

2019



UNIVERSIDAD CATÓLICA
DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL

FACULTAD DE EDUCACIÓN TÉCNICA PARA EL DESARROLLO
CARRERA DE INGENIERÍA ELÉCTRICO-MECÁNICA

CERTIFICACIÓN

Certificamos que el presente trabajo de titulación fue realizado en su totalidad por **Canales Cevallos, Iván Mesías**, como requerimiento para la obtención del título de Ingeniero Eléctrico-Mecánica con Mención en Gestión Empresarial Industrial.

TUTOR

MSc. Echeverria Parra, Ricardo Xavier

DIRECTOR DE LA CARRERA

MSc. Heras Sánchez, Miguel Armando



UNIVERSIDAD CATÓLICA
DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL

FACULTAD DE EDUCACIÓN TÉCNICA PARA EL DESARROLLO
CARRERA DE INGENIERÍA ELÉCTRICO-MECÁNICA

DECLARACIÓN DE RESPONSABILIDAD

Yo, **Canales Cevallos, Iván Mesías**

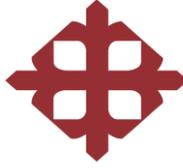
DECLARO QUE:

El Trabajo de Titulación, **Análisis de los efectos que causan los armónicos en los motores a inducción cuando usan los variadores de frecuencia**, previo a la obtención del título de Ingeniero en Eléctrico-Mecánica con Mención en Gestión Empresarial Industrial ha sido desarrollado respetando derechos intelectuales de terceros, conforme las citas que constan en el documento, cuyas fuentes se incorporan en las referencias o bibliografías. Consecuentemente este trabajo es de mi total autoría.

En virtud de esta declaración, me responsabilizo del contenido, veracidad y alcance del Trabajo de Titulación referido.

EL AUTOR

Canales Cevallos, Iván Mesías



UNIVERSIDAD CATÓLICA
DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL

FACULTAD DE EDUCACIÓN TÉCNICA PARA EL DESARROLLO
CARRERA DE INGENIERÍA ELÉCTRICO-MECÁNICA

AUTORIZACIÓN

Yo, **Canales Cevallos, Iván Mesías**

Autorizo a la Universidad Católica de Santiago de Guayaquil, a la publicación en la Biblioteca de la Institución del Trabajo de Titulación, **Análisis de los efectos que causan los armónicos en los motores a inducción cuando usan los variadores de frecuencia**, cuyo contenido, ideas y criterios son de mi exclusiva responsabilidad y total autoría.

EL AUTOR

Canales Cevallos, Iván Mesías



UNIVERSIDAD CATÓLICA
DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL

FACULTAD DE EDUCACIÓN TÉCNICA PARA EL DESARROLLO

CARRERA DE INGENIERÍA ELÉCTRICO-MECÁNICA

TRIBUNAL DE SUSTENTACIÓN

MSc. Romero Paz, Manuel de Jesús

DECANO DE LA FACULTAD

MSc. Heras Sánchez, Miguel Armando

DIRECTOR DE LA CARRERA

MSc. Philco Asqui, Luis Orlando

OPONENTE

REPORTE URKUND

The screenshot shows the URKUND web interface. The main document information is as follows:

- Documento:** [TESIS IVÁN CANALES.pdf](#) (047911353)
- Presentado:** 2019-02-13 21:01 (-03:00)
- Presentado por:** ivan_mesias38@hotmail.com
- Recibido:** ricardo.echeverria.ucsg@analysis.orkund.com
- Mensaje:** entrega de tesis [Mostrar el mensaje completo](#)

Below the document information, there is a section for sources:

- Lista de fuentes:**
 - Final 2018 HUGO Agosto 2.doc
 - 9043-Carova Peña, Adolfo Alejandro .pdf
 - 1549330255_328_Proyecto_Final_Pincay_Soriano.pdf
- Fuentes alternativas:**
 - [SR VALERIANO JULIO 02 agosto.docx](#)

At the bottom of the interface, a status bar indicates: "3% de estas 49 páginas, se componen de texto presente en 6 fuentes".

FACULTAD DE EDUCACIÓN TÉCNICA PARA EL DESARROLLO CARRERA DE INGENIERIA EN ELECTRICO-MECANICO

TEMA: "Análisis de los efectos que causan los armónicos en los motores a inducción cuando usan los variadores de frecuencia"

AUTOR: Iván Mesías Canales Cevallos

Trabajo de titulación previo a la obtención del grado de INGENIERO ELECTRICO-MECANICO

TUTOR: Echeverría Parra, Ricardo Xavier

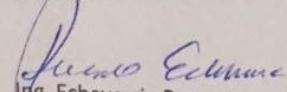
Guayaquil, Ecuador 15 de febrero del 2019

FACULTAD DE EDUCACIÓN TÉCNICA PARA EL DESARROLLO CXARRERA DE INGENIERIA EN ELECTRICO-MECANICO

CERTIFICACIÓN

Certificamos que el presente trabajo de titulación fue realizado en su totalidad por Canales Cevallos, Iván Mesías, como requerimiento para la obtención del Título de INGENIERO EN ELECTRICO-MECANICO

TUTOR:


Ing. Echeverría Parra, Ricardo Xavier

DEDICATORIA

El presente trabajo investigativo lo dedico principalmente a Dios, por ser el inspirador y darnos fuerza para continuar en este proceso de obtener uno de los anhelos más deseados.

A mi esposa, por su amor, trabajo y sacrificio en todos estos años, gracias a ella he logrado llegar hasta aquí y convertirme en lo que soy. Ha sido el orgullo y el privilegio de ser su esposo, es la mejor esposa del mundo.

A mi mamá y mis suegros que son como mis segundos padres, ellos juntos por estar siempre presente, acompañándome y por el apoyo moral, que me brindaron a lo largo de esta etapa de mi vida.

A todas las personas que me han apoyado y han hecho que este trabajo se realice con éxito, en especial a aquellos que me abrieron las puertas y compartieron sus conocimientos.

AGRADECIMIENTO

Al empezar este proyecto sin lugar a dudas pido a Dios sus bendiciones, mediante el cual doy gracias por todos y cada una de las cosas que me permite vivir a plenitud; por el día a día al levantarme y gozar de salud, por sus enseñanzas que en la vida aprendemos y por estar junto a los seres que amo.

A mi querida esposa por ser mi amiga incondicional, mi eje y mi motor para cumplir todos mis proyectos y metas, al preocuparse de que tengo que seguir adelante en mi trabajo, mis estudios y mi vida personal, junto a ella.

A mi mamá por toda la paciencia que me ha tenido, por sus bendiciones, por sus enseñanzas que me ha sabido compartir y por enseñarme a ser un hombre de bien. A mis queridos suegros por su apoyo, empuje y palabras de aliento.

A mi tutor que hace posible que este estudio salga adelante; a todos los compañeros del departamento y colaboradores de las diferentes áreas donde trabajo que supieron compartir su tiempo y conocimientos, para que se pueda desarrollar mencionado estudio, y a todo el personal que compartí en otro espacio varios criterios para el aprendizaje.

ÍNDICE GENERAL

DEDICATORIA.....	VII
AGRADECIMEINTO.....	VIII
Índice de Figuras.....	XIV
Índice de Tablas.....	XIX
RESUMEN	XX
ABSTRACT	XXI
CAPÍTULO 1.....	1
Introducción.....	1
1.1 Justificación.....	2
1.2 Planteamiento del Problema	2
1.3 Objetivos	3
1.3.1 Objetivo General	3
1.3.2 Objetivos específicos	3
1.4 Hipótesis.....	3
1.5 Metodología.....	3
CAPÍTULO 2:.....	5
Marco Teórico	5
2.1 Descripción general de un motor eléctrico.....	5
2.2. Constitución del motor de inducción.....	6
2.2.1 Construcción de un motor	8
2.2.1.1 El Estator.....	9

2.2.1.2 El Rotor	9
2.3 Clasificación de motores asíncronos o de inducción	10
2.3.1 Operación	11
2.4 Motores Síncronos	13
2.4.1 Características de operación de los motores síncronos	13
2.5. Parámetros de selección en motores de inducción	14
2.5.1 Análisis del Rendimiento.....	14
2.5.2 Selección de la Potencia de Motores.....	15
2.6 Categorías térmicas en motores, según NEMA.....	16
2.6.1 Clasificación NEMA	17
2.7 Clasificación de motor según la IEC.....	19
2.7.1 Categoría en motores IEC	19
2.8 Motor con Ventilación Forzada.....	20
2.8.1 Unidad de ventilación forzada.....	21
2.9 Conexiones eléctricas y Puesta a tierra	22
2.9.1 Terminales de puesta a tierra	24
2.9.1.1 Cables de alimentación principal.....	25
2.9.1.2 Conexiones a tierra	25
2.9.1.3 Derivaciones a tierra	26
2.9.1.4 Método “ <i>Holmgreen</i> ”	26
2.10 Cable Apantallado	27
2.10.1 Cables de alimentación principal	27

2.10.2 Cables secundarios para conexiones de anillo deslizante.....	28
2.10.3 Requisitos para máquinas alimentadas por convertidores de frecuencia	28
2.10.4 Características del cable apantallado	29
2.11 Motor funcionando con variador de frecuencia.....	30
2.11.1. Comportamiento del motor	31
2.11.2. Característica del límite de torque	32
2.11.3 Variador de Velocidad.....	33
2.11.4 Variadores eléctrico-electrónicos.....	33
2.11.5 Variadores para motores de CC	34
2.11.6 Variadores por corrientes de Eddy	35
2.11.7 Variadores de deslizamiento.....	35
2.11.8 Los variadores de frecuencia.....	36
2.12 Fallas frecuentes en motores eléctricos	38
2.12.1 Fallas en los sistemas de protección y control:.....	39
2.12.2 Fallas originadas en la operación:	39
2.12.3 Fallas por la calidad de la energía	41
2.12.3.1 Armónicos	42
2.13 Variador AFE (<i>Active Front End</i>).....	45
2.13.1 Arranque de un motor con AFE	48
2.13.2 Procedimiento AFE entre dos variadores convencionales.....	49
2.13.2.1 Beneficios de la solución AFE	51

2.13.3 Aplicaciones de la solución regenerativa AFE	53
2.13.4 Solución regenerativa AFE y variadores de frecuencia multimotor	53
2.13.5 Análisis de armónicos entre solución estándar y regenerativa ..	56
2.14 Análisis de efectos por armónicos en motores de inducción	57
2.14.1 Carga Lineal	57
2.14.1.1 Cargas resistivas.....	58
2.14.1.2 Cargas Inductivas.....	58
2.14.1.3 Cargas capacitivas	58
2.14.2 Cargas No lineal	59
2.15 Distorsión por armónicos en sistema eléctrico	60
2.15.1 Norma para emisión de armónicos en red eléctrica.....	62
2.16 Presencia de Armónicos en cargas no lineales.....	64
2.16.1 Efectos sobre los motores de inducción	65
2.16.2 Efectos sobre cables.....	66
2.17 Solución al problema de armónicos	68
2.17.1 Rectificador Multipulsos (12 pulsos)	68
2.17.2 Variadores de Velocidad con AFE (Active Front End):	70
2.18 Rodamiento	71
2.18.1 Requisitos de rodamientos para motores eléctricos	71
2.19 Reactancia para variadores.....	73
CAPÍTULO 3	78

3.1 Análisis de efectos de cargas no lineales en las industrias	78
3.2 Efectos en motores de inducción en industrias	78
3.2.1 Levantamiento de fallas	79
3.2.1.1 Distorsión por armónico en Planta # 1	89
3.2.1.2 Distorsión por armónico en la Planta # 2.....	90
3.2.1.3 Distorsión por armónico en Motor de la Planta # 1.....	92
3.2.1.4 Distorsión por armónico en motor Hidropulper # 2.....	93
3.2.1.5 Análisis de espectros del Motor de la Planta #2.....	94
3.2.1.6 Análisis del espectro del Motor de la Planta # 1.....	94
3.3 Análisis de calidad de energía en industria típica.....	96
3.4 Buenas prácticas para minimizar el efecto de armónicos.....	98
3.4.1 Apantallamiento eléctrico del motor	98
3.4.2 Rodamientos cerámicos	100
CAPÍTULO 4	103
4.1 Conclusiones.....	103
4.2 Recomendaciones.....	104
Referencias Bibliográficas	105

Índice de Figuras

Capítulo 2.

Figura 2. 1. Motor eléctrico	5
Figura 2. 2 Corte de un motor de inducción de rotor de jaula grande	6
Figura 2. 3 Circuito magnético del estator y rotor de un motor de inducción .	7
Figura 2. 4 Rotor jaula de ardilla	7
Figura 2. 5 Rotor bobinado típico para motores de inducción.....	8
Figura 2. 6 Un motor de inducción	8
Figura 2. 7 Rotor de anillo deslizante.....	10
Figura 2. 8 Eficiencia de motores.....	14
Figura 2. 9 Naturaleza de las pérdidas en motores	15
Figura 2. 10 Elección de un motor eléctrico óptimo	16
Figura 2. 11 Selección de motores en función de su potencia y velocidad..	16
Figura 2. 12 Porcentajes de torsión a plena carga y de velocidad sincrónica	17
Figura 2. 13 Categorías de motores IEC	20
Figura 2. 14 Motor clasificación H con ventilación forzada	21
Figura 2. 15 Unidad de ventilación forzada.....	22
Figura 2. 16 Terminales de puesta a tierra en la caja de conexiones	24
Figura 2. 17 Disposición de los terminales puesta a tierra en la carcasa	25
Figura 2. 18 Protección de motores	27
Figura 2. 19 Cable apantallado	28

Figura 2. 20 Cable apantallado y motor conectado a variador.....	29
Figura 2. 21 Cable apantallado TOPFLEX®-EMV-UV 3	29
Figura 2. 22 Motor funcionando con variador de frecuencia	31
Figura 2. 23 Característica del límite de torque de motor conectado con variador de frecuencia	33
Figura 2. 24 Variador de velocidad Sinamics G110	36
Figura 2. 25 Etapas de un variador de frecuencia	37
Figura 2. 26 Conexión típica de motor y un variador de frecuencia	37
Figura 2. 27 Motor de inducción y un variador de frecuencia	38
Figura 2. 28 Perturbaciones frecuentes que afectan la calidad de la potencia eléctrica	41
Figura 2. 29 Onda deformada	42
Figura 2. 30 Instalación de un arrancador con variador en un centro de control de motores Fuente. (Mamani Conto, 2011, pág. 30).....	45
Figura 2. 31 Arrancador de frecuencia - Protección total.....	46
Figura 2. 32 Supresores de sobrepicos interna	46
Figura 2. 33 Tarjetas electrónicas.....	47
Figura 2. 34 Tablero de arrancador de motor con variador de velocidad: Protección total	48
Figura 2. 35 Arrancador con variador de velocidad regenerativo AFE.....	49
Figura 2. 36 Arquitectura regenerativa con dos variadores de velocidad	50
Figura 2. 37 Diagrama típico de la solución AFE	50
Figura 2. 38 Variadores de frecuencia, solución regenerativa.	52

Figura 2. 39 Configuración básica de solución multimotor, un solo variador AFE para cada motor	54
Figura 2. 40 Configuración básica de un sistema de frecuencia de multi accionamiento Fuente. (Mamani Conto, 2011, pág. 38)	55
Figura 2. 41 Conexión a través del Bus DC entre un variador AFE y múltiples variadores Fuente. (Mamani Conto, 2011, pág. 38).....	56
Figura 2. 42 Comparación de armónicos entre las soluciones estándar y AFE	57
Figura 2. 43 Características de carga lineal.....	59
Figura 2. 44 Representación de carga lineal de motor inducción trifásico ...	59
Figura 2. 45 Tensión y Corriente Trifásica Instantánea PF=92%.....	60
Figura 2. 46 Consumo típico de una red con Variadores de Frecuencia (VDF)	61
Figura 2. 47 Representación de corriente en cargas no lineales (motores) .	64
Figura 2. 48 Recorrido de tensión y corriente en cargas no lineales	64
Figura 2. 49 Motor con secuencia positiva.....	66
Figura 2. 50 Diagrama unifilar donde se aprecia deterioro de la onda, debido a cargas no lineales	67
Figura 2. 51 Rectificador de 12 pulsos Fuente: (Schneider Electric, 2018, p.42).....	69
Figura 2. 52 Onda de salida de rectificador de 12 pulsos	69
Figura 2. 53 Esquema de variador AFE.....	70
Figura 2. 54 Alojamiento de los rodamientos en motores eléctricos	72
Figura 2. 55 Influencia del mejoramiento de diseño interno sobre la durabilidad de rodamientos.....	72

Figura 2. 56 Influencia del mejoramiento de diseño interno sobre el momento de fricción.	73
Figura 2. 57 Protección contra picos de voltaje.	75
Figura 2. 58 Protección del motor con reactancias (lado derecho)	75
Figura 2. 59 Curva de linealidad de la reactancia	76
Figura 2. 60 Conexión de reactancias en un variador.....	77
Capítulo 3.	
Figura 3. 1 Diagrama unifilar eléctrico de una industria	78
Figura 3. 2 Motor averiado 3/1/18.....	79
Figura 3. 3 Motor inducción.....	81
Figura 3. 4 Motor agitador tanque deflaking	82
Figura 3. 5 Motor Criba #2	83
Figura 3. 6 Variador Velocidad Bomba Vacío #1 Mesa	83
Figura 3. 7 Motor Refinador # 3	85
Figura 3. 8 Motor Refinador # 5	85
Figura 3. 9 Diagnóstico termográfico de motor de refinador #5	86
Figura 3. 10 Identificación PCC	89
Figura 3. 11 Proceso de Planta # 1 en S/E # 2.....	90
Figura 3. 12 Conexión eléctrica de máquina de proceso	91
Figura 3. 13 Conexión eléctrica del proceso # 2 de la S/E # 6	92
Figura 3. 14 Análisis del motor Planta #1	93
Figura 3. 15 Motor Planta #2.....	93

Figura 3. 16 Motor planta # 2	94
Figura 3. 17 Planta #1	95
Figura 3. 18 Perfil de 2 ranuras, (izq. sin apantallamiento; der. con apantallamiento a tierra entre el devanado del estator y rotor	99
Figura 3. 19 Rodamientos de cerámica en motor de inducción	101
Figura 3. 20 Mejores prácticas para mitigar el daño al rodamiento.....	102

Índice de Tablas

Tabla 2. 1 Varias clases de motor de inducción de jaula de ardilla.....	12
Tabla 2. 2 Características de motores de inducción de jaula de ardilla de acuerdo con la clasificación NEMA (en letras).....	16
Tabla 2. 3 Dimensiones y especificaciones del cable TOPFLEX®-EMV-UV 3	30
Tabla 2. 4 Normas para emisión de armónicos.....	62
Tabla 2. 5 Límites de distorsión de tensión.....	63
Tabla 2. 6 Límites de distorsión de corriente para sistemas de 120V a 69 kV.	63

Capítulo 3.

Tabla 3. 1 Causas y efectos de las fallas más frecuentes en un motor eléctrico	87
Tabla 3. 2 THD voltaje	89
Tabla 3. 3 THD corriente.....	89
Tabla 3. 4 THD de voltaje y corriente.....	90
Tabla 3. 5 THD voltaje	91
Tabla 3. 6 THD corriente	91
Tabla 3. 7 THD voltaje	92
Tabla 3. 8 THD corriente	92
Tabla 3. 9 Descripción de falla de motores eléctricos en industria típica	97

RESUMEN

El presente trabajo aborda las causas de fallas por efectos de armónicos, que las cargas domésticas e industriales contienen cada vez más circuitos electrónicos que se alimentan de corriente que no es senoidal pura, donde se tiene como objetivo principal desarrollar un contexto operacional para minimizar los daños que presenta los armónicos en los motores de inducción. Así, por ejemplo, los motores utilizan cada vez más la regulación de frecuencia, que requiere un paso de corriente alterna a corriente continua (rectificadores, onduladores, etc.) e inclusive para realizar transformaciones CC-CA. La metodología aplicada en este trabajo corresponde a la descriptiva por cuanto estudia los armónicos, y posibles tecnologías y técnicas para solucionar los mismos, emplea el método de campo y posteriormente el método analítico por cuanto a través de levantamiento de información obtenidas en máquinas rotatoria de una industria típica, es posible determinar causas o fallas ubicando las cargas no lineales en un plano unifilar, para plantear soluciones como colocar reactancias, cables apantallados y que los motores consten con sus respectivos rodamientos de cerámicas, consiguiendo minimizar el efecto de armónicos en los motores y prolongando la vida útil de las maquinas rotatorias.

Palabras Claves: Armónicos, rodamientos, Motor inducción, Mantenimiento predictivo, variador. AFE

ABSTRACT

The present work addresses the causes of faults due to the effects of harmonics, that domestic and industrial loads are increasingly electronic circuits that are fed by current that is not pure sinusoidal, where the main objective is an operational context to minimize the damage That presents the harmonics in the induction motors. Thus, for example, the motors use more and more the regulation of the frequency, which requires a passage of alternating current to direct current (rectifiers, inverters, etc.) and even to perform CC-CA transformations. The methodology applied in this work corresponds to the descriptive by studying the harmonics, and the techniques and techniques for the solution of them, the field method and the analytical method in regard to the lifting of information in rotating machines of a typical industry, it is possible to determine causes or failures to locate the non-linear loads in a single-line plane, to plant solutions such as placing ballasts, screened cables and that the motors consist of their corresponding ceramic bearings, which have the consequence of harmonics in the engines and prolonging the useful life of the rotary machines.

Key words: Harmonics, bearing, Induction Motor, Predictive Maintenance, Variator. AFE

CAPÍTULO 1

Introducción

En los sistemas eléctricos de potencia, los motores de inducción ya sean estas monofásico o trifásico de acuerdo a su funcionamiento son elementos muy utilizados en las industrias a los cuales les afecta los armónicos, cuyo problema es ocasionado por ciertos elementos de la electrónica que son considerados cargas no lineales, los mismos que son generados por el uso de variadores de frecuencia, histéresis del conductor, convertidores de potencia, etc.

Considerando también que, en la Red de suministro produce ondas no sinusoidales para efectos dañinos del sistema eléctrico, como pérdidas adicionales, ruido y un excesivo incremento de temperatura, no solo afectando a los motores, sino también a los demás componentes que complementan el trabajo prediseñado. Donde se aprecia la necesidad de contrarrestar estos efectos.

Se debe tomar en cuenta que todo esto se ve afectado en el rendimiento de los equipos y las grandes pérdidas por los paros de producción prolongados y altos costos de mantenimiento correctivo. Ocasionado por no tener en cuenta el uso indebido de elementos no adecuados, para minimizar este fenómeno y así hacer que la eficiencia y vida útil de los motores de inducción sea prolongada.

La aparición de las cargas no lineales como son los variadores de frecuencia, junto a los motores de inducción, son el sistema eléctrico a estudiar para determinar sus efectos, ya que estos van en aumento y cada vez es más difícil de encontrar cargas totalmente lineales.

La mayor parte del estudio de los efectos de los armónicos se lo realiza en redes de distribución o en subestaciones, para determinar el dominio de la frecuencia que se encuentran trabajando y sus posibles consecuencias. Por medio del presente estudio se determina el modo

adecuado y necesario para el mejor funcionamiento de los motores de inducción.

1.1 Justificación

La presente investigación se basa en la recopilación, clasificación y selección de los elementos a utilizarse en el sistema eléctrico, para minimizar los efectos que causan los armónicos en los motores a inducción, con el fin de mitigar las pérdidas eléctricas, económicas y de tiempo para tener mayor eficiencia y pueda prolongar la vida útil del motor.

Se consideró a desarrollarse mencionado estudio, al notar los constantes daños que se presentan en los motores de inducción cuando usan variadores de frecuencia, y se generó la siguiente pregunta ¿Cuál es la causa de los daños continuos de estos sistemas eléctricos?

A partir de esta idea se realiza este trabajo, por la necesidad de las grandes industrias las cuales utilizan muchos motores, donde se produce grandes pérdidas, entonces se determina sus consecuencias y posibles soluciones.

1.2 Planteamiento del Problema

Cómo minimizar los daños que producen los armónicos en los motores eléctricos a inducción con el uso de los variadores de frecuencia.

-Variable independiente: Variadores de frecuencia

-Variable dependiente: Daños que producen los armónicos en motores eléctricos.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo General

Desarrollar un contexto operacional para minimizar los daños que presentan los armónicos en los motores de inducción con el uso de los variadores de frecuencia

1.3.2 Objetivos específicos

1. Verificar los elementos no lineales de las cargas limpias en una instalación eléctrica (variadores de frecuencia en los motores).
2. Determinar el efecto de descarga eléctrica en rodamientos de los motores de inducción.
3. Analizar la degradación del aislamiento de los conductores a causa de los armónicos, para regular y limitar los niveles de distorsión.

1.4 Hipótesis

Al utilizar ventilación forzada, cables apantallados, su respectiva puesta a tierra se logrará minimizar los daños que producen los armónicos en los motores de inducción por el uso de los variadores de frecuencia

1.5 Metodología

El presente trabajo de titulación utiliza las siguientes metodologías de investigación:

Método descriptivo: Este método busca especificar las propiedades, características y los perfiles de personas, grupos, comunidades o cualquier otro fenómeno que sea sometido a análisis. Es decir únicamente pretenden medir o recoger información de manera independiente o conjunta sobre las variables a las que se refieren (Hernández, Fernández, & Baptista, 2010, pág. 151).

Con este concepto se describe la operación de los motores de inducción y del dispositivo de control de giro del eje del motor y otros elementos como; cables apantallados, puesta a tierra, etc.

Método explicativo: Este método se centra en explicar por qué ocurre un fenómeno y en qué condiciones se da éste, o por qué dos o más variables están relacionadas. Las investigaciones explicativas son más estructuradas que las demás clases de estudios, busca hallar las razones y/o causas que producen ciertos fenómenos. (Hernández, Fernández, & Baptista, 2010, pág. 152).

En este caso, se explica los daños que producen los armónicos en motores eléctricos.

Método analítico: Este método de investigación descompone un todo en sus partes para estudiar en forma intensiva cada uno de sus elementos, así como las relaciones entre sí y con el todo. (Hernández, Fernández, & Baptista, 2010, pág. 152).

Con este estudio se analizan los efectos de armónicos en cargas lineales.

CAPÍTULO 2:

Marco Teórico

2.1 Descripción general de un motor eléctrico

El motor eléctrico está clasificado dentro de las denominadas máquinas eléctricas giratorias, esta máquina eléctrica tiene la capacidad de transformar la energía eléctrica en energía mecánica; es decir, que es capaz de realizar movimiento al convertir en trabajo la energía eléctrica proveniente de la red en un banco de baterías.

Asimismo, un motor eléctrico está compuesto de dos partes principales; una fija denominada Estator, y otra móvil denominada Rotor. Ambas partes están fabricadas con material de tipo ferromagnético (chapas magnéticas apiladas) y disponen de una serie de ranuras en las que se alojan los hilos conductores de cobre, que forman el devanado eléctrico. (Instituto de energía y termodinámica - UPB, 2015, pág. 14).

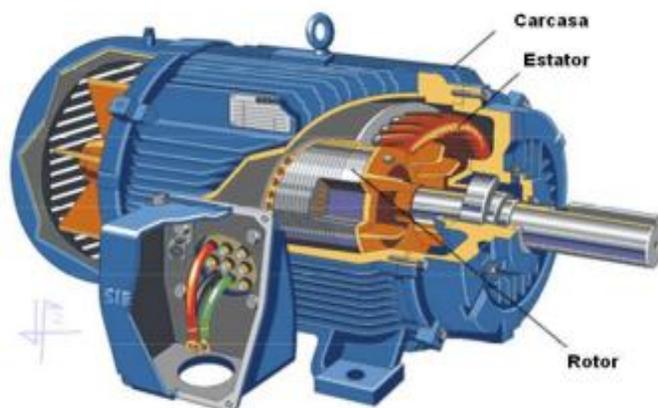


Figura 2. 1. Motor eléctrico

Fuente. (Carrasco, 2011, pág. 1)

En la máquina de inducción, la tensión del rotor que produce la corriente del rotor y el campo magnético del rotor se induce en los devanados del rotor en lugar de estar físicamente conectados por cables. (Instituto de energía y termodinámica - UPB, 2015, pág. 14).

2.2. Constitución del motor de inducción

Existen básicamente 2 tipos de construcción de rotor, los cuales son:

- a) **Jaula de ardilla:** sin arrollamientos ni anillos de deslizamiento.
- b) **Rotor de devanados:** tiene 3 devanados de fase, generalmente conectados en Y, y los extremos del devanado están conectados a través de anillos deslizantes.

Se sabe que el rotor de devanados es más caro debido a su costo de mantenimiento para mantener los anillos deslizantes, las escobillas de carbón y también los devanados del rotor.

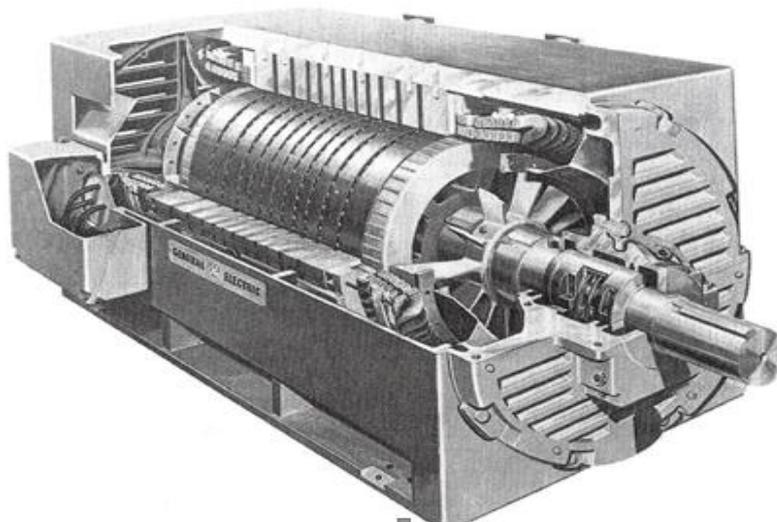


Figura 2. 2 Corte de un motor de inducción de rotor de jaula grande

Fuente: (Murillo, 2016, pág. 3)

En efecto, en todo motor eléctrico existen dos tipos de devanados: 'el inductor', que origina el campo magnético para inducir las tensiones correspondientes y el segundo devanado, denominado 'inducido', en ella

salen las corrientes eléctricas que producen el par de funcionamiento deseado (torque).

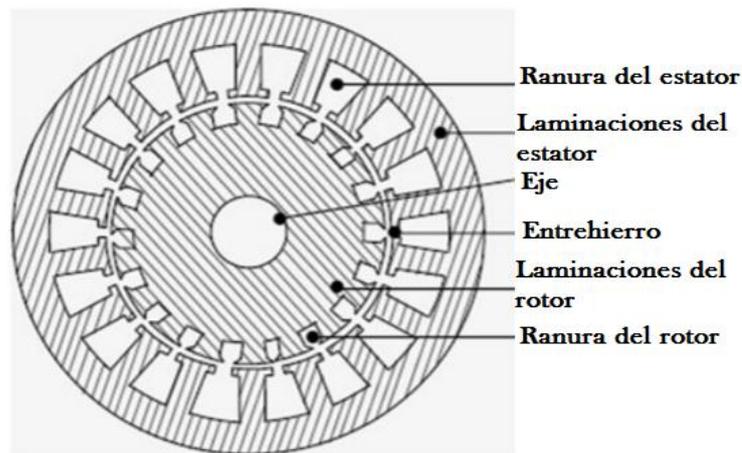


Figura 2. 3 Circuito magnético del estator y rotor de un motor de inducción

Fuente. (Baker, 2009, pág. 23)

El espacio entre el rotor y el estator es constante y éstos reciben el nombre de 'entrehierro'. Pues, el efecto de las intensidades que atraviesan el rotor y el estator, crean campos magnéticos en el entrehierro. Por lo tanto, la interacción de estos campos magnéticos con las intensidades que atraviesan los conductores del rotor, origina unas fuerzas tangenciales que hacen girar el rotor produciéndose de este modo la energía mecánica. (Peralta Núñez, 2009, pág. 15)

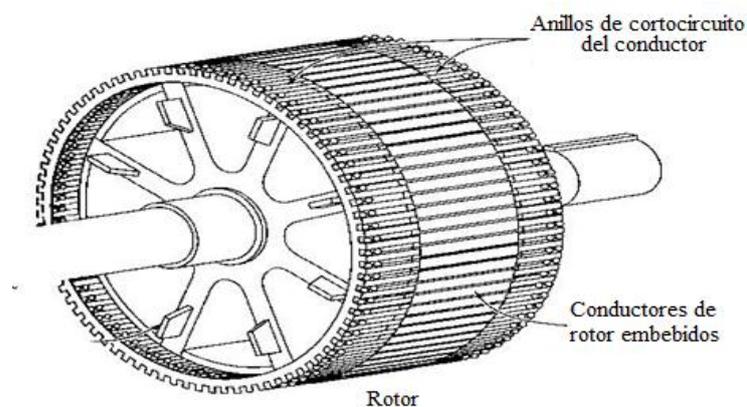


Figura 2. 4 Rotor jaula de ardilla

Fuente: (Murillo, 2016, pág. 5)

Sin embargo, un motor de inducción comprende un circuito magnético que interconecta dos circuitos eléctricos que se colocan en el rotor y estator. En la figura 2.5 se muestra el bobinado típico dentro del motor de inducción.

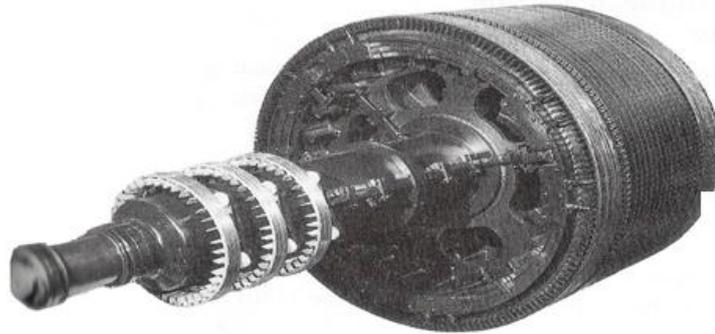


Figura 2. 5 Rotor bobinado típico para motores de inducción.

Fuente: (Fraile Mora, 2008, pág. 12)

El rotor está soportado en cojinetes en cada extremo. Generalmente, tanto el estator como el rotor constan de dos circuitos: (a) un circuito eléctrico para llevar corriente y normalmente de cobre aislado o aluminio aislado y (b) un circuito magnético, que se muestra en la figura 2.6, para transportar el flujo magnético hecho de material magnético laminado, normalmente de acero. (Fraile Mora, 2008, pág. 13)

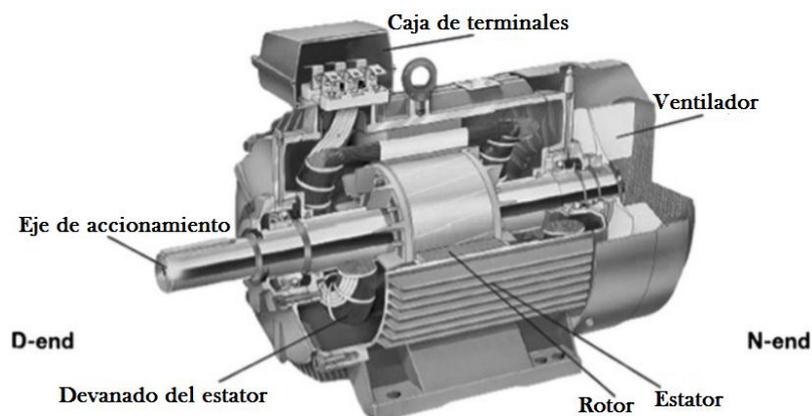


Figura 2. 6 Un motor de inducción

Fuente. (Baker, 2009, pág. 16)

2.2.1 Construcción de un motor

Se detallan sus partes más esenciales:

2.2.1.1 El Estator

El estator, que se muestra en la figura 2.3, es la parte estacionaria externa del motor. Consta de:

- Marco cilíndrico exterior
- Laminación magnética
- Conjunto de devanados eléctricos aislados.

(a) El marco cilíndrico exterior: está hecho de aleación de fundición de hierro o de aluminio o de chapa de acero soldada. Esto incluye normalmente pies para el montaje de pie del motor o una brida para cualquier otro tipo de montaje del motor.

(b) Láminas magnéticas: comprende un conjunto de laminaciones de acero aleado de alta calidad con soporte en el marco del estator cilíndrico exterior. El camino magnético está laminado para reducir las pérdidas por corrientes parásitas y el calentamiento.

(c) Un conjunto de devanados eléctricos aislados: para un motor trifásico, el circuito del estator tiene tres conjuntos de bobinas, uno para cada fase, que está separado por 120° y se excita por un suministro trifásico. Estas bobinas se colocan dentro de las ranuras de la ruta magnética laminada. (Peralta Núñez, 2009, pág. 16).

2.2.1.2 El Rotor

Es la parte giratoria del motor. Se coloca dentro del orificio del estator y gira coaxialmente con el estator. Al igual que el estator, el rotor también está hecho de un conjunto de láminas delgadas ranuradas, llamadas laminaciones, de sustancia electromagnética (núcleo de acero especial) prensados juntos en forma de un cilindro. Las hojas delgadas están aisladas entre sí por medio de papel, barniz. Las ranuras consisten en el circuito eléctrico y la sustancia electromagnética cilíndrica actúa como ruta magnética. (Peralta Núñez, 2009, pág. 16).

2.3 Clasificación de motores asíncronos o de inducción

Pueden ser de dos tipos:

a) Motor de inducción del tipo de jaula de ardilla

El rotor comprende un conjunto de barras hechas de cobre o aluminio o aleación como conductores de rotor, que están incrustados en las ranuras del rotor. Esto le da una construcción muy resistente del rotor. Las barras de rotor están conectadas en ambos extremos a un anillo de extremo para hacer una trayectoria cercana.

b) Motor de tipo de rotor bobinado de inducción

En este caso, los conductores del rotor son devanados aislados que no están en cortocircuito con los anillos extremos, pero los terminales de los devanados se sacan para conectarlos a tres números de anillos colectores aislados que están montados en el eje, tal como se muestra en la figura 2.7. Las conexiones eléctricas externas al rotor se realizan mediante cepillos colocados en los anillos deslizantes. Para la presencia de estos anillos deslizantes, este tipo de motor también se denomina motor de inducción de anillo deslizante (Baker, 2009, pág. 18).



Figura 2. 7 Rotor de anillo deslizante

Fuente. (Baker, 2009, pág. 18)

Además de las dos partes principales anteriores, un motor de inducción consta de otras partes que se nombran de la siguiente manera:

- a) **Bridas de extremo:** hay dos bridas de extremo que se utilizan para soportar los dos cojinetes en ambos extremos del motor.

- b) **Rodamientos:** hay dos conjuntos de rodamientos que se colocan en ambos extremos del rotor y se utilizan para soportar el eje giratorio.
- c) **Eje:** está hecho de acero y se utiliza para transmitir el par generado a la carga.
- d) **Ventilador de enfriamiento:** normalmente se encuentra en el extremo opuesto del lado de la carga, llamado extremo no conductor del motor, para el enfriamiento forzado del estator y el rotor.
- e) **Caja de terminales:** está en la parte superior o en cualquier lado del bastidor cilíndrico exterior del estator para recibir las conexiones eléctricas externas.

2.3.1 Operación

Cuando el devanado del estator de un motor de inducción se conecta a un suministro trifásico, se produce en él un campo magnético giratorio uniforme, que induce f.e.m. en el rotor que es libre de girar coaxialmente con el núcleo del estator con la ayuda de cojinetes de bolas. El rotor está en cortocircuito, ya sea a través de los anillos de extremo o una resistencia externa y se producen corrientes debido a este f.e.m inducido. Esta corriente interactúa con el campo magnético rotativo para desarrollar un par en el rotor en la dirección del campo magnético giratorio. Como el rotor puede girar libremente, el par hará que se mueva en la dirección del campo del estator. Esto hace que un motor de inducción trifásico sea de arranque automático (Baker, 2009, pág. 19).

Al transformar esta energía eléctrica en energía mecánica, en un motor de inducción se producen algunas pérdidas que son las siguientes:

- Fricción y pérdidas por viento, 5-15%
- Pérdidas de hierro o núcleo, 15-25%
- Pérdidas del estator, 25-40%
- Pérdidas del rotor, 15-25%
- Pérdidas por carga perdida, 10-20%.

La eficiencia del motor a plena carga varía de aproximadamente 85 a 97%. Si el voltaje de suministro y la frecuencia son constantes, entonces un motor de inducción de jaula de ardilla funciona a una velocidad constante, lo que lo hace adecuado para su uso en un accionamiento de velocidad constante. Sin embargo, varios diseños estándar de motores de inducción de jaula de ardilla están disponibles en el mercado para cumplir con los requisitos de diferentes condiciones de arranque y funcionamiento de diversas aplicaciones industriales. Estos se clasifican como clase A, clase B, clase C y clase D (Baker, 2009, pág. 20).

En la tabla 2.1, se presenta una comparación de diferentes clases de motores de inducción de jaula de ardilla.

Tabla 2. 1 Varias clases de motor de inducción de jaula de ardilla

	Clase A	Clase B	Clase C	Clase D
Propiedades	Par de arranque normal, alta corriente de arranque y deslizamiento de operación bajo.	Par de arranque normal, baja corriente de arranque y bajo deslizamiento de operación.	Alto par de arranque y baja corriente de arranque.	Alto par de arranque, baja corriente de arranque y alto deslizamiento operativo.
Usos	Ventilador, carga de la bomba, entre otros., donde el par es bajo al inicio.	Para un accionamiento de velocidad constante, como una bomba, un soplador.	Compresor, transportadores, bloqueadores, etc.	Para conducir cargas intermitentes, ej. punzonadora, entre otros.

Fuente: El autor

Los motores asíncronos se basan específicamente en su funcionamiento en la creación de un campo magnético giratorio en el entrehierro, debido a la circulación de corriente alterna trifásica en el estator. (Instituto de energía y termodinámica - UPB, 2015, pág. 39)

El 'motor asíncrono', también llamado motor de inducción es el motor más utilizado de todas las máquinas eléctricas rotativas y esto se debe a sus características constructivas, que lo hacen más económico y robusto.

Pues, necesita de un menor mantenimiento que el resto de máquinas. Sin embargo, por su gran uso en el entorno industrial, constituye un elemento clave en numerosos procesos críticos, por lo que resulta de especial interés conocer y saber identificar las averías típicas de este tipo de máquinas, así como los procedimientos predictivos que puedan guiar a una reducción de fallos imprevistos (Thomson, 2001, pag.23)

En concomitante, se sabe que el motor trifásico de inducción, al igual que el resto de máquinas eléctricas, consta de dos partes diferenciadas, mencionadas inicialmente en el enunciado, que son la parte *‘fija o estator’* y la parte *‘giratoria o rotor’*. Ambas se encuentran alejadas por un pequeño espacio libre, que recibe el nombre de entrehierro, que permite el libre giro del rotor en el interior de la máquina. (Fraile Mora, 2008, pág. 42) & (Picazo Ródenas, 2016, pág. 36).

Con los conceptos antes mencionados, se entiende por entrehierro el espacio de aire que separa el estator del rotor. Por tanto, debe ser lo más reducido posible para minimizar los flujos de dispersión y reducir la reluctancia del circuito magnético, ya que el aire conduce mucho peor el flujo magnético que el hierro.

2.4 Motores Síncronos

Los motores sincrónicos son de menor uso a nivel industrial y sólo sustituyen a los asíncronos en algunas aplicaciones específicas. Su principal característica es que giran a velocidad constante al igual a la velocidad sincrónica. (Instituto de energía y termodinámica - UPB, 2015, pág. 21)

2.4.1 Características de operación de los motores sincrónicos

Aparte de girar a velocidad constante, los motores sincrónicos muestran las siguientes características de operación:

- El rotor se alimenta con corriente directa.
- Su par de arranque es nulo, por lo que se ve forzado a arrancar como si fuese asíncrono.

- Requieren de un mayor mantenimiento y cuidado, ya que su costo es alto.
- Su factor de potencia puede llegar a 1, e incluso puede hacerse capacitivo.
- Generalmente, son más ventajosos que los asíncronos, en casos de bajas velocidades, grandes tamaños y en mejorar el factor de potencia. (Instituto de energía y termodinámica - UPB, 2015, pág. 22)

2.5. Parámetros de selección en motores de inducción

2.5.1 Análisis del Rendimiento

En la transformación de energía eléctrica en mecánica (que tiene lugar en un motor), una parte de la energía eléctrica tomada de la red se convierte en calor, constituyendo lo que son las pérdidas de un motor, tal como se muestra en la figura 2.8.

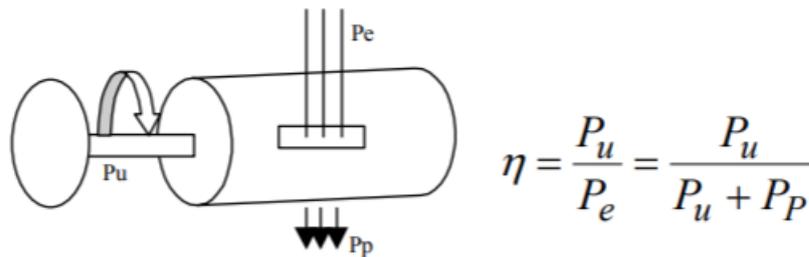


Figura 2. 8 Eficiencia de motores

Fuente. (Institution of Engineering and Technology (IET) , 2015, pág. 22)

Las pérdidas que se producen en todos los motores eléctricos son fundamentalmente de tres tipos:

- Pérdidas eléctricas en devanados y otras partes de la maquinaria (P_{cu}). Éstas corresponden a las pérdidas por efecto Joule ($I^2.R$) y las pérdidas producidas en las escobillas (motores de C.C.).
- Pérdidas producidas en los circuitos magnéticos, o pérdidas en el hierro (P_{fe}).
- Pérdidas mecánicas debidas a rozamientos y ventilación (P_{mec}). También se incluye en este grupo aquellas originadas por el roce en los

cojinetes, del aire y de las escobillas, así como la potencia absorbida por el ventilador (Instituto de energía y termodinámica - UPB, 2015, pág. 22)

En la figura 2.9 se puede apreciar, mediante un diagrama de *Sankey*, las pérdidas que se suscitan en un motor convencional.

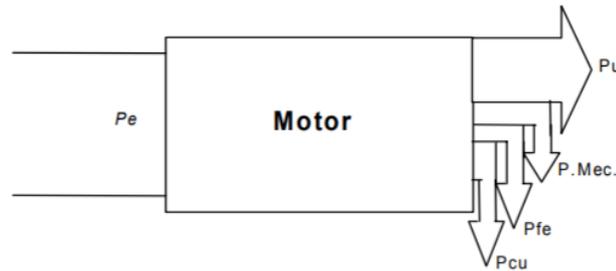


Figura 2. 9 Naturaleza de las pérdidas en motores

Fuente. (Institution of Engineering and Technology (IET) , 2015, pág. 23)

El cálculo exacto de las pérdidas no se puede determinar fácilmente, dada la gran variedad de formas constructivas y de los tipos de ventilación. No obstante, actualmente existe un sinnúmero de tablas y programas que permiten, por comparación con motores similares, determinarlas con excelentes resultados. Es importante aclarar que, para un motor determinado, las pérdidas aumentan a medida que crece la velocidad de rotación del motor.

2.5.2 Selección de la Potencia de Motores

Para una aplicación específica, la elección de un motor eléctrico bueno resulta una complejidad (debido a los muchos factores que hay que tener en cuenta); es decir, no existe una norma ni pauta exacta y precisa que se aplique en todos los casos. Por tanto, se pretende dar algunas orientaciones que faciliten y/o permitan seleccionar un motor adecuado y óptimo.

No obstante, a continuación, en la figura 2.10 se señala algunos factores relevantes a tener en cuenta para la elección de un motor:

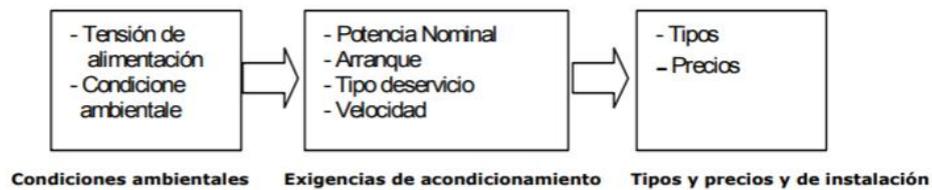


Figura 2. 10 Elección de un motor eléctrico óptimo

Fuente. El autor

Posteriormente y teniendo en consideración la carga requerida y la velocidad de operación, se puede apreciar en la figura 2.11 un esquema que permite elegir la conveniencia entre motores síncronos y asíncronos.

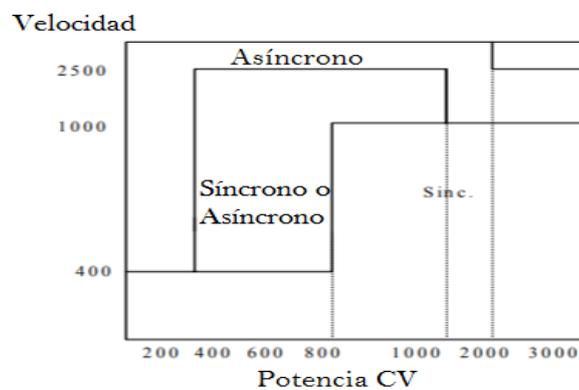


Figura 2. 11 Selección de motores en función de su potencia y velocidad

Fuente. (Institution of Engineering and Technology (IET) , 2015, pág. 24)

2.6 Categorías térmicas en motores, según NEMA

Para distinguir entre diversos tipos disponibles, la *National Electrical Manufacturers Association* (NEMA), ha desarrollado un sistema de identificación con letras en la cual cada tipo de motor comercial de inducción de jaula de ardilla se fabrica de acuerdo con determinada norma de diseño y se coloca en determinada clase, identificada con una letra en mayúscula. (Guinudinik, 2016, pág. 20).

A continuación, en la tabla 2.2 se puede observar el resumen de las cinco clases NEMA de motores de inducción de jaula de ardilla:

Tabla 2. 2 Características de motores de inducción de jaula de ardilla de acuerdo con la clasificación NEMA (en letras)

Clase NEMA	Par de arranque Carr/Cn	Corriente de Arranque	Regulación de Velocidad (%)	Nombre de clase del motor
A B	1.5-1.75	5-7	2-4	Normal
C	1.4-1.6	4.5-5	3.5	De propósito general De doble jaula, alto par
D F	2-2.5	3.5-5	4-5	De alto par alta resistencia De doble jaula, bajo par y baja corriente de arranque.
	2.5-3.0	3-8	5-8 , 8-13	
	1.25	2-4	mayor de 5	

*Los voltajes citados son para el voltaje nominal en el arranque.

A continuación, se puede ver en la figura 2.12 el porcentaje de momento de torsión a plena carga y el porcentaje de velocidad sincrónica.

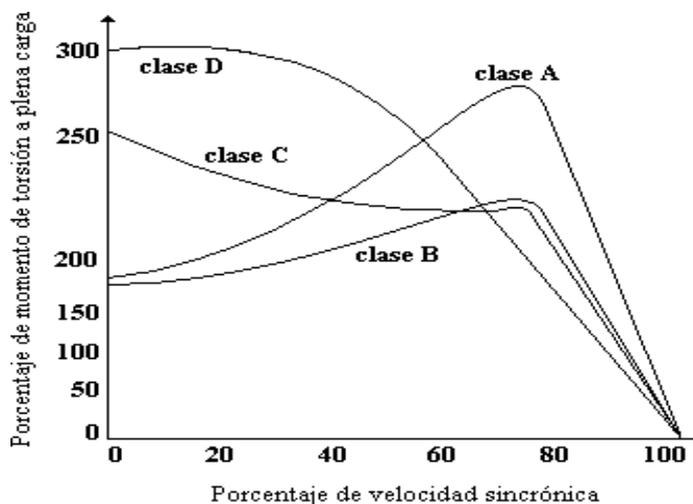


Figura 2. 12 Porcentajes de torsión a plena carga y de velocidad sincrónica

Fuente. (Guinudinik, 2016, pág. 22)

2.6.1 Clasificación NEMA

Según (Guinudinik, 2016, pág. 22), los motores trifásicos de potencias mayores de 1 HP se clasifican por las normas NEMA, de acuerdo al diseño de jaula del rotor y son los siguientes:

Motor de diseño NEMA A

Momento alto, deslizamiento nominal bajo y corriente de arranque alta. Es un motor de inducción con rotor tipo jaula de ardilla, diseñado con características de momento y corriente de arranque que exceden

los valores correspondientes al diseño NEMA B, son usados para aplicaciones especiales donde se requiere un Momento máximo mayor que el normal, para satisfacer los requerimientos de sobrecargas de corta duración. Además, estos motores son utilizados a cargas que requieren deslizamientos nominales muy bajos y del orden del 1% o menos (velocidades casi constantes). (Guinudinik, 2016, pág. 22).

Motor de diseño NEMA B

Momento normal, corriente de arranque normal y deslizamiento nominal normal. Son motores con rotor tipo jaula de ardilla diseñados con características de momento y corriente de arranque normales; como así un bajo deslizamiento de carga de aproximadamente 4% como máximo. Generalmente, se considera el motor típico dentro del rango de 1 a 125 HP y el deslizamiento a plena carga es de aproximadamente 3%.

Por lo tanto, este tipo de motor facilitará un arranque y una aceleración suave para la mayoría de las cargas y de la misma manera, puede resistir o soportar transitoriamente picos elevados de carga sin detenerse. (Guinudinik, 2016, pág. 23).

Motor de diseño NEMA C

Momento alto, deslizamiento nominal normal, corriente de arranque normal. Son motores de inducción con rotor de doble jaula de ardilla, que desarrollan un alto momento de arranque y por eso, son utilizados para cargas de arranque pesado. Dichos motores tienen un deslizamiento nominal menor que el 5%. (Guinudinik, 2016, pág. 23)

Motor de diseño NEMA D

Momento alto, alto deslizamiento nominal, baja corriente de arranque. Este motor establece e incorpora un alto momento de arranque con un alto deslizamiento nominal. Generalmente se presentan dos tipos

de diseño, uno con deslizamiento nominal de 5 a 8% y otro con deslizamiento nominal de 8 a 13%. Cuando el deslizamiento nominal puede ser mayor del 13%, se les nombra motores de alto deslizamiento o muy alto deslizamiento (Ultra High Slip). El momento de arranque es generalmente de 2 a 3 veces el par nominal, aunque para aplicaciones especiales puede ser más alto. Estos motores son recomendados para cargas cíclicas y para cargas de corta duración con frecuentes arranques y paradas. (Guinudinik, 2016, pág. 23)

Motores de diseño NEMA F

Momento de arranque bajo, corriente de arranque baja, bajo deslizamiento nominal. Son motores poco usados, destinándose a cargas con frecuentes arranques. Por tanto, pueden ser de altos Momentos y se utiliza en casos en los que es importante limitar la corriente de arranque. (Guinudinik, 2016, pág. 23)

2.7 Clasificación de motor según la IEC

Los motores se distribuyen en categorías térmicas (antes llamadas “categorías de aislamiento”) que gobiernan las temperaturas máximas admitidas en los motores (IEC 60034). Un motor tiene que poder resistir sin sufrir daños una actividad constante a una temperatura elevada basándose en su potencia nominal en la clase térmica para la que fue diseñada. Por ejemplo, con una temperatura de refrigeración máxima de 40° la temperatura máxima admitida en la clase térmica H son 180 (H)³= 125° C. (Guinudinik, 2016, pág. 24)

2.7.1 Categoría en motores IEC

Para el mercado Internacional, el Comité Electrotécnico Internacional (IEC por sus siglas en inglés), establece 3 Categorías de motores, en su estándar IEC 34, estos son:

- **Categoría N:** Par de arranque normal, corriente en el arranque normal, bajo deslizamiento. Aplicación: Cargas normales como bombas,

ventiladores, máquinas.

- **Categoría H:** Par de arranque alto, corriente de arranque normal, bajo deslizamiento. Aplicación: cargas que exigen mayor par de arranque (molinos, cargadores, etc.)

- **Categoría D:** Par de arranque alto, corriente de arranque normal, alto deslizamiento (más 5%).

Aplicaciones: en prensas excéntricas y máquinas similares, donde la carga presenta alta demanda periódica. También son usados en elevadores y en cargas que necesitan un par de arranque muy alto y corriente de arranque limitada. (Motor, 2014, pág. 2)

La figura 2.13 muestra la comparación de las categorías IEC para motores eléctricos.

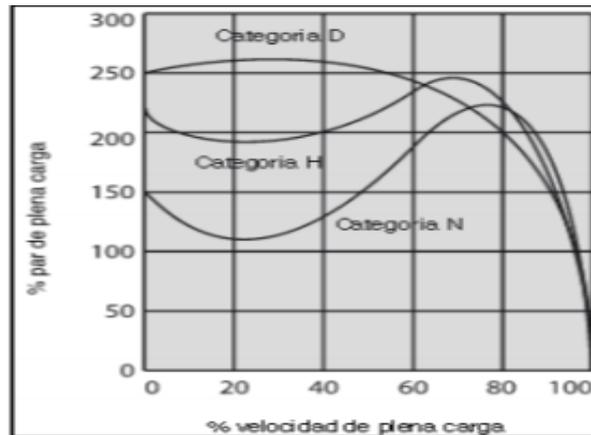


Figura 2. 13 Categorías de motores IEC

Fuente. (Motor, 2014, pág. 2)

2.8 Motor con Ventilación Forzada

Un motor típico bajo condiciones normales el motor puede sobrecalentarse al funcionar seguido, hasta alcanzar 40°C en algunos tipos; mientras que en otros puede alcanzar 50°C. Estas temperaturas son consideradas como normales, operando el motor a plena carga. El sistema de ventilación forzada en los motores de tipo abierto, y la

radiación de la carcasa metálica en los de tipo cerrado, eliminan el exceso de calor y temperatura se mantiene así dentro de los límites fijados. Las variaciones de temperatura ambiente influyen directamente sobre la temperatura de funcionamiento del motor (Guinudinik, 2016, pág. 25).

La altura a la cual será sometido el motor sobre el nivel del mar influye también sobre la temperatura, pero esto se hace sentir más en los motores de tipo abierto que en los de tipo cerrado. Los materiales aislantes modernos y los nuevos métodos de construcción permiten que la temperatura del motor pueda llegar en condiciones normales de funcionamiento hasta 90°C. (Quiñonez, 2010, pág. 40)

En la figura 2.14 se puede un motor con ventilación forzada, este motor es de clasificación H, según IEC o diseño C según la NEMA



Figura 2. 14 Motor clasificación H con ventilación forzada

Fuente. El autor

2.8.1 Unidad de ventilación forzada

La unidad de ventilación forzada se encarga de extraer las pérdidas térmicas durante el funcionamiento del motor principal. Durante el funcionamiento del motor principal el motor de la ventilación forzada debe estar conectado. Después de desconectar el motor principal se ha de

asegurar un avance dependiente de la temperatura de la ventilación forzada.

En los motores con unidades de ventilación forzada dependientes de la dirección de rotación es imprescindible observar la dirección de rotación (ver flecha de dirección de rotación). Sólo se han de utilizar los equipos de ventilación forzada suministrados por el fabricante. La unidad de ventilación forzada se ha de conectar según el plano de bornes suministrado con la caja de conexión. (VEM motors GmbH , 2015, pág. 10).

Véase en la figura 2.15 una unidad de ventilación forzada en un motor de clasificación H.



Figura 2. 15 Unidad de ventilación forzada

Fuente. El autor

2.9 Conexiones eléctricas y Puesta a tierra

Las conexiones eléctricas abarcan la conexión de los cables auxiliares y principales, los cables conectados a tierra y los posibles motores de los ventiladores externos (ABB, 2006, pág. 27). Por tanto, la instalación eléctrica siempre debe planificarse a conciencia antes de llevar a cabo ninguna acción.

Asimismo, antes de la conexión a la red siempre debe controlarse que los Reglamentos de Seguridad sean observados estrictamente y que estén en el debido estado el montaje, ajustes de la máquina, puesta a tierra, dispositivos adicionales conectados correctamente y en estado operativo. En caso de existir un segundo extremo de eje, asegurarse que una eventual chaveta esté asegurada. (VEM motors GmbH , 2015, pág. 6).

En cambio, la puesta a tierra consiste en realizar una conexión eléctrica entre un punto dado de la red, de una instalación o de un material y una toma de tierra. Esta toma de tierra es una parte conductora, que se puede incorporar en el suelo o dentro de un medio conductor, en contacto eléctrico con la Tierra. La puesta a tierra permite así conectar a una toma de tierra, a través de un cable conductor, las masas metálicas que corren el riesgo de entrar en contacto casualmente con la corriente eléctrica debido a un defecto de aislamiento en un dispositivo eléctrico (Chauvin Arnoux, 2015, pág. 2).

No obstante, en un accionamiento por variador de frecuencia, hay que tener en consideración a las disposiciones de puesta a tierra para garantizar los siguientes:

- Una acción apropiada de todos los elementos de protección y relés para la seguridad general.
- Un nivel mínimo de interferencia electromagnética.
- Un nivel admisible o apto de tensión en los rodamientos para evitar corrientes y fallos del rodamiento.

En un accionamiento de convertidor de frecuencia, la velocidad real del motor puede desviarse de forma excesivo de la velocidad establecida. Para el funcionamiento a velocidades superiores, no debe sobrepasarse la velocidad máxima permitida del tipo de motor o la velocidad crítica de todo el equipo. (Chauvin Arnoux, 2015, pág. 2).

Sin embargo, es trascendental comprobar que el voltaje y la frecuencia del suministro coincidan con los valores indicados en la placa de datos de

la máquina o motor eléctrico. Asimismo, el voltaje de la red y la frecuencia deben encontrarse dentro de los límites permitidos, según los estándares establecidos. Siempre es importante observar las indicaciones de las placas de características y el diagrama de conexión de la caja de bornes (Chauvin Arnoux, 2015, pág. 2)..

2.9.1 Terminales de puesta a tierra

La mayoría de los fabricantes de motores eléctrico elaboran dentro de una caja; los terminales de puesta a tierra, dicha caja es parte de la carcasa. Tal como se puede ver en la figura 2.16.

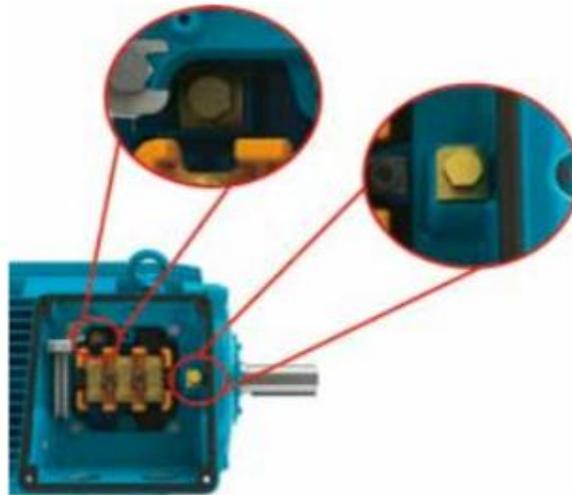


Figura 2. 16 Terminales de puesta a tierra en la caja de conexiones

Fuente. (Catálogo Técnico, 2016, pág. 8)

Existen fabricantes de motores que facilita en la carcasa, adicionalmente; dos terminales de puesta a tierra, ubicados en cada lado de la carcasa para así ecualizar el potencial eléctrico y proveer una seguridad superior para las operaciones. En la figura 2.17.se aprecia un motor con terminales puesta a tierra en la carcasa.



Figura 2. 17 Disposición de los terminales puesta a tierra en la carcasa

Fuente. (Catálogo Técnico, 2016, pág. 8)

Por consiguiente, si la máquina se entrega sin una caja de bornes principal, los cables de conexión del estator deben estar cubiertos por una estructura protectora conectada a tierra antes de la puesta en funcionamiento. La estructura debe tener una clasificación de envolvente y certificaciones de área peligrosas iguales o superiores a los de la máquina. Pues, para evitar algunas averías en los cables, los cables de conexión del estator deben ser acortados para minimizar el movimiento libre de los cables. (ABB, 2006, pág. 46)

2.9.1.1 Cables de alimentación principal

El tamaño de los cables de entrada debe cumplir la normativa local aplicable y tener un tamaño adecuado para admitir la carga máxima de corriente. Los terminales de los cables deben ser del tipo y tamaño adecuados. La conexión a todos los dispositivos debe comprobarse. Las conexiones del cable de alimentación principal deben fijarse correctamente para garantizar un funcionamiento seguro.

2.9.1.2 Conexiones a tierra

El armazón de la máquina, la caja de terminales principales, la caja de terminales auxiliares y el equipo asociado deben estar conectados a toma de tierra protectora. Las conexiones a toma de tierra protectora y la

alimentación eléctrica tienen que proteger el armazón de la máquina del potencial eléctrico (voltaje) dañino o peligroso.

2.9.1.3 Derivaciones a tierra

Los daños en el aislamiento de los motores frecuentemente se producen por los picos transitorios de alta tensión. Las causas son los relámpagos, conmutaciones de red, descargas de condensadores y dispositivos electrónicos de potencia. También pueden causar derivaciones el envejecimiento, las sobrecargas continuas o cíclicas, así como también las vibraciones mecánicas y los cuerpos extraños. La mayoría de los daños en el aislamiento ocasionan derivaciones hacia las partes de la máquina conectadas a tierra. En redes conectadas a tierra las corrientes hacia ella pueden alcanzar valores elevados. Dependiendo del tipo de red y de los requerimientos, las corrientes a tierra han de controlarse, bien utilizando el método “Holmgreen”, o bien por medio de un transformador sumador de corriente. (Rockwell Automation, 1998, pág. 41)

2.9.1.4 Método “Holmgreen”

Para detectar corrientes de derivación en redes críticas con tierra o con conexiones a tierra de baja resistencia, se miden las corrientes en los conductores de las tres fases. En un motor perfecto la suma de dichas corrientes ha de ser cero. Pero si hay circulación de corriente hacia la carcasa del motor y de ahí a tierra, aparece una corriente I_0 en el punto central de la estrella del transformador, la cual es proporcional a la corriente derivada a tierra. Ésta es percibida por el detector de derivaciones y provoca el disparo. Hay un retraso corto que evita disparos erróneos debidos a la saturación transitoria del transformador, la cual puede aparecer en las operaciones de conmutación. Es necesario escoger una sensibilidad, de forma que, ni los errores de saturación del transformador ni las señales de interferencia en la conexión estrella - triángulo producidas por los terceros armónicos superiores, provoquen el disparo. (Rockwell Automation, 1998, pág. 41). Véase la figura 2.18.

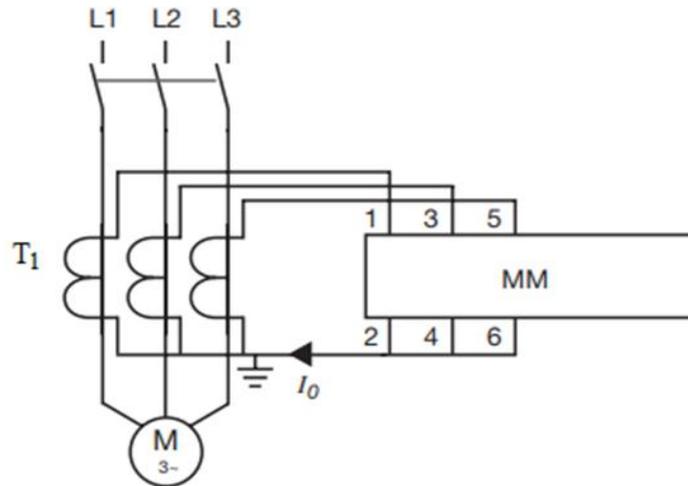


Figura 2. 18 Protección de motores

Fuente. (Rockwell Automation, 1998, pág. 41)

Dónde:

T₁: transformador principal de corriente

MM: protector del motor

I₀: corriente residual (proporcional a la corriente derivada a tierra).

2.10 Cable Apantallado

2.10.1 Cables de alimentación principal

El tamaño de los cables de entrada debe cumplir la normativa local aplicable y tener un tamaño adecuado para admitir la carga máxima de corriente. Asimismo, los terminales de los cables deben ser del tipo y tamaño apropiados. La conexión a todos los dispositivos debe comprobarse y a la vez, las conexiones del cable de alimentación principal deben fijarse correctamente para garantizar un funcionamiento seguro. (ABB, 2006, pág. 47).

Véase el cable apantallado para motor tipo H con ventilación forzada.



Figura 2. 19 Cable apantallado

Fuente. El autor

2.10.2 Cables secundarios para conexiones de anillo deslizante

El alojamiento del anillo deslizante en el LOA de la máquina sirve como caja de terminales para los cables secundarios y posee el mismo grado de protección que la máquina. Los cables se pueden conectar desde cualquier lado. La conexión se realiza a los terminales del rotor en la placa de terminación, que está diseñada para encajar hasta seis talones de cable por fase. Los terminales están marcados con K, L y M, según las publicaciones IEC 60034-8. (ABB, 2006, pág. 48).

2.10.3 Requisitos para máquinas alimentadas por convertidores de frecuencia

De acuerdo con normas de compatibilidad electromagnética (89/336/CEE, modificada por la 93/68/CEE), es necesario que una máquina CA alimentada con convertidor de frecuencia se instale con cables apantallados. (ABB, 2006, pág. 49). En la figura 2.20 se muestra un cable apantallado y motor con conexión a variador de frecuencia.



Figura 2. 20 Cable apantallado y motor conectado a variador

Fuente. El autor

2.10.4 Características del cable apantallado

Se describe características de un cable de conexión en industrias donde las cargas no lineales (motor asíncrono o de inducción trifásica está conectada con variadores de frecuencia) deben utilizar el cable apantallado cumpliendo la normativa del EMC (Compatibilidad electromagnética). Este tipo de cable proporciona seguridad, en caso sobre corrientes puede existir presencia de sobrecalentamiento en ambientes inflamables produciría explosiones e Incendios, ante la descarga eléctrica que puede causar la muerte, lesiones graves o daño de las máquinas (PEMEX, 2014, pág. 7). Véase en la figura 2.21 el cable apantallado.



Figura 2. 21 Cable apantallado TOPFLEX®-EMV-UV 3

Fuente: (Helukabel, 2015, pág. 1)

En conexiones de variadores de frecuencia y el motor de inducción, la pantalla (estructura en forma de malla metálica fina) debe estar conectada en ambos extremos, es decir conectada en la bornera del variador de frecuencia (tierra) con la bornera del motor (tierra). En la tabla 2.3 se muestra características del cable apantallado TOPFLEX®-EMV-UV 3+ y sus correspondientes diámetros del cable, calibre de conductores etc.

Tabla 2. 3 Dimensiones y especificaciones del cable TOPFLEX®-EMV-UV 3

Part no.	No. cores x cross-sec. mm ²	Outer Ø approx. mm	Coupling resistance		Power ratings **) with 3 loaded cores in Amperes	Cop. weight kg / km	Weight approx. kg / km	AWG-No.
			at 1 MHz Ohm/km	at 30 MHz Ohm/km				
22673	3 x 1,5 + 3 G 0,25	9,9			18	86,0	140,0	16
22674	3 x 2,5 + 3 G 0,5	11,3	18	210	26	144,0	220,0	14
22675	3 x 4 + 3 G 0,75	13,0	11	210	34	224,0	323,0	12
22676	3 x 6 + 3 G 1,0	14,9	6	150	44	298,0	420,0	10
22677	3 x 10 + 3 G 1,5	18,4	7	180	61	491,0	615,0	8
22678	3 x 16 + 3 G 2,5	21,5	9	190	82	723,0	819,0	6
22679	3 x 25 + 3 G 4,0	25,3	4	95	108	1138,0	1325,0	4
22680	3 x 35 + 3 G 6,0	27,8	3	85	135	1535,0	1718,0	2
22681	3 x 50 + 3 G 10,0	31,9	2	40	168	2208,0	2399,0	1
22682	3 x 70 + 3 G 10,0	36,8	2	45	207	2871,0	3056,0	2/0
22683	3 x 95 + 3 G 16,0	40,6	1	50	250	3953,0	4162,0	3/0
22684	3 x 120 + 3 G 16,0	45,9			292	4836,0	5075,0	4/0
22685	3 x 150 + 3 G 25,0	51,7			335	5412,0	6128,0	300 kcmil
22686	3 x 185 + 3 G 35,0	53,8			382	6969,0	7189,0	350 kcmil
22687	3 x 240 + 3 G 42,5	61,7				8540,0	9540,0	500 kcmil

Nota: (Helukabel, 2015, pág. 2)

2.11 Motor funcionando con variador de frecuencia

Los motores de inducción con rotor de jaula de ardilla pueden funcionar con red de alimentación trifásica senoidal y con variadores de frecuencia. El comportamiento depende de la fuente de alimentación, si se alimenta directamente con la red tendrá voltaje, frecuencia y velocidad constante (PEMEX, 2014, pág. 8). Cuando se utiliza variador de frecuencia se puede conseguir la variación de la velocidad con pérdidas relativamente bajas. Sin embargo, las corrientes y voltajes del motor ya no son senoidales, por esta razón, cuando se selecciona un motor para funcionar con variador de velocidad se debe tomar en cuenta las siguientes condiciones.



Figura 2. 22 Motor funcionando con variador de frecuencia

Fuente. El autor

2.11.1. Comportamiento del motor

El variador de frecuencia modifica el voltaje y la frecuencia para obtener la variación de la velocidad del motor, ya que así también se varía la velocidad del campo magnético en el estator. El par que puede otorgar el motor se describe con la siguiente ecuación.

$$\tau = k * \phi_m * I_q$$

Si se desprecia la caída de tensión causada por la resistencia del cobre y por la reactancia de dispersión, se puede escribir de forma simplificada la fórmula del flujo magnético como se muestra a continuación.

$$\phi_m = k * V/f$$

Como puede observarse en las fórmulas anteriores, al variar en la misma proporción el voltaje y la frecuencia puede obtenerse un flujo magnético constante. Si el flujo magnético y la corriente permanecen constantes, como es el caso en casi todos los sistemas de accionamiento, se puede tener un par motor constante a cualquier velocidad. Cuando se utiliza el método de variación de velocidad por voltaje y frecuencia existen dos áreas de funcionamiento a la que se ve sometida el motor y su funcionamiento se describe como:

- Área de campo constante: surge cuando se trabaja desde frecuencia y voltaje cero hasta el punto nominal (voltaje, frecuencia, y velocidad nominal). El variador realiza la regulación de velocidad manteniendo la relación de voltaje y frecuencia constante. Cuando el motor trabaja a velocidades bajas, el variador aumenta esta relación, ya que las pérdidas en el cobre son más significativas a voltajes y frecuencias de nivel bajo. (PEMEX, 2014, pág. 10)

- Área de debilitamiento de campo: surge porque solamente se puede variar el voltaje hasta el voltaje de alimentación que impone la red, es posible seguir cambiando la velocidad del motor variando solamente la frecuencia, pero el momento de torsión disminuye debido a que el flujo magnético también lo hace, en estas condiciones no se puede conseguir una relación de voltaje frecuencia constante. Cuando se utiliza variador de frecuencia se puede hacer girar el motor a velocidades mayores de la que se muestra en su placa de característica, pero cuando se sobrepasa el punto nominal, el momento de torsión que puede entregar el motor decae. Se recomienda consultar con el fabricante si se desea sobrepasar el punto nominal. (PEMEX, 2014, pág. 10)

2.11.2. Característica del límite de torque

La curva par velocidad de los motores y las cargas mecánicas son muy importantes para el diseño de ingeniería en sistemas de accionamiento. Para un motor alimentado por la red, la característica par velocidad es muy importante y al operar con variador la característica de límite de torque toma gran importancia. Si se respeta el límite de torque en funcionamiento continuo, el motor no sobrepasará la temperatura especificada en la clase térmica de su aislante. (PEMEX, 2014, pág. 11)

En la figura 2.23 muestra la característica del límite de torque, se describen los distintos puntos de operación del motor tomando en cuenta una curva característica de motor con ventilación forzada y una característica de un motor autoventilado.

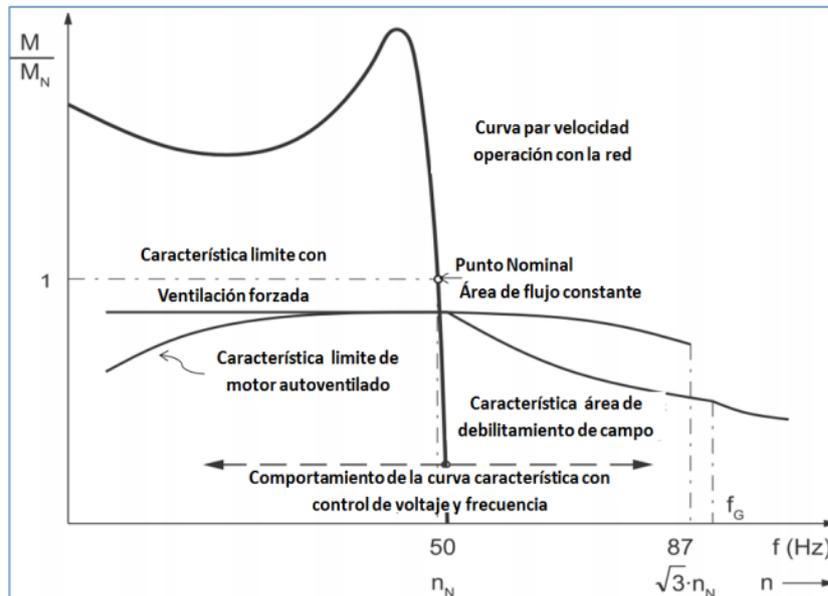


Figura 2. 23 Característica del límite de torque de motor conectado con variador de frecuencia

Fuente: (ABC of Motors- SIEMENS, 2009, pág. 8)

Como se observa, el motor autoventilado disminuye la cantidad de par que puede entregar en bajas velocidades, esto se debe a que, al disminuir la velocidad, disminuye la cantidad de flujo de aire que utiliza para enfriarse y cuando se utiliza un motor con ventilación forzada, no se castiga el par motor, ya que la refrigeración del motor no depende de la velocidad en su eje. (PEMEX, 2014, pág. 12)

2.11.3 Variador de Velocidad

En la operación de accionamientos eléctricos a base de motores eléctricos en la mayoría de las aplicaciones industriales y donde el aspecto del control de proceso, más el criterio de ahorro de la energía es de vital importancia se emplea los denominados; variadores de velocidad. Entre otras razones porque la variación de la velocidad está en función de la variación de la tensión de alimentación. (PEMEX, 2014, pág. 12)

2.11.4 Variadores eléctrico-electrónicos

Existen cuatro categorías de variadores de velocidad eléctrico-electrónicos, los cuales son:

- Variadores para motores de CC.
- Variadores de velocidad por corrientes de Eddy.
- Variadores de deslizamiento.
- Variadores para motores de CA (también conocidos como variadores de frecuencia). (PEMEX, 2014, pág. 12)

2.11.5 Variadores para motores de CC

Estos variadores permiten controlar la velocidad de motores de corriente continua serie, derivación, compuesto y de imanes permanentes. Para el caso de cualquiera de las máquinas anteriores se cumple la siguiente expresión:

$$V_t = K.FM.Nm \quad (\text{ec } 1)$$

Dónde:

V_t es el Voltaje terminal (V).

K es la constante de la máquina.

FM Flujo magnético producido por el campo (Wb)

Nm Velocidad mecánica (rpm).

Despejando la velocidad mecánica, se obtiene

$$Nm = \frac{V_t}{K.FM} \quad (\text{ec.2.2})$$

Entonces, de la ecuación 2.2 se aprecia que la velocidad mecánica de un motor de CC es directamente proporcional al voltaje terminal (V_t) e inversamente proporcional al flujo magnético (FM), el cual a su vez depende de la corriente de campo (IF). Aprovechando esta situación es que este tipo de variadores puede controlar la velocidad de un motor de CC: controlando su voltaje terminal, o bien, manipulando el valor de la corriente de campo (IF). De esta manera, este tipo de variador puede controlar la velocidad de un motor de CC: controlando su voltaje terminal,

o bien, manipulando el valor de la corriente de campo. (Carrasco, 2011, pág. 30).

2.11.6 Variadores por corrientes de Eddy

Un variador de velocidad por corrientes de Eddy consta de un motor de velocidad fija y un embrague de corrientes de Eddy. El embrague contiene un rotor de velocidad fija (acoplado al motor) y un rotor de velocidad variable, separados por un pequeño entrehierro. Se cuenta, además, con una bobina de campo, cuya corriente puede ser regulada, la cual produce un campo magnético que determinará el par mecánico transmitido del rotor de entrada al rotor de salida. De esta forma, a mayor intensidad de campo magnético, mayor par y velocidad transmitidos, y a menor campo magnético menores serán el par y la velocidad en el rotor de salida. (Carrasco, 2011, pág. 30)

El control de la velocidad de salida de este tipo de variadores generalmente se realiza por medio de lazo cerrado, utilizando como elemento de retroalimentación un tacómetro de CA.

2.11.7 Variadores de deslizamiento

Este tipo de variadores se aplica únicamente para los motores de inducción de rotor devanado. En cualquier inducción, la velocidad mecánica (Nm) puede determinarse mediante la siguiente expresión:

$$Nm = \frac{120 \cdot f \cdot (1-s)}{P} \quad (\text{ec. 2.3})$$

Donde s es el deslizamiento del motor, cuyo valor oscila entre 0 y 1. De esta forma, a mayor deslizamiento, menor velocidad mecánica del motor. El deslizamiento puede incrementarse al aumentar la resistencia del devanado del rotor, o bien, al reducir el voltaje en el devanado del rotor. De esta forma es que puede conseguirse el control de la velocidad en los motores de inducción de rotor devanado. Sin embargo, este tipo de variadores es de menor eficiencia que otros, razón por la cual en la actualidad tiene muy poca aplicación (Carrasco, 2011, pág. 31).



Figura 2. 24 Variador de velocidad Sinamics G110

Fuente: (SIEMENS, 2010)

Los variadores eléctrico-electrónicos incluyen tanto el controlador como el motor eléctrico, sin embargo, es práctica común emplear el término variador únicamente al controlador eléctrico. Los primeros variadores de esta categoría emplearon la tecnología de los tubos de vacío. Con los años después se han ido incorporando dispositivos de estado sólido, lo cual ha reducido significativamente el volumen y costo, mejorando la eficiencia y confiabilidad de los dispositivos. (Carrasco, 2011, pág. 32).

2.11.8 Los variadores de frecuencia

Estos equipos permiten, paralelamente controlar la tensión, lo cual ha logrado cambiar radicalmente esta limitación. Como se ha indicado un variador de velocidad permite el control de la velocidad de un motor eléctrico, y la alimentación suministrada al mismo, este es el método más eficiente de controlar la velocidad.

Los variadores de frecuencia están compuestos por:

Etapas Rectificadora. Convierte la tensión alterna en continua mediante rectificadores de diodos, tiristores, etc.

Etapas intermedia. Filtro para suavizar la tensión rectificada y reducir la emisión de armónicos y mejorar el factor de potencia.

Inversor o "Inverter". Convierte la tensión continua en otra de tensión y frecuencia variable mediante la generación de pulsos. Actualmente se emplean IGBT's (IsolatedGate Bipolar Transistors) para generar los

pulsos controlados de tensión. Los equipos más modernos utilizan IGBT's inteligentes que incorporan un microprocesador con todas las protecciones por sobrecorriente, sobretensión, baja tensión, cortocircuitos, puesta a masa del motor, sobre temperaturas, etc. (Carrasco, 2011, pág. 34)

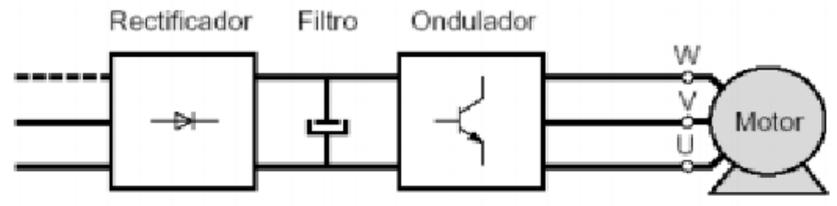


Figura 2. 25 Etapas de un variador de frecuencia

Fuente: (Carrasco, 2011, pág. 34)

Etapa de control. Esta etapa controla los IGBT para generar los pulsos variables de tensión y frecuencia. Y además controla los parámetros externos en general, etc. En la figura 2.26 se puede observar las etapas de un variador de frecuencia.

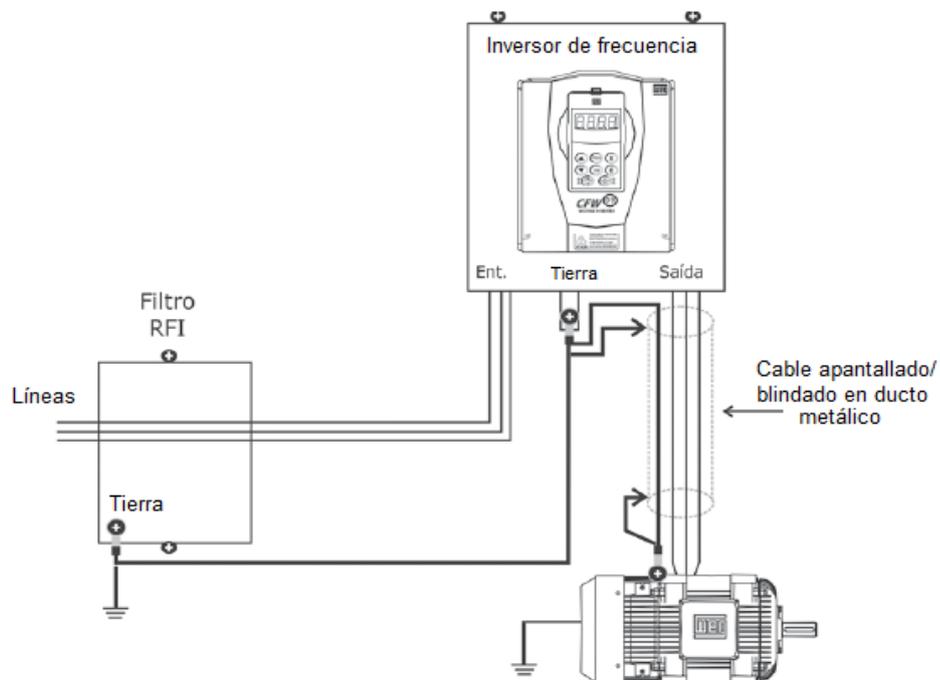


Figura 2. 26 Conexión típica de motor y un variador de frecuencia

Fuente: El autor a partir de WEG, 2009, pág. 29

Mediante la velocidad variable se ofrecen prestaciones y diversidad de funciones que se requieren para resolver las aplicaciones industriales complejas como el control automático.

Se debe señalar que un sistema de control es un conjunto de sistemas o dispositivos electrónicos encargados de administrar, ordenar, dirigir o regular el comportamiento de otro sistema, con el fin de reducir las probabilidades de fallo y obtener los resultados deseados. Por lo general se usan sistemas de control industrial en procesos de producción industriales para controlar equipos o máquinas. (WEG, 2009, pág. 29)

Mientras lograr velocidad variable, implica que la velocidad a lo largo de una trayectoria cambia en función de una variable (La variable puede ser el tiempo, frenadas) que modifica la velocidad.

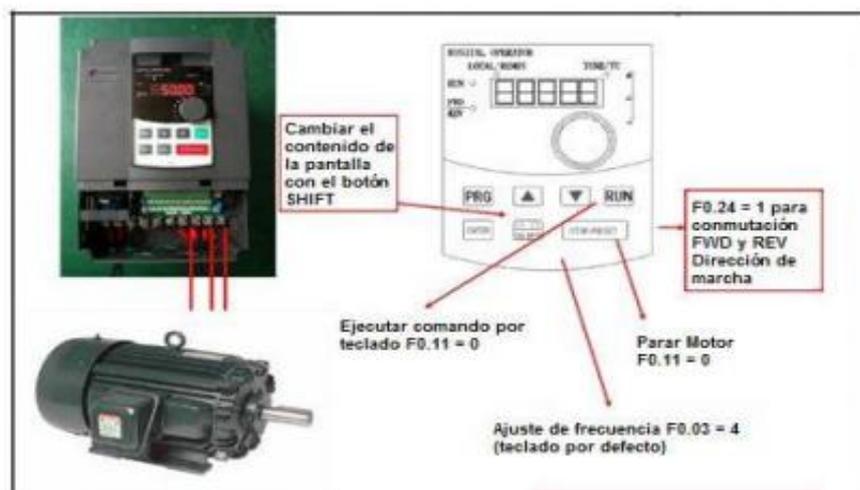


Figura 2. 27 Motor de inducción y un variador de frecuencia

Fuente: (Navarro, 2017, pág. 28)

2.12 Fallas frecuentes en motores eléctricos

Se define falla eléctrica como cualquier evento que impide la normal operación de algún equipo, esquema o componente de control y protección. Esta definición permite el registro de eventos, aun cuando el equipo afectado no se encuentre plenamente inoperativo, situación muy frecuente en el campo del control y protección de Sistemas Eléctricos. Por

otra parte, se define Atención Correctiva como 'un procedimiento preestablecido y destinado a retornar a su estado normal de operación al objeto afectado por la falla'. (Instituto de energía y termodinámica - UPB, 2015, pág. 25)

Sin embargo, existen varios enfoques para analizar y evaluar el impacto de las fallas sobre los equipos del sistema eléctrico de las Industrias; en general basadas en la evaluación de la potencia o energía pérdida con ocasión de cada falla.

Igualmente, las fallas en un motor eléctrico pueden ser originadas por:

- Fallas en los sistemas de protección y control
- Fallas ocasionadas en la operación
- Fallas causadas por la falta de calidad de la potencia. (Navarro, 2017, pág. 28), los cuales se detallan a continuación:

2.12.1 Fallas en los sistemas de protección y control:

Si bien existen fallas relacionadas con la operación de los equipos y la no calidad de la energía, es el sistema de protección y control quien finalmente realiza una acción determinada. La esencia de los trabajos del área responsable del sistema de protección y control, hacen que el enfoque relacionado con la pérdida de potencia no sea adecuado por cuanto muchas de las fallas que afectan a tales equipos no llegan a producir interrupción. (Instituto de energía y termodinámica - UPB, 2015, pág. 27)

2.12.2 Fallas originadas en la operación:

A este enfoque pertenecen las fallas asociadas a los incrementos de temperatura en equipos, y problemas de vibración mecánica. En el primer caso, la sobrecarga de los motores y conductores son consecuentes a la circulación de corrientes elevadas que originan. Al mismo tiempo, las pérdidas de energía, ineficiencias en los procesos, costos extras en la operación y mantenimiento, calentamiento excesivo de las partes, e

incluso, hasta la misma destrucción del equipo si los sistemas de control y protección no son los adecuados.

No obstante, la calidad de la energía se ve gravemente afectada, puesto que las sobrecorrientes originan caídas de tensión considerables.

Para compensar las fallas eléctricas por incrementos de temperatura, es necesario realizar, entre otros, una limpieza periódica de las partes del motor y los conductores, chequeos a los sistemas de protección y pruebas termográficas en barrajes, conductores, carcasas, puntos de conexión y aislamientos térmicos. (Instituto de energía y termodinámica - UPB, 2015, pág. 27)

Con respecto a las vibraciones mecánicas, son el resultado de fuerzas magnéticas desiguales que actúan sobre el rotor o sobre el estator. Dichas fuerzas desiguales pueden ser causadas:

- Rotor que no es redondo.
- Chumaceras del inducido que son excéntricas.
- Falta de alineamiento entre el rotor y el estator.
- Entrehierro no uniforme.
- Perforación elíptica del estator.
- Devanados abiertos o en corto circuito.
- Hierro del rotor en corto circuito.

Las vibraciones ocasionadas por los problemas eléctricos responden generalmente, a la cantidad de carga situada en el motor. A medida que se modifica la carga, la amplitud y/o las lecturas de fase pueden indicar cambios significativos. Esto explica por qué los motores eléctricos que han sido probados y balanceados en condiciones sin carga muestran cambios drásticos de los niveles de vibración cuando vuelven a ser puestos en servicio.

Un caso particular de vibraciones mecánicas lo constituyen las poleas desgastadas y bandas destempladas en accionamientos mecánicos, cuyo

efecto en motores es la presencia de desbalances de corriente que, a su vez, originan desbalances de tensión (pérdida de la calidad de la potencia). (Instituto de energía y termodinámica - UPB, 2015, pág. 28)

2.12.3 Fallas por la calidad de la energía

Los problemas relacionados con la calidad de la energía están muy vinculados a una amplia gama de fenómenos. Aproximadamente en dos tercios de los casos se trata de fenómenos naturales, como los rayos.

Otras causas de la pérdida de la calidad de energía la constituyen la operación de equipos de gran potencia en la industria o en la red misma (por ejemplo, la conexión de condensadores) y, en general, una variedad de fenómenos que pueden llegar a producir caídas súbitas de tensión a nivel del consumidor y que hacen muy compleja la evaluación de la calidad de potencia. (Instituto de energía y termodinámica - UPB, 2015, pág. 30)

En la figura 2.28 se puede ver la forma de onda con las principales perturbaciones que infringen contra la calidad de la potencia eléctrica.

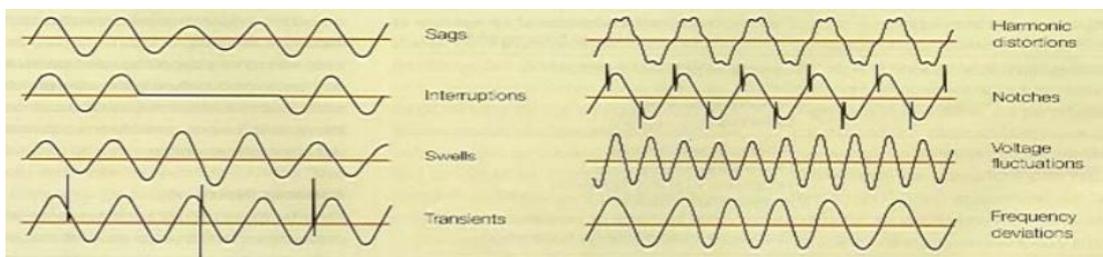


Figura 2. 28 Perturbaciones frecuentes que afectan la calidad de la potencia eléctrica

Fuente. (Instituto de energía y termodinámica - UPB, 2015) & (Meléndez, Herraiz, & Colomer, 2005, pág. 30)

Según el (Instituto de energía y termodinámica-UPB, 2015), las perturbaciones que normalmente afectan la calidad de la potencia se clasifican en las siguientes categorías:

- Fluctuaciones de voltaje.
- Variaciones temporales de alto y bajo voltaje.
- Interrupción continuo en equipos y/o en procesos.

- Armónicos.
- Transitorios.

A continuación, se describen detalladamente todo lo que respecta a los armónicos.

2.12.3.1 Armónicos

Los armónicos en corriente y tensión se originan a la entrada de alimentación de los variadores de frecuencia cuando se conectan cargas no lineales a una red eléctrica como en el caso de utilizar variadores de velocidad en la alimentación y control de motores de inducción. (Mejía López, 2015, pág. 6)

Igualmente, la norma IEEE 519-1992, describe un armónico como “una componente sinusoidal de una onda periódica que tiene una frecuencia múltiplo de la frecuencia fundamental”. Pues, inicialmente las armónicas se generaban únicamente en los procesos industriales; pero en el presente, se encuentran en casi todo sistema de distribución eléctrico. (Peralta Núñez, 2009, pág. 68)

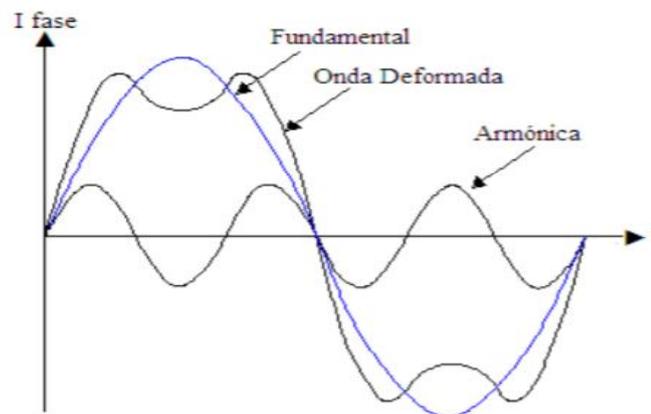


Figura 2. 29 Onda deformada

Fuente. (Peralta Núñez, 2009, pág. 69)

Del mismo modo, los armónicos se definen normalmente con los dos datos esenciales que les caracterizan, los cuales son:

- **Amplitud:** este hace referencia al valor de la tensión o intensidad del armónico.

- **Orden:** hace referencia al valor de su frecuencia referido a la fundamental. Así, un armónico de orden 3 tiene una frecuencia 3 veces superior a la fundamental. (Peralta Núñez, 2009, págs. 69-70)

No obstante, si la amplitud de las armónicas está dada en relación a un porcentaje de la fundamental, la amplitud de la componente individual se calcula en tensión o corriente, determinando primeramente el valor de la fundamental:

$$V_1 = \frac{V_{rms}}{\sqrt{(1+THD^2)}}$$

Donde *THD* es un porcentaje que indica el valor de la distorsión armónica total, es decir, cuantifica la distorsión armónica, que puede existir en una red de suministro eléctrico y se calcula, en el caso de tensiones armónicas y en donde V_n representa la magnitud de dichas tensiones, de la siguiente manera:

$$THD = \frac{\sqrt{(V_2^2 + V_3^2 + V_4^2 + \dots + V_n^2)}}{V_1} = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} V_n^2}}{V_1}$$

Análogamente, para las corrientes armónicas:

$$THD = \frac{\sqrt{(I_2^2 + I_3^2 + I_4^2 + \dots + I_n^2)}}{I_1} = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} I_n^2}}{I_1}$$

El orden del armónico, referido como el rango del armónico, es la razón entre la frecuencia de un armónico f_n y la frecuencia de la fundamental f_1 .

$$n = \frac{f_n}{f_1}$$

Por lo tanto, la cantidad de armónicos se manifiesta normalmente en términos de su valor *rms*, dado que el efecto calorífico depende de este valor de la onda distorsionada. De la misma manera, se puede decir que

hay dos tipos de armónicos en los sistemas eléctricos, los cuales se describen a continuación:

a. Los armónicos característicos, que se producen habitualmente por los convertidores electrónicos de potencia, que dejan pasar una corriente que no es sinusoidal, aunque la tensión permanezca sinusoidal.

b. Los armónicos aleatorios, que se forman por fenómenos no lineales, donde la relación V-I es variable. Así, la corriente que fluye por la carga no es proporcional a la tensión, teniendo por resultado que, al aplicarse una onda sinusoidal de una sola frecuencia, la corriente resultante no es de una sola frecuencia. (Peralta Núñez, 2009, pág. 71)

Normalmente, los armónicos son originados por cargas no lineales, lo cual significa que su impedancia no es constante (está en función de la tensión). Estas cargas no lineales a pesar de ser alimentadas con una tensión sinusoidal, adsorben una intensidad no sinusoidal. De la misma manera, los armónicos pueden crear diferentes problemas, ya que su efecto principal consiste en la aparición de voltajes no sinusoidales en diferentes puntos del sistema, los cuales son producidos por la circulación de corrientes distorsionadas a través de las líneas. La circulación de estas corrientes produce caídas de voltaje deformadas que hacen que a los nodos del sistema no lleguen voltajes puramente sinusoidales. (Peralta Núñez, 2009, pág. 71)

En forma general, los armónicos son responsables del calentamiento de toda clase de aparatos eléctricos, ya que los armónicos de corriente aumentan las corrientes de Eddy, las fugas de corriente a través del aislamiento y el efecto piel en los conductores. Las corrientes de Eddy son corrientes que “circulan en los motores y aumentan con la frecuencia, los cuales se puede comprobar que las pérdidas por efecto *Joule* aumentan en el estator y en el rotor, al igual que con las pérdidas en el hierro que también aumentan”. Este aumento es de un 5% a un 10%, en la mayoría de los casos. También, los armónicos introducen en motores de inducción trifásicos diferencias considerables en velocidad entre el

campo rotatorio inducido por los armónicos y el rotor, lo que genera pérdidas adicionales en el estator (cobre y hierro) y principalmente en el rotor (devanado de amortiguamiento y circuito magnético). (Peralta Núñez, 2009, pág. 73)

Por último, se puede mencionar que la operación irregular que proporciona al motor un sistema con armónicos repercute de forma considerable en el rendimiento del mismo, dado que aumenta las pérdidas, tanto eléctricas como mecánicas durante el proceso de conversión de energía eléctrica a energía mecánica. (Peralta Núñez, 2009, pág. 74)

2.13 Variador AFE (*Active Front End*)

El control regenerativo, llamado también control AFE (*Active Front End* o *Frente Activo*), es aplicado en motores asíncronos regenerativos; es decir, cuando el motor se comporta como generador. Asimismo, en el método de control AFE, el variador llega a ser un alimentador que absorbe corriente perfectamente sinusoidal en la red con factor de potencia unitario. (Mamani Conto, 2011, pág. 12)

En la figura 2.30 se puede apreciar una instalación de un arrancador con variador estándar.



Figura 2. 30 Instalación de un arrancador con variador en un centro de control de motores Fuente. (Mamani Conto, 2011, pág. 30)

La figura 2.31 muestra la solución de variador de frecuencia estándar, protección total.

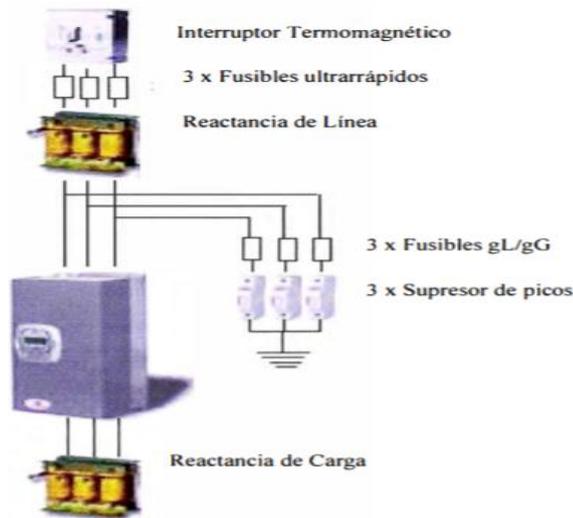


Figura 2. 31 Arrancador de frecuencia - Protección total

Fuente. (Mamani Conto, 2011, pág. 30)

En la figura 2.32, se aplica la solución protección total e incluye 7 niveles de protección, los cuales son detalladas a continuación:

- Primer nivel de protección, interruptor termomagnético.
- Segundo nivel de protección, fusibles ultrarrápidos, en el evento de cortocircuito evitará daño al personal y protegerá al variador.
- Tercer nivel de protección (véase fig. 2.32), muestra los supresores de sobrepicos interno al variador, protege al variador de frecuencia en el evento de sobretensión (entre fase y fase). (Mamani Conto, 2011, pág. 30)

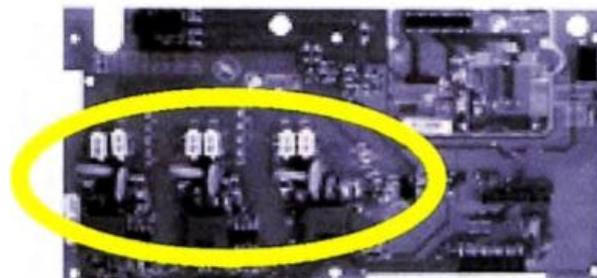


Figura 2. 32 Supresores de sobrepicos interna

Fuente. (Mamani Conto, 2011, pág. 31)

- Cuarto nivel de protección, reactor de línea protege la etapa rectificadora del rizado de corriente a la entrada del variador, reduce los componentes armónicos y sirve de amortiguador contra sobretensiones.



Figura 2. 33 Tarjetas electrónicas

Fuente. (Mamani Conto, 2011, pág. 31)

- Quinto nivel de protección, (véase la fig. 2.33) con tarjetas electrónicas 'doble tropicalizado' de (aplicación de barniz especial en tarjetas). Evita la producción de arcos internos cuando el oxígeno pierde su capacidad dieléctrica a más de 4000 metros sobre el nivel del mar (msnm).

- Sexto nivel de protección, supresores de picos o de sobretensión externos, protege al variador en el evento de sobretensión (entre fase y tierra).

- Séptimo nivel de protección, reactor de carga a la salida del variador: protege al motor cuando la distancia del cable entre el motor y el variador es mayor a 50 metros. (Mamani Conto, 2011, pág. 31)

En la figura 2.34, se puede ver el tablero de un arrancador de motor con variador de frecuencia estándar, y con protección total.



Figura 2. 34 Tablero de arrancador de motor con variador de velocidad: Protección total

Fuente. (Mamani Conto, 2011, pág. 32)

2.13.1 Arranque de un motor con AFE

Los variadores de frecuencia de frente activo (AFE), tienen la capacidad de recuperar energía generada por el motor y regresar esta energía al sistema de potencia. Asimismo, es un variador en configuración de seis pulsos o estándar, pero a diferencia de los variadores de frecuencia estándar, su puente rectificador no está compuesto por diodos o electrónica de potencia sencilla, sino por IGBTs (igual que en el puente inversor). De esa forma, posee una característica particular en el que el control del equipo determina de manera activa, la distorsión armónica y así adelanta o atrasa los disparos en el puente rectificador para producir una onda igual a la distorsión, pero inversa. El resultado final es la anulación casi total de los armónicos. (Mamani Conto, 2011, pág. 32)

No obstante, dentro de la solución regenerativo recomendado se requiere de los siguientes elementos:

- Filtro activo: Es fundamentalmente un equipo externo. La impedancia de línea se toma como referencia que debe ser puramente inductiva. La impedancia de carga toma diferentes valores dependiendo de las condiciones de operación.

- Filtros pasivos sintonizados o no sintonizados: Son equipos externos que tienen como objetivo filtrar una o dos frecuencias. El filtro pasivo se introduce en el diseño con la finalidad de reducir el corte del voltaje de nodo debido a la corriente de conmutación de la ondulación que fluye a través de la impedancia de línea. Los condensadores del filtro pasivo son también utilizados para ampliar la capacidad de reactiva de compensación de energía del AFE.

En la fig. 2.35 se puede apreciar la solución de arrancador de frecuencia regenerativo AFE, el cual está conformado por un variador con solución regenerativa y un variador estándar, ambos se encuentra unidos a través del Bus DC; también a la entrada se ve la instalación de un filtro. (Mamani Conto, 2011, págs. 32-33)

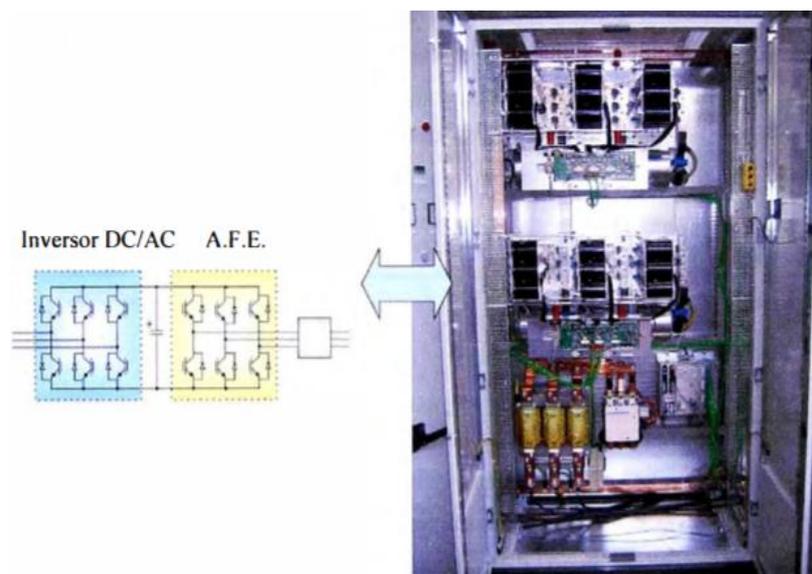


Figura 2. 35 Arrancador con variador de velocidad regenerativo AFE.

Fuente. (Mamani Conto, 2011, pág. 33)

2.13.2 Procedimiento AFE entre dos variadores convencionales

Está basado en dos variadores de frecuencia estándar, en el cual a uno de ellos se le debe activar la funcionalidad RGN (regeneración) y de esa manera, se podrá conseguir una arquitectura regenerativa, tal como se puede observar en la figura. 2.36.

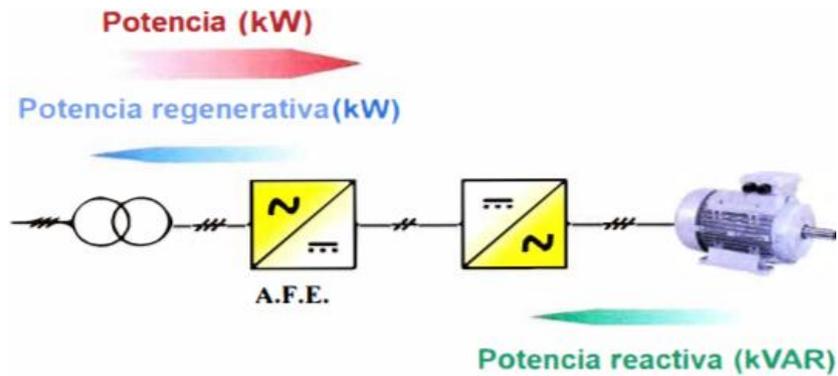


Figura 2. 36 Arquitectura regenerativa con dos variadores de velocidad

Fuente. (Mamani Conto, 2011, pág. 33)

A este tipo de solución AFE entre dos variadores estándar, se le instala un equipo auxiliar para sincronización con la fuente de alimentación. En esta configuración, el variador llega a ser un alimentador que introduce corriente perfectamente sinusoidal en la red, con factor de potencia unitario; se le llama alimentador regenerativo porque el flujo de potencia es bidireccional. El AFE se ubica en el lado de la alimentación del variador de frecuencia estándar, que consiste en un segundo variador de frecuencia, el cual es cargado con anticipación con un *firmware* de control regenerativo para desarrollar la función de AFE. También se le instala un equipo auxiliar para sincronización con la fuente de alimentación. (Mamani Conto, 2011, pág. 34)

A continuación, se muestra en la figura 2.37 el diagrama típico de la solución AFE.

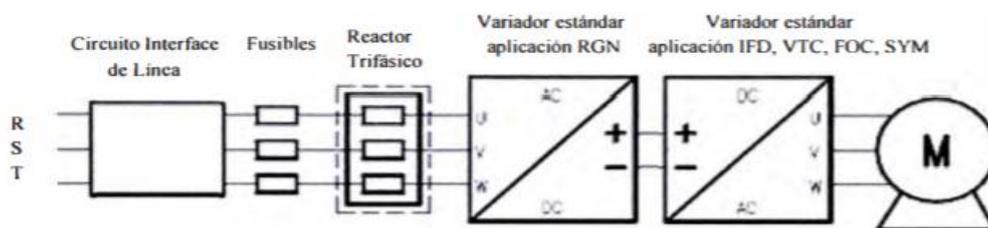


Figura 2. 37 Diagrama típico de la solución AFE

Fuente. (Mamani Conto, 2011, pág. 34)

Po consiguiente, se utilizan inductancias entre el AFE y la entrada de alimentación para filtrar el voltaje PWM, entregado por el inversor y así permitir el intercambio de corriente con la fuente de alimentación.

2.13.2.1 Beneficios de la solución AFE

Algunos beneficios de la AFE se detallan a continuación:

- **Ahorro de energía** Entre las ventajas de utilizar una solución AFE es su funcionalidad regenerativa con cargas de alta inercia. Esta solución permite recuperar la energía cinética de la carga conectada y convertirla en energía eléctrica que puede ser devuelta hacia la fuente de alimentación. El ahorro de energía puede ser obtenido con la regeneración ya que el exceso de energía reduce el consumo de potencia total, menores costos de operación y la posibilidad de reciclar la energía en exceso en lugar de ser disipada como calor cuando se utilizan resistencias de frenado convencionales. (Mamani Conto, 2011, pág. 34)
- **Reduce al mínimo la distorsión armónica** La solución AFE produce un nivel de armónicos extremadamente bajo, independientemente de las condiciones de operación de la carga, debido a una tensión de Bus DC sintonizada. El espectro de potencia de la fuente de alimentación y la energía regenerada tiene una forma sinusoidal que permite reducir los costos de operación e incrementar la eficiencia del variador ya que toda la potencia se puede concentrar en la frecuencia de operación fundamental y no ser desperdiciada en las frecuencias de rebote o armónicos. El uso de la solución AFE elimina la necesidad de costosos y complicados equipos de eliminación activa de armónicos, lo cuales producen calor excesivo durante su operación normal. Esto hace que la solución AFE sea perfecta para usuarios con espacio de instalación limitado y reduce el costo total de instalación. (Mamani Conto, 2011, págs. 34-35)

En la figura 2.38 se muestra la instalación de dos variadores de frecuencia, solución regenerativa.

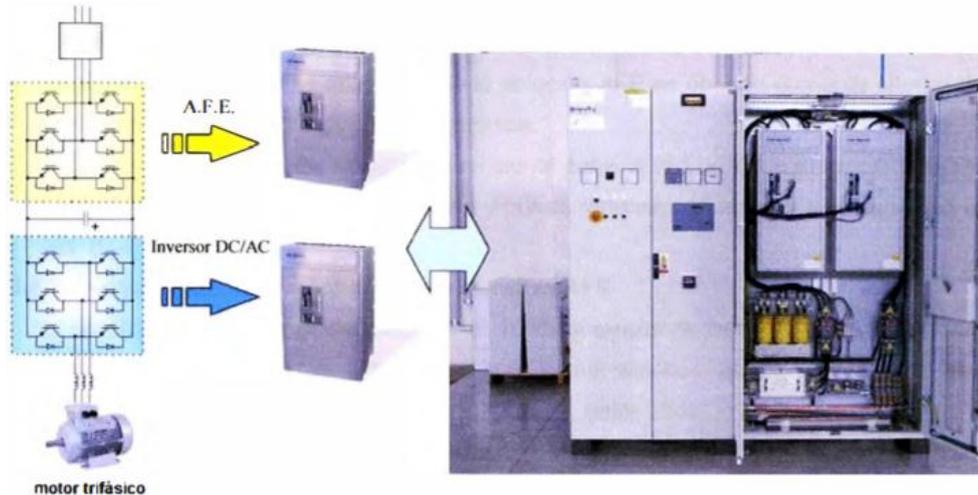


Figura 2. 38 Variadores de frecuencia, solución regenerativa.

Fuente. (Mamani Conto, 2011, pág. 35)

La solución de variador de frecuencia regenerativo AFE, suministra una corriente de muy baja distorsión armónica (el THD es reducida a 3%, cuando normalmente el THD es de 25-30% en caso de un arrancador con variador de frecuencia estándar) (Mamani Conto, 2011, pág. 41).

- Incrementa el desempeño del frenado dinámico sin resistencias. La solución AFE tiene la habilidad de proporcionar niveles extremadamente altos de frenado dinámico más allá del 150% de torque de frenado. Esto es mucho más de lo que puede ser alcanzado cuando se utilizan resistencias de frenado estándar con variadores. La ventaja de utilizar la Solución AFE es que no se requiere espacio adicional para alojar a las resistencias de frenado y tampoco se requiere ventilación adicional para controlar el exceso de vatios perdidos durante su operación (Mamani Conto, 2011, pág. 41).

- Otros beneficios del AFE. La utilización de la solución AFE tiene muchos otros beneficios que atienden un amplio rango de aplicaciones. Estas incluyen:

- Factor de potencia unitario.
- Habilidad de utilizar el 100% de capacidad de los generadores de respaldo, sin ajuste de potencia, gracias a la eliminación de corrientes de línea armónicas.

- Adecuado para uso en áreas que muestran amplia fluctuación del voltaje de línea.
- Alto desempeño entre la operación de motorización y regeneración.
- Ahorro de energía, recuperando la energía cinética durante el periodo de detención del motor.
- Simplicidad, alta disponibilidad y bajos costos.
- El AFE no realiza intercambio de potencia reactiva con la línea, pero si realiza el cambio de energía activa, debido a que la corriente alterna, se encuentra en fase con la tensión. Por tanto, la carga se comporta como si fuese una carga puramente resistiva. Como resultado de la aplicación de la solución AFE se obtiene corriente alterna de forma sinusoidal, libre de distorsión armónica.
- Se realiza intercambio de energía bidireccional entre la red de CA u el Bus DC, la solución AFE, es perfectamente reversible y puede recuperar la energía y entregarlo a la red. (Mamani Conto, 2011, pág. 41)

2.13.3 Aplicaciones de la solución regenerativa AFE

El sistema AFE es capaz de absorber al 100% el torque de frenado, haciéndolo ideal para controlar cargas de muy alta inercia, tales como: winches, grúas, ventiladores, elevadores, centrifugas, fajas transportadoras, molinos, entre otros. Asimismo, el sistema AFE es apropiado para cualquier aplicación que requiera la habilidad de tener altos niveles de torque de frenado o donde se proporcione un ahorro de costos, por regenerar energía de vuelta hacia la fuente de alimentación. (Mamani Conto, 2011, pág. 42)

2.13.4 Solución regenerativa AFE y variadores de frecuencia multimotor

Según los autores (Hernández, Moran, Espinoza, & Dixon, 2001, pág. 22), la solución variador-multimotor, tiene aplicaciones en: industria papelera, industria textil, máquinas impresoras, entre otras cosas más., porque este tipo de aplicación requiere una performance dinámica alta de los

variadores de frecuencia; así como también se debe de mantener una relación de velocidad constante entre los motores instalados. Por lo tanto, se ha desarrollado técnicas avanzadas de control, para estos tipos de variadores y tiene como objetivo principal, la salida de la señal de los variadores de frecuencia. No obstante, el tipo de solución ha tenido cambios paulatinos y como consecuencia los diodos de la parte rectificadora se han reemplazado por IGBTs que realizan PWM, variadores de frente activo (AFE).

El sistema de multi motor simple, está compuesto de arrancadores con variador de frecuencia regenerativo AFE individual. El AFE tiene una salida estabilizada de tensión DC, que se utiliza para alimentar uno o más variadores de frecuencia, mediante una conexión directa. Esto elimina la necesidad del costo de cable a conectar los variadores de frecuencia individualmente y proporciona un sistema completamente regenerativo para todos los variadores de la red.

En definitiva, la solución regenerativa AFE, es una solución de alto costo en comparación con la solución estándar. Por tanto, el resultado facilita una calidad muy buena de energía, el cual permite un incremento en la aplicación de la solución (Mamani Conto, 2011, pág. 36).

En la figura 2.39 se aprecia la configuración básica de solución multi motor.

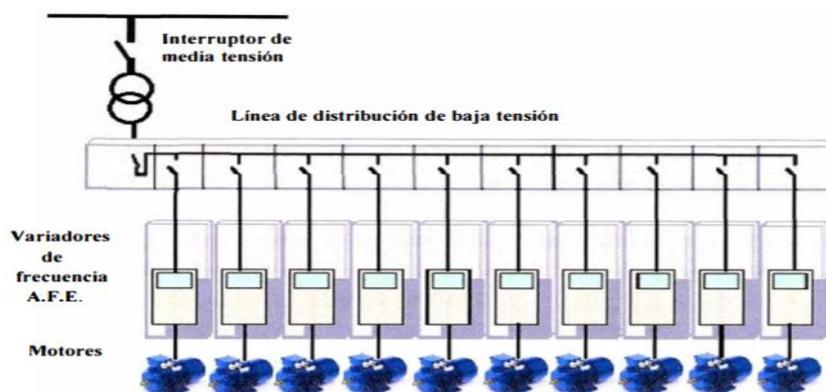


Figura 2. 39 Configuración básica de solución multimotor, un solo variador AFE para cada motor

Fuente. (Mamani Conto, 2011, pág. 37)

En cambio, el sistema de multi accionamiento, tiene un rectificador de sección común y los variadores de frecuencia se encuentran conectados a través del bus de OC; en esta solución cada motor tiene un variador estándar y por tanto, cada inversor se controla de forma independiente. Para el sistema de multi accionamiento, los inversores individuales conectados al Bus DC, no tiene que tener la misma potencia.

Por el contrario, una configuración puede constar de varios variadores de frecuencia de diferentes tamaños. Pues, las salidas de potencia, así como las velocidades del motor pueden ser diferentes. La potencia total del motor instalado no debe sobrepasar, la potencia de la central de puente de conexión. Las tensiones en los terminales de todos los motores individuales también deben ser la misma, ya que los voltajes de salida del convertidor variable siempre se toman del mismo Bus DC (Mamani Conto, 2011, pág. 37).

En la figura 2.40 se puede ver el sistema de multi accionamiento, el cual tiene un transformador que se aplica en forma opcional para la obtención de 12 pulsos. Por tanto, existirá un desbalance de carga, debido a que la cancelación de armónicos es parcial y por lo tanto, necesitará de filtros pasivos (Mamani Conto, 2011, págs. 37-38) NEMA.

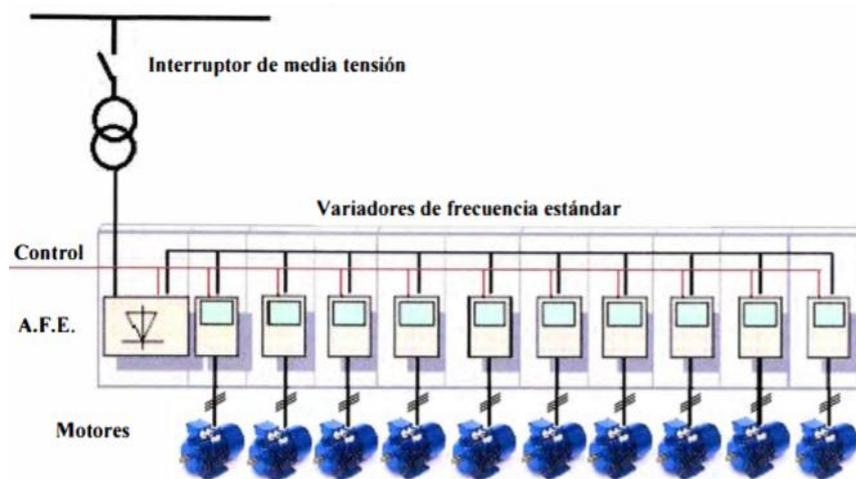


Figura 2. 40 Configuración básica de un sistema de frecuencia de multi accionamiento
Fuente. (Mamani Conto, 2011, pág. 38)

En la figura 2.41 se puede apreciar el variador con solución AFE, el cual es conectado a múltiples variadores de solución estándar a través del Bus DC.

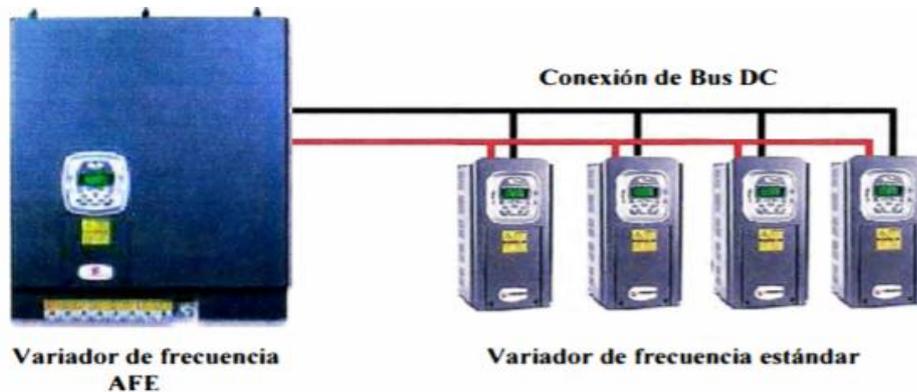


Figura 2. 41 Conexión a través del Bus DC entre un variador AFE y múltiples variadores
Fuente. (Mamani Conto, 2011, pág. 38)

2.13.5 Análisis de armónicos entre solución estándar y regenerativa

En la figura 2.42 se puede observar la comparación de las ondas de corriente a la salida del variador de frecuencia solución estándar y solución regenerativo, para condiciones de la misma carga y tensión y, a condiciones ambientales similares, Asimismo, muestra las respectivas componentes armónicas y se ve que para la solución estándar existe una alta distorsión de corriente y por tanto, mayor contenido armónico, debido al propio diseño del variador, al cual se le suma el tipo de red y cantidad de equipos instalados a diferencia de la solución regenerativa, que posee doble tratamiento de la señal con IGBTs. El control del equipo se encarga de determinar la distorsión y a través del puente rectificador compuesto por IGBTs, logra adelantar o atrasar los disparos para producir una onda igual a la distorsión, pero inversa, logrando la anulación de armónicos. También se observa que la distorsión armónica (THD), en la solución con variador regenerativo es menor a 5%, en comparación de la solución que tiene un THD menor a 25% (Mamani Conto, 2011, pág. 39)

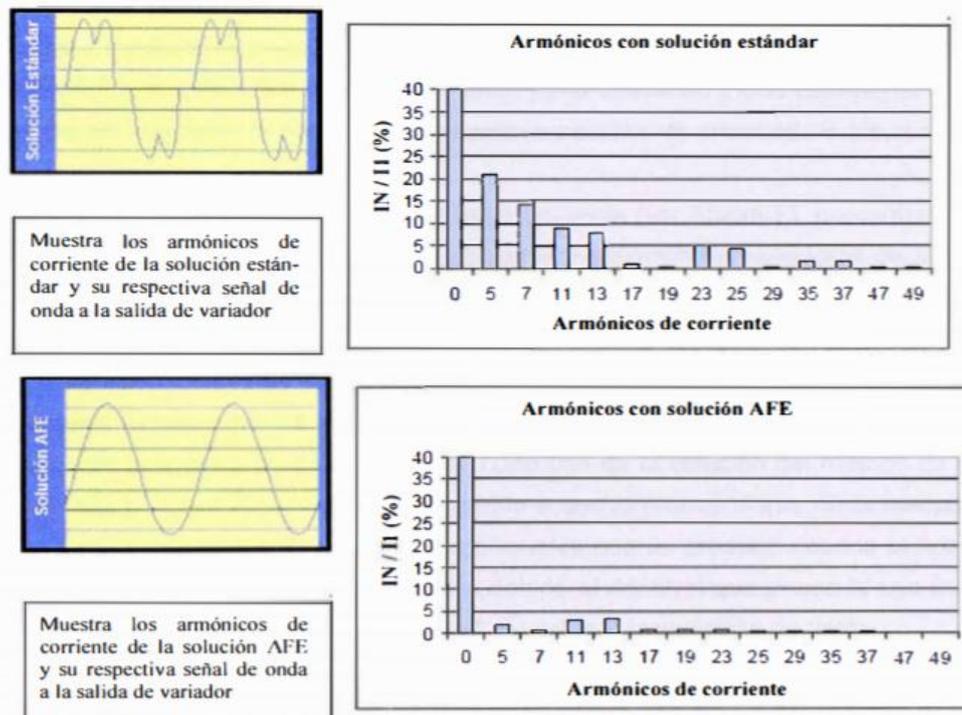


Figura 2. 42 Comparación de armónicos entre las soluciones estándar y AFE

Fuente. (Mamani Conto, 2011, pág. 39)

2.14 Análisis de efectos por armónicos en motores de inducción

A continuación, se describen causas y se analiza consecuencias del efecto de armónico específicamente en cargas tanto lineales como no lineales (motores y sus respectivos variadores de frecuencia).

A continuación, se describe lo que es carga lineal y no lineal.

2.14.1 Carga Lineal

Existen tres tipos básicos de cargas en los circuitos: cargas capacitivas, cargas inductivas y cargas resistivas. Estos difieren en cómo consumen energía en una configuración de corriente alterna (CA). Los tipos de cargas capacitivas, inductivas y resistivas se corresponden con cargas de iluminación, mecánicas y de calefacción (Schneider Electric, 2018. p.2).

2.14.1.1 Cargas resistivas

Las cargas que consisten en cualquier elemento de calefacción, luces incandescentes, hornos, calentadores etc. En este tipo de carga la corriente que fluye a través de los componentes es proporcional a la tensión aplicada a una frecuencia determinada. Dicho de otro modo, si se aplica una tensión senoidal se produce una corriente senoidal en la carga.

2.14.1.2 Cargas Inductivas

Las cargas que alimentan los motores eléctricos son cargas inductivas. También se encuentran en una variedad de artículos para el hogar y dispositivos con partes móviles, incluidos ventiladores, aspiradoras, lavadoras, compresores en refrigeradores y acondicionadores de aire. En contraste con las cargas resistivas, en una carga puramente inductiva, la corriente sigue un patrón sinusoidal que alcanza su punto máximo después de que la onda sinusoidal del pico aumente, por lo que los puntos máximos, mínimo y cero están fuera de fase (Schneider Electric, 2018. p.2).

2.14.1.3 Cargas capacitivas

En una carga capacitiva, la corriente y el voltaje están desfasados como con una carga inductiva. La diferencia es que, en el caso de una carga capacitiva, la corriente alcanza su valor máximo antes que la tensión. La forma de onda actual conduce a la forma de onda de voltaje, pero en una carga inductiva, la forma de onda actual la retrasa (Schneider Electric, 2018. p.2).

En ingeniería, las cargas capacitivas no existen en un formato independiente. Ningún dispositivo está clasificado como capacitivo en la forma en que las lámparas se clasifican como resistivas, y los acondicionadores de aire están etiquetados como inductivos. Sin embargo, los condensadores en circuitos grandes son útiles para controlar el uso de energía. A menudo se incluyen en las subestaciones

eléctricas para mejorar el "factor de potencia" general del sistema. Las cargas inductivas aumentan el costo de un sistema de energía determinado y reducen la cantidad de energía que se convierte en otra forma de energía. En la figura 2.43 puede ver las cargas lineales típicas.

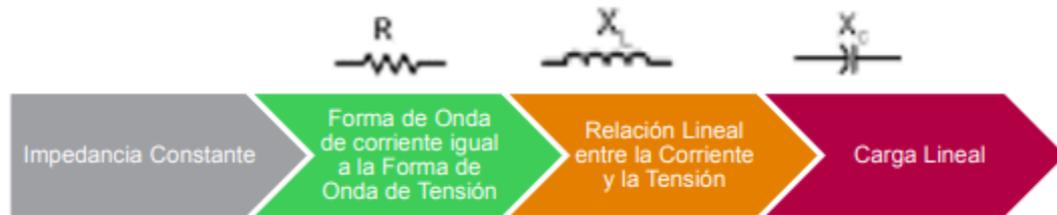


Figura 2. 43 Características de carga lineal

Fuente: (Schneider Electric, 2018. p.3)

Las cargas lineales, consumen corriente por igual en toda la forma de onda. En la figura 2.44 se muestran las ondas de Tensión y Corriente Trifásica Instantánea con factor de potencia=73% (Schneider Electric, 2018. p.3)

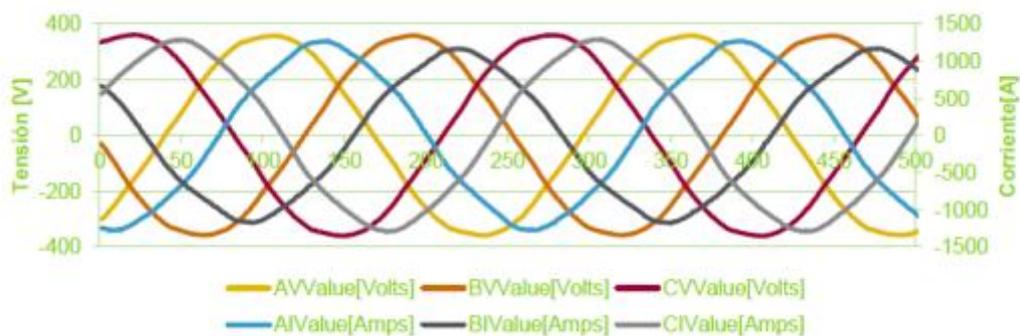


Figura 2. 44 Representación de carga lineal de motor inducción trifásico

Fuente: (Schneider Electric, 2018, p.4)

2.14.2 Cargas No lineal

Las cargas no lineales, como las fuentes de alimentación de conmutación, consumen corriente solo en los picos de la onda. Estas cargas no lineales causan armónicos. Si la frecuencia fundamental es 60 hertz (Hz), entonces el segundo armónico doblaría este número a 120Hz, el tercer armónico sería tres veces (180Hz), y así sucesivamente (Schneider Electric, 2018. p.4).

Normalmente, los armónicos actuales no se propagarán a través de un sistema. Los armónicos de voltaje se propagarán a través de un sistema, ya que pueden pasar a través de transformadores. A medida que aumentan las corrientes no lineales, pueden causar armónicos en el voltaje.

En presencia de cargas no lineales la corriente y las distorsiones de tensión aumentan lo que aumenta las pérdidas de potencia de los transformadores, aumenta su temperatura y disminuir su vida útil.

En la figura 2.45 se muestra las ondas a la salida del controlador Drive AC de un sistema de bombeo de agua.

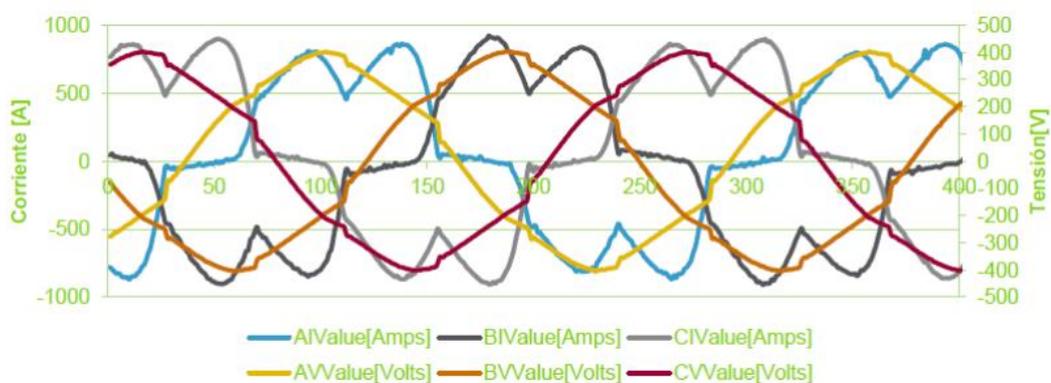


Figura 2. 45 Tensión y Corriente Trifásica Instantánea PF=92%

Fuente: (Schneider Electric, 2018, p.5)

Como se aprecia existe distorsión en la onda principal, las cargas industriales contienen cada vez más circuitos electrónicos que se alimentan de corriente que no es sinodal pura. Así, por ejemplo, los motores utilizan cada vez más la regulación de frecuencia, que requiere un paso de corriente alterna (CA) a corriente continua (CC) y luego de CC a CA (Schneider Electric, 2018. p.5)

2.15 Distorsión por armónicos en sistema eléctrico

Dado que el suministro habitual es CA, esto implica un uso cada vez más intensivo de convertidores electrónicos. Desde el punto de vista de la Red Eléctrica, esto se traduce en que está debe alimentar un gran número de

cargas que rectifican la corriente y por ello, la forma de onda de la corriente que consumen resulta alterada, de forma que ya no es una onda sinodal, sino una superposición de ondas sinodales con frecuencias múltiplos de la frecuencia de red (armónicos) (ABC of Motors- SIEMENS, 2009, pág. 14).

En la figura 2.46, se muestra el consumo típico de una red con Variadores de Frecuencia (VDF).

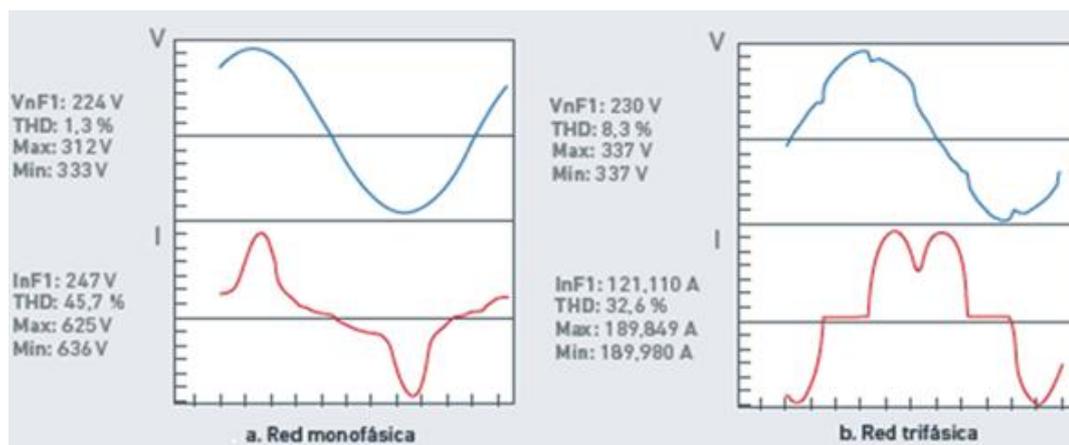


Figura 2. 46 Consumo típico de una red con Variadores de Frecuencia (VDF)

Fuente: (ABC of Motors- SIEMENS, 2009, pág. 15)

La distorsión Armónica es una forma de contaminación eléctrica que puede causar problemas si sobrepasa cierto límite. Los equipos generadores de armónicos están presentes en todas las instalaciones industriales, comerciales y residenciales. Los armónicos están provocados por las Cargas No Lineales. Como se definió anteriormente una carga es considerada No Lineal cuando la intensidad que circula por ella no tiene la misma forma sinusoidal que la tensión que la alimenta. (ABC of Motors- SIEMENS, 2009, pág. 15).

Este tipo de cargas son cada vez más frecuentes y su porcentaje en el consumo total de la instalación aumenta constantemente.

Para regular y limitar los niveles de distorsión en los puntos de enlace, existen una serie de Normas Internacionales que establecen límites de

emisión de armónicos para los equipos y sistemas que deban conectarse a la red.

2.15.1 Norma para emisión de armónicos en red eléctrica

Las organizaciones como la Comisión Electrotécnica Internacional (IEC, International Electrotechnical Commission) y el Instituto de Ingeniería Eléctrica y Electrónica (IEEE, Institute of Electrical and Electronics Engineers) han emitido normas al respecto de emisión de armónicos.

En la tabla 2.4 se muestra algunas normas para el diseño de sistemas eléctricos que incluyen cargas lineales y no lineales.

Tabla 2. 4 Normas para emisión de armónicos

Norma	Descripción
IEC-61000-2-2	Compatibilidad electromagnética (CEM). <i>Parte 2-2: Entorno. Niveles de compatibilidad para las perturbaciones conducidas de baja frecuencia y la transmisión de señales en las redes de suministro público en baja tensión.</i>
IEC-61000-2-4	Compatibilidad electromagnética (CEM). <i>Parte 2-4: Entorno. Niveles de compatibilidad para las perturbaciones conducidas de baja frecuencia en las instalaciones industriales.</i>
IEC-61000-3-2	Compatibilidad electromagnética (CEM). <i>Parte 3-2: Límites. Límites para las emisiones de corriente armónica (equipos con corriente de entrada ≤ 16 A por fase)</i>
IEC-61000-3-4	Compatibilidad electromagnética (CEM). <i>Parte 3-4: Límites. Limitación de las emisiones de corrientes armónicas en las redes de baja tensión para equipos con corriente asignada superior a 16 A.</i>
IEC-61000-3-12	Compatibilidad electromagnética (CEM). <i>Parte 3-12: Límites para las corrientes armónicas producidas por los equipos conectados a las redes públicas de baja tensión con corriente de entrada > 16 A y ≤ 75 A por fase.</i>
IEEE-519-2014	<i>IEEE Prácticas y requisitos recomendados para el control de armónicos en sistemas de energía eléctrica</i>

Nota: (IEEE, 2014, pág. 2)

Entre la norma más recomendada está la IEEE 519-2014, dicha norma no da límites para equipos individuales, sino para clientes individuales. La filosofía es limitar la inyección armónica de clientes para que no causen una distorsión de voltaje inaceptable. Esta norma también es reconocida como American National Standard y es ampliamente utilizado en Estados Unidos y resto del mundo. (IEEE, 2014, pág. 2)

La IEEE 519-2014 proporciona límites de distorsión de tensión armónica para reducir los posibles efectos negativos en el equipo del usuario y del sistema. Este estándar aborda las limitaciones de estado estable.

Los propietarios u operadores del sistema deben limitar los armónicos de voltaje de línea a neutro de la siguiente manera:

* Los valores diarios del 99 por ciento de tiempo muy corto (3s) deben ser menos de 1.5 veces los valores dados en la tabla 2.5.

* Los valores semanales del 95 por ciento de tiempo corto (10 meses) deben ser menores que los valores dados en la tabla 2.6. (IEEE, 2014, pág. 4)

Tabla 2. 5 Límites de distorsión de tensión

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

Nota: (IEEE, 2014, pág. 4)

Incluso los armónicos están limitados al 25% de los límites armónicos impares anteriores. En la tabla 2.6 se muestran límites de distorsión de corriente para sistemas de 120V a 69 kV.

Tabla 2. 6 Límites de distorsión de corriente para sistemas de 120V a 69 kV.

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

Nota: (IEEE, 2014, pág. 4)

2.16 Presencia de Armónicos en cargas no lineales

Se especifica la distorsión en la corriente (línea color azul) en las cargas no lineales, véase la 2.47 (diagrama unifilar), se aprecia algunos variadores de frecuencia conectados a motores de inducción trifásicos.

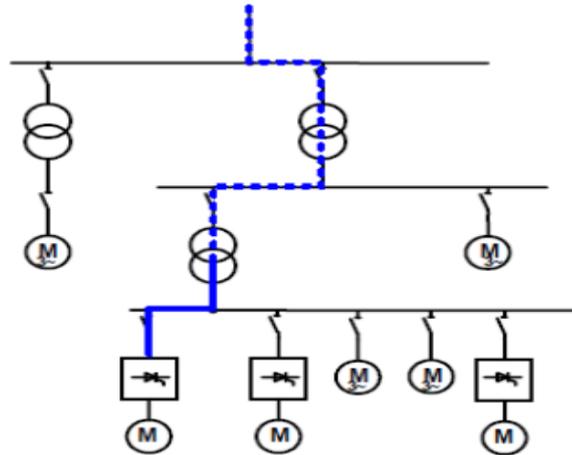


Figura 2. 47 Representación de corriente en cargas no lineales (motores)

Fuente: (Schneider Electric, 2018, p.21)

En cambio, la distorsión de voltaje es una característica a nivel de sistema y es consecuencia de la circulación de corrientes armónicas a través de una impedancia. En la figura 2.48 se aprecia el recorrido, tanto de corriente (color azul) como del voltaje (color rojo) y su incidencia en variadores de frecuencia y motores de inducción. (Schneider Electric, 2018, p.21)

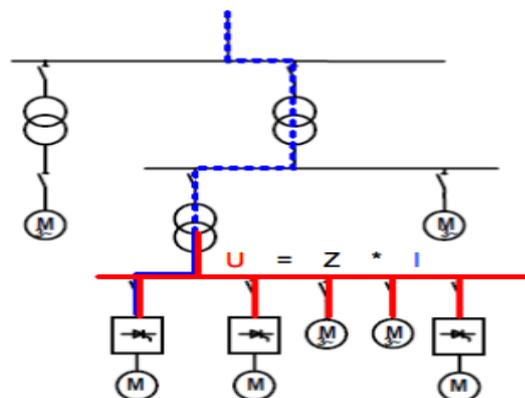


Figura 2. 48 Recorrido de tensión y corriente en cargas no lineales

Fuente: (Schneider Electric, 2018, p.22)

Sin embargo, las consecuencias del esquema de la figura 2.48 son:

- Torque inestable y vibraciones
- Resonancias y sobrevoltajes
- Menor vida útil
- Ruido acústico

2.16.1 Efectos sobre los motores de inducción

Los efectos de armónicos en motores de inducción pueden originar un incremento de las pérdidas en el núcleo y en el cobre. Pues, entre esos aspectos, también puede presentarse:

- Corrientes circulantes y alteración del ciclo de histéresis: En los bobinados del estator y especialmente en las láminas que conforman el núcleo del rotor.
- Afectación de la permeabilidad magnética del núcleo: Incremento de la dispersión del campo magnético (fugas desde el núcleo) Inducen corrientes circulantes
- El deterioro del aislamiento favorece la aparición de chispas de corriente entre espiras.

Por cada 10°C en el incremento de temperatura del motor sobre su valor de diseño, el tiempo de vida útil del aislamiento puede reducirse hasta en un 50%.

Entre las afectaciones de tipo mecánica, en motores de inducción, se produce:

- El aumento de temperatura deteriora la lubricación de los rodamientos.
- Inducción de corriente en rodamientos, posteriormente ocurre el daño. (Schneider electric , 2015, pág. 23)

Los motores para aplicaciones de variación de velocidad, utilizan rodamientos aislados o no conductores. Asimismo, son susceptibles a daño, debido a fuertes valores de dV/dt (Tasa de cambio de la Tensión)

- Salida PWM de un Variador de Velocidad.

Los Armónicos de Secuencia Positiva. (Ver figura 2.49)

- Aumentan el torque de salida.

Los Armónicos de Secuencia Negativa frenarán el motor produciendo calentamiento de:

-Torques Pulsantes

-Frenado

-Vibración. (Schneider electric , 2015, pág. 22)

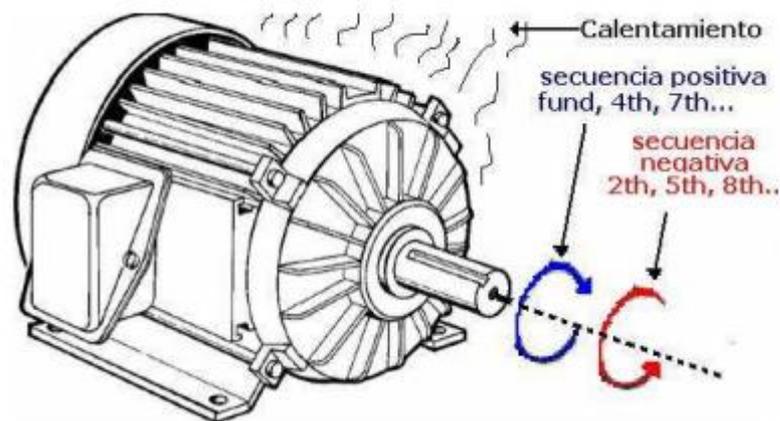


Figura 2. 49 Motor con secuencia positiva

Fuente: (Schneider Electric, 2018, p.22)

Así también se tienen los armónicos de Secuencia Zero, que origina:

- Disipación de su energía en forma de calor en el motor.

2.16.2 Efectos sobre cables

El Efecto Joule en cables, producen los siguientes aspectos:

- Aumento de la Resistividad

- Redistribución no uniforme de la densidad de corriente sobre el área transversal del conductor
- Efecto Skin
- Efecto Proximidad

Estos fenómenos dependen de:

- Diámetro del conductor
- Frecuencia de la corriente circulante
- Resistividad del conductor
- Permeabilidad magnética

- Aumento de la corriente Total RMS
- Debido al aporte que hace cada componente armónica sobre la corriente total. (Circutor, 2017, págs. 4-5)

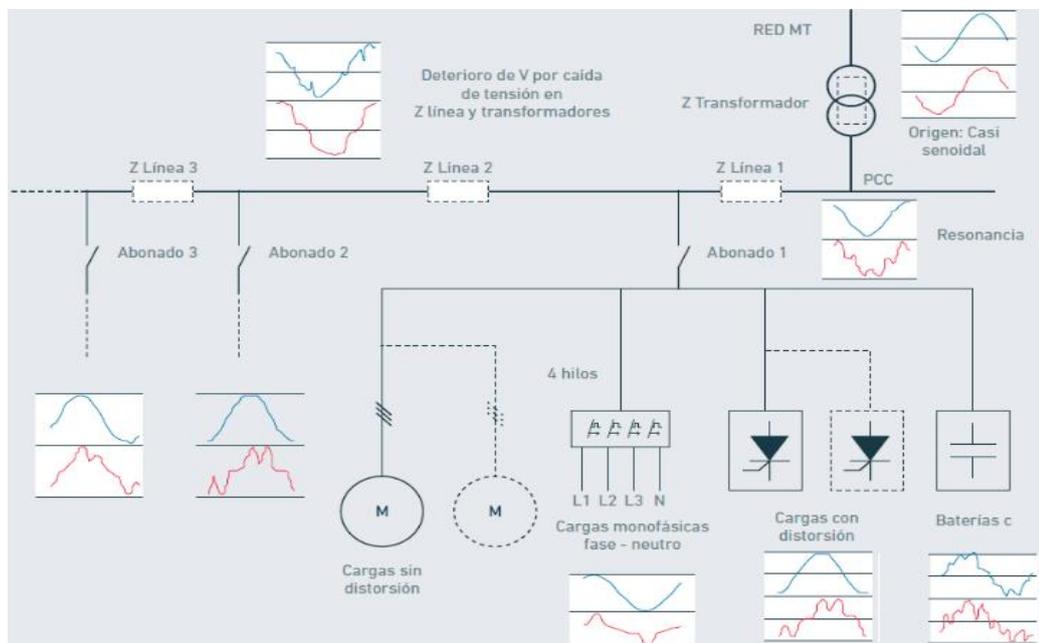


Figura 2. 50 Diagrama unifilar donde se aprecia deterioro de la onda, debido a cargas no lineales

Fuente: (Circutor, 2017, pág. 3)

2.17 Solución al problema de armónicos

Existen soluciones básicas, tales como:

- Instalar inductancias de línea en las cargas no lineales
- Sobredimensionar el hardware dando cumplimiento a la normativa y permitir que los armónicos fluyan.
- Sobredimensionar los transformadores de distribución.
- Sobredimensionar el cableado y tableros de distribución para reducir el riesgo de pérdida del aislamiento.
- Utilizar el “Factor K” de los transformadores del sistema para aumentar la tolerancia al calentamiento.
- Balanceando las cargas de las fases.
- Mejorando el desplazamiento del factor de potencia.
- Agrupando las cargas no lineales.
- Creando fuentes separadas.
- Instalación de cargas no lineales aguas arriba. (Schneider electric , 2015, pág. 40)

Asimismo, se debe tener en cuenta que el sobredimensionamiento de hardware es costoso, así como también lo es, la energía armónica disipada en forma de calor.

2.17.1 Rectificador Multipulsos (12 pulsos)

El rectificador utiliza 12 dispositivos semiconductores (diodos o tiristores). La ventaja es la atenuación de los armónicos 5to y 7mo. En su lugar las armónicas dominantes serán el 11vo y 13vo cuya magnitud es menor que el 5to y 7mo (Schneider Electric, 2018, p.41).

La desventaja es su alto costo y la implementación de un transformador hexafásico. Con el fin de generar dos sistemas trifásicos con un desfase de 30° entre sí. También afecta la eficiencia total del sistema debido a la caída de tensión sobre el transformador. Véase en la figura 2.51 la operación del rectificador de 12 pulsos.

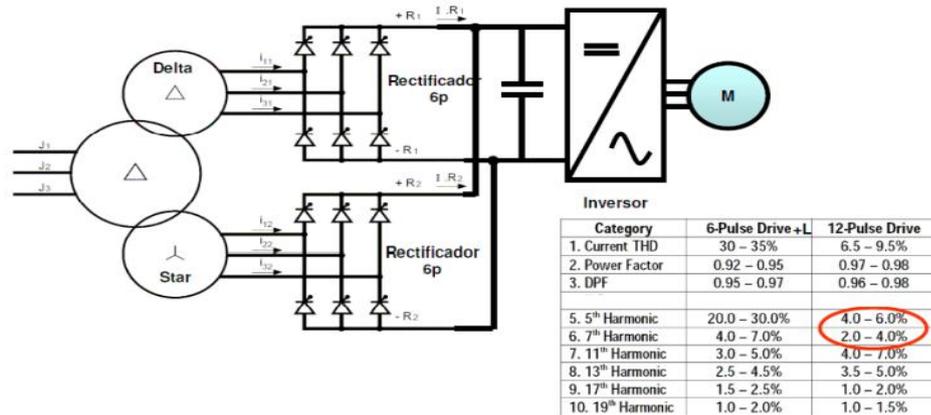


Figura 2. 51 Rectificador de 12 pulsos
Fuente: (Schneider Electric, 2018, p.42)

No obstante, todas las soluciones multipulso poseen una performance muy dependiente de:

- Nivel de carga
- Balance de la red
- Nivel previo de distorsión existente en la red. Véase la figura 2.52.

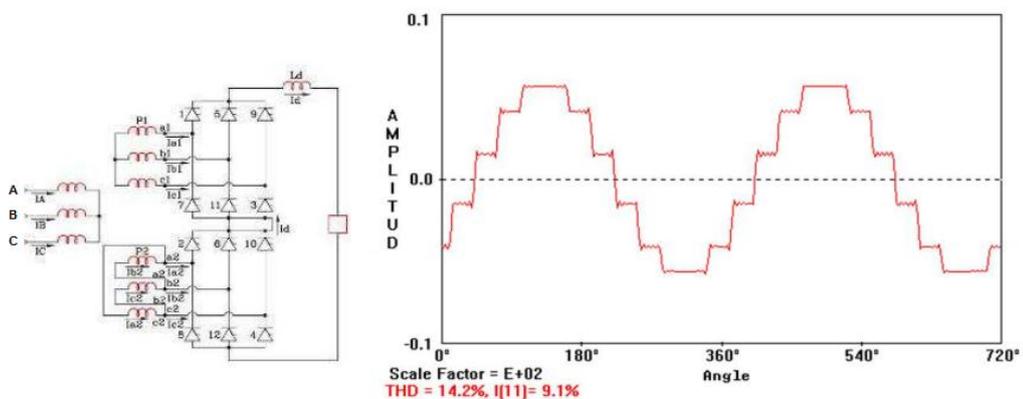


Figura 2. 52 Onda de salida de rectificador de 12 pulsos

Fuente: (Schneider Electric, 2018, p.43)

Las soluciones multipulso incrementan el costo de la instalación y requieren de transformadores de dedicados pesados y voluminosos.

2.17.2 Variadores de Velocidad con AFE (Active Front End):

Los variadores de velocidad con AFE, son fáciles de especificar e instalar, la distorsión armónica muy baja (THD a través del filtro LCL provee mayor inmunidad a variaciones en la red. Véase la figura 2.53)

Por lo tanto, para poder inyectar corriente en la red la tensión del bus de CC, necesita ser más alta que el pico de tensión de red. (Entre un 15 y un 20%). Esto se denomina boost de tensión.

- El boost de tensión es la principal desventaja del diseño de todos los sistemas activos de mitigación de armónicos.
- El boost de tensión de los AFE afecta también el lado del motor generando:
 - Mayor stress en la aislación
 - Mayor corriente en los rodamientos
 - Mayor interferencia (EMI)
 - Mayor pico de tensión y du/dt en los bobinados del motor.(Schneider electric , 2015, págs. 43-44)

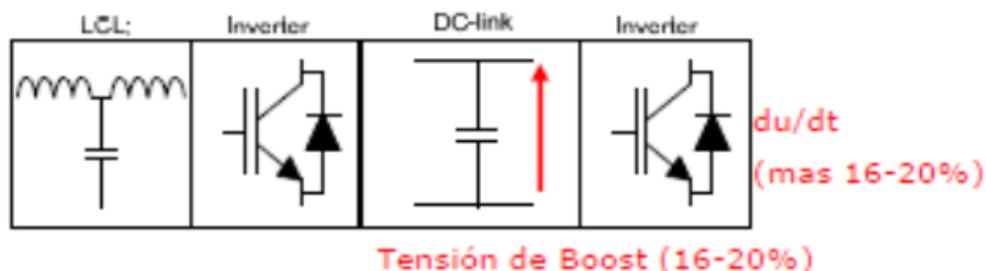


Figura 2. 53 Esquema de variador AFE

Fuente: (Schneider Electric, 2018, p.44)

Debido al doble puente de IGBTs y al filtro LCL, los AFEs tienen eficiencias típicas del orden del 93-95%. Varios puntos menos que un drive estándar.

Así también algunos de los problemas de perturbaciones pueden ser mitigados y corregidos mediante filtros. Los filtros activos son la solución ideal para instalaciones con gran cantidad de cargas monofásicas y trifásicas, que son generadoras de armónicos y con diferentes regímenes de consumo (Schneider electric , 2015, pág. 45)

2.18 Rodamiento

El rodamiento es el cojinete que minimiza la fricción que se produce entre el eje y las piezas que están conectadas a él. Esta pieza está formada por un par de cilindros concéntricos, separados por una corona de rodillos o bolas que giran de manera libre.

El rodamiento de rodillos cónicos, debido a la posición oblicua de los rodillos y caminos de rodadura, es especialmente adecuado para resistir cargas radiales y axiales simultáneas. Para casos en que la carga axial es muy importante hay una serie de rodamientos cuyo ángulo es muy abierto.

Existen diferentes clases de rodamientos de acuerdo al tipo de esfuerzo que deben soportar en su funcionamiento. (Schneider electric , 2015, pág. 48)

2.18.1 Requisitos de rodamientos para motores eléctricos

Los requisitos principales de rodamientos para motores eléctricos son:

- Precisión de las superficies de montaje mínimamente en el grado P6.
- Bajo nivel de expresión acústica de los rodamientos durante la marcha del motor eléctrico (bajo nivel de las vibraciones de los rodamientos)
- Juego radial C3 o el valor acordado.

- Dimensiones exteriores que no corresponden a las del catálogo.

Para impedir el paso de la corriente eléctrica, se empleará:

-rodamientos con bolas cerámicas.

-aislamiento de los rodamientos, a través de revestimientos especiales.

(ZVL Slovakia, 2017, págs. 1-2)

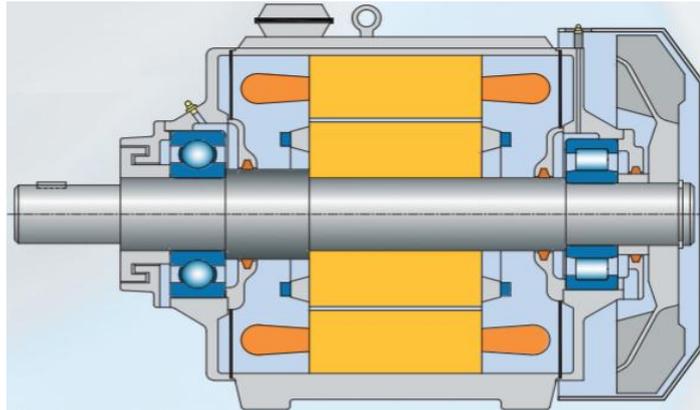


Figura 2. 54 Alojamiento de los rodamientos en motores eléctricos

Fuente. (ZVL Slovakia, 2017, pág. 2)

En la figura 2.55 muestra la influencia del mejoramiento de diseño interno sobre la durabilidad de rodamientos.

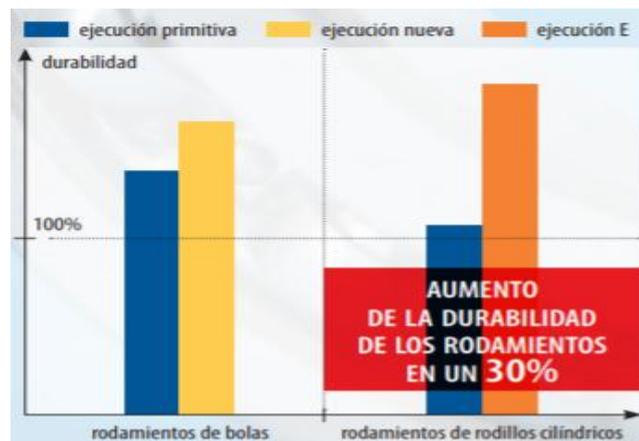


Figura 2. 55 Influencia del mejoramiento de diseño interno sobre la durabilidad de rodamientos

Fuente. (ZVL Slovakia, 2017, pág. 2)

La figura 2.56 se puede ver la influencia del mejoramiento de diseño interno sobre el desarrollo del momento de fricción.



Figura 2. 56 Influencia del mejoramiento de diseño interno sobre el momento de fricción.

Fuente. (ZVL Slovakia, 2017, pág. 2)

2.19 Reactancia para variadores

Las reactancias desempeñan muchas y diversas funciones en la instalación de los variadores. Éstas son algunas de las más usuales:

1. En la entrada de la red eléctrica del variador: en la entrada de la red eléctrica monofásica o trifásica del variador se acopla una reactancia de CA. para contrarrestar posibles efectos de los bornes de conexión como picos parásitos de tensión, caídas de tensión y pérdidas de alimentación momentánea (por voltaje bajo). Las reactancias también permiten mejorar la potencia eléctrica del sistema incluso cuando éste funciona con velocidades y cargas distintas (REITEC, 2014, pág. 7).

2. Entre el variador y el motor: la capacitancia que se produce entre los conductores y las pantallas puede provocar fugas de corriente, así como interrupciones o bloqueos del variador en fallos de la conexión a tierra o en casos de sobrecorriente. La reactancia altera el circuito equivalente, con lo que se reducen al mínimo las posibilidades de interrupción o bloqueo provocadas por las fugas de corriente.

3. En el circuito de c.c. del variador: en el circuito de c.c. intermedio se acopla una reactancia de c.c. que reduce de modo considerable los niveles de distorsión armónica que se generan al utilizar variadores debido a la carga rápida por pulsos no lineal del circuito de c.c. de los variadores. Como consecuencia, se generan corrientes armónicas que se

superponen a las básicas, distorsionando de este modo la onda sinusoidal teórica. Esta reacción puede dar lugar a ciertos problemas como el calentamiento de los cables y transformadores, ruidos como las interrupciones y la reducción de la vida útil de los componentes. La mayoría de los variadores por encima de los 15 kW disponen de reactancia de CC (REITEC, 2014, pág. 7)..

Las reactancias ayudan a que su equipo funcione durante más tiempo al absorber muchas de las perturbaciones de la línea eléctrica que de otra manera dañan o apagan sus inversores, unidades de frecuencia variable, controladores de velocidad variable u otros equipos sensibles. Son una solución de filtrado robusta para prácticamente cualquier rectificador de 6 pulsos o unidad de conversión de energía. No hay necesidad de reducir la velocidad de las reactancias, ya que están compensados por armónicos y protegidos por GBT para asegurar un rendimiento óptimo en presencia de armónicos, y son muy efectivos para reducir los armónicos producidos por inversores y variadores. Las reactancias estándar pueden aplicarse hasta 690 VCA con clasificaciones de impedancia compatibles (Vélez, 2014, pág. 34).

Protección contra pico de voltaje: los picos de tensión en las líneas de alimentación de CA provocan una elevación rápida de la tensión del bus de CC, lo que puede hacer que el inversor se ´desconecte´ e indique una condición de protección de sobretensión. Las reactancias RL absorben estos picos de línea y ofrecen protección a los rectificadores y capacitores de bus de CC al tiempo que minimizan el disparo inoportuno del inversor. Una reactancia RL de impedancia del 3% es 90% efectivo en la protección contra transitorios o disparos de los inversores de fuente de voltaje de CA debido a picos de voltaje. El 5% de reactancias RL extiende la protección de picos de voltaje al 99% (Vélez, 2014, pág. 34).

En la figura 2.57 puede observar imagen sobre la protección contra picos de voltaje.

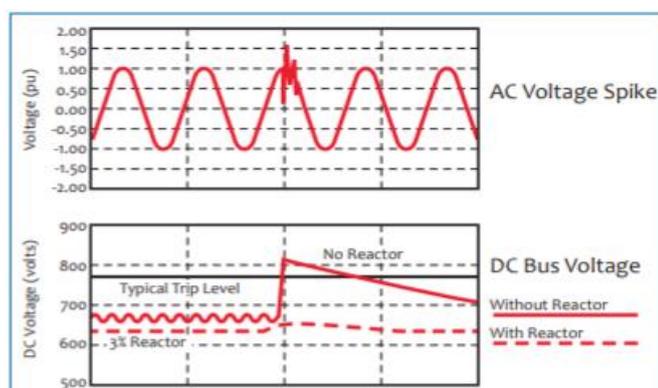


Figura 2. 57 Protección contra picos de voltaje.

Fuente. (MTE Corporation, 2008, pág. 2)

Protección del motor: los reactores ayudan a proteger los motores y cables de los voltajes máximos altos y los rápidos tiempos de subida (dV/dt) que se pueden experimentar en las aplicaciones del inversor IGBT cuando la distancia entre el inversor y el motor es de hasta 90 metros. Para una protección garantizada de los cables largos de hasta 300 metros, use el filtro dV/dt en protección de cables y motores (Vélez, 2014, pág. 34).

Véase la figura 2.58 el efecto en la onda sinusoidal; sin reactor y con reactor de impedancia.

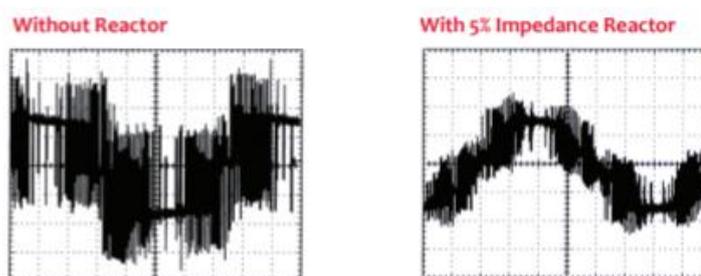


Figura 2. 58 Protección del motor con reactancias (lado derecho)

Fuente. (MTE Corporation, 2008, pág. 2)

Así mismo, las corrientes armónicas de impulsión se reducirán agregando un reactor de línea de entrada.

El 3% de impedancia del reactor rinde 35-55% THID.

El 5% de impedancia del reactor produce un 25-45% de THID.

La curva de la figura 2.59 muestra la linealidad de las reactancias RL. Incluso al 150% de su corriente nominal, estas reactancias aún tienen el 100% de su inductancia nominal. Esto asegura el máximo filtrado de distorsión incluso en presencia de armónicos graves y la mejor absorción de sobretensiones. La tolerancia típica en la inductancia nominal es más o menos el 10% (Vélez, 2014, pág. 34).

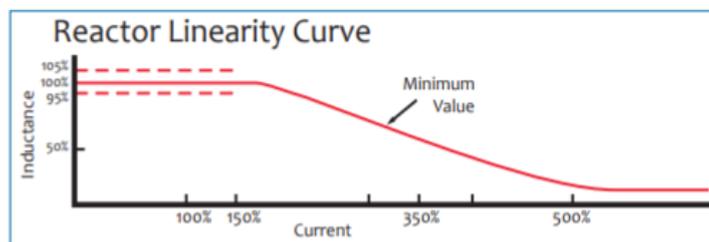


Figura 2. 59 Curva de linealidad de la reactancia

Fuente. (MTE Corporation, 2008, pág. 3)

Los usos típicos incluyen:

- Reducir el voltaje de salida dV/dt .
- Eliminar virtualmente los disparos molestos.
- Extender la vida del semiconductor.
- Reducir la distorsión armónica.
- Reducir la temperatura del motor.
- Reducir el ruido audible del motor. (MTE Corporation, 2008, pág. 4)

En la figura 2.60 muestra la conexión de reactancias en un variador.



Figura 2. 60 Conexión de reactancias en un variador

Fuente. (MTE Corporation, 2008)

CAPÍTULO 3

3.1 Análisis de efectos de cargas no lineales en las industrias

La mayoría de las industrias poseen grandes máquinas y equipos que transforman materia prima para la elaboración de sus productos afines. A través del plan de mantenimiento respectivo y con el uso de tecnología apropiada, se ha podido realizar pruebas eléctricas Online y Offline, con el cual se está evidenciando efectos de las cargas no lineales (VDF) a los circuitos de alimentación, conductores eléctricos y motores.

3.2 Efectos en motores de inducción en industrias

En la figura 3.1 se muestra el diagrama unifilar eléctrico de alimentación eléctrica a máquinas eléctricas, entre ellas se especifica las cargas no lineales (variadores de frecuencia y motores de inducción trifásica), este equipamiento corresponde a una industria

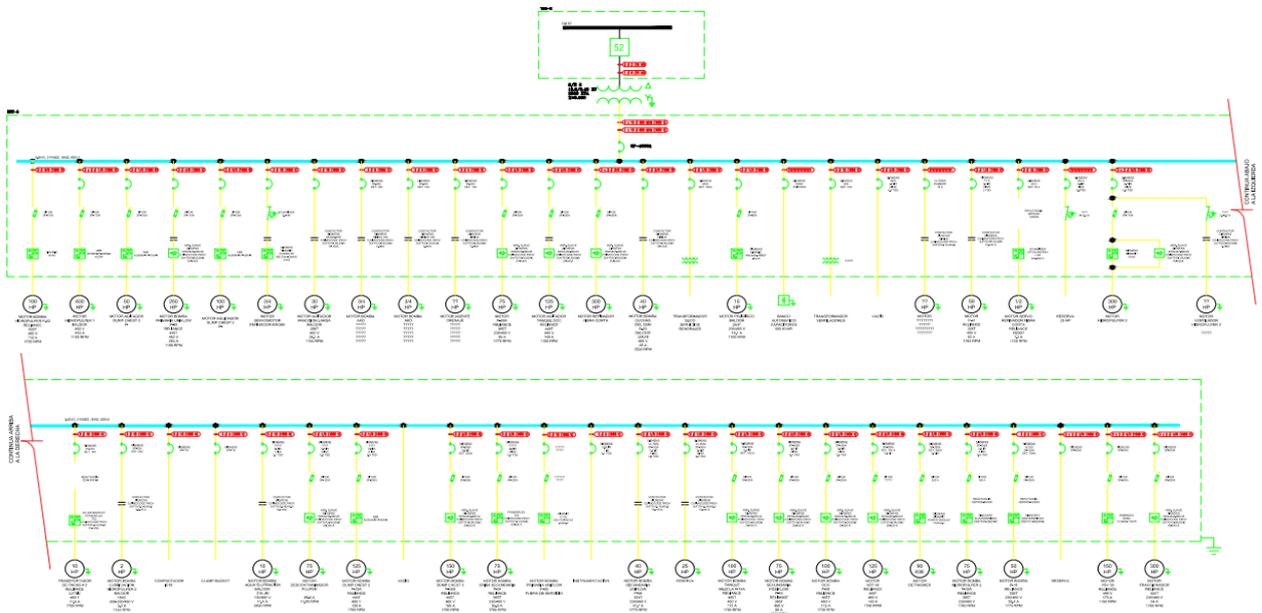


Figura 3. 1 Diagrama unifilar eléctrico de una industria

Fuente: el autor

3.2.1 Levantamiento de fallas

A continuación, se especifica los principales problemas detectados en motores de inducción y del conjunto de elementos y dispositivos que se detalla como carga no lineal de una industria típica.

En el primer ejemplo El Motor # 1, donde se da inicio al proceso de un producto determinado, se detalla lo acontecido en el **primer evento**. Por medio de una planificación se realizó la limpieza y el cambio de grasa del acople Falk (Frecuencia Trimenstral – mantenimiento preventivo) entre motor y reductor. Al poner en marcha se evidenció un ruido en el lado acople del motor, razón por la cual se pidió al personal de operación desacoplar y arrancar el equipo en vacío, para luego proceder a la adquisición de datos, donde se evidencia un ruido, vibración alto en el lado acople del motor. Véase la figura 3.2.



Figura 3. 2 Motor averiado 3/1/18

Fuente: el autor

Debido a los niveles de amplitud en vibraciones se procede a realizar intervención del equipo. En el desmontaje e intervención del motor se presentaron contratiempos en especial al retirar la masa del acople falk, que al no poder retirarlo se tomó como última alternativa cortar la masa con autógena, una vez que se confirmó la disponibilidad de la masa en bodega de materiales para realizar el respectivo maquinado. Primero se retira tapa lado ventilador donde el elemento rodante no presentaba novedades mayores, sin embargo al retirar tapa lado acoplamiento se

puede observar fractura en la canastilla del rodamiento NU 220 (Imagen # 1), también en la pista externa presenta efecto de paso cebra (falla de rodamiento descarga de corriente de eje) (Imagen # 2) y siguiendo con el análisis causa raíz, la marca del rodamiento NTN no ha presentado la garantías requeridas ya que en maquinado de la numeración del rodamiento se observa que manualmente han marcado la letra C3. Luego se instaló de forma provisional un rodamiento SKF 6220/C3 (Cojinete de Bola) se realizará monitoreo de las condiciones de operación para en una posterior parada por mantenimiento realizar el cambio del elemento rodante por SKF NU 220/C3 (Jaula reforzada para trabajo de alto torque).

Recomendaciones:

Se sugirió al mejoramiento del Upgrade del Equipo y al cambio de torques se sugiere que el rodamiento lado acople tipo NU 220/C3 posea una característica adicional de refuerzo en su zona las frágil (canastilla).

Realizar el cambio de la acometida actual por un cable concéntrico apantallado para uso de variador desde el cuarto de accionamiento hacia el motor.

Construir malla de puesta a tierra y conectar equipotencialmente el equipo para reducir los niveles de circulación de corrientes de ejes que están provocando la degradación prematura de la grasa y causando efecto paso de cebra (circulación de corrientes en pista externa de rodamientos).

En el **segundo evento**, en espera del repuesto y luego de un mes y 20 días el mismo motor en su operación expedía humo y de forma abrupta se frena el motor provocando una explosión. Al realizarse la verificación se encuentra lado acoplamiento frenado y temperatura alta. Se realiza desconexión del motor para realizar el cambio por el motor Realince Baldor 400 Hp a 1200 rpm.

Una vez terminados los trabajos en mención se inicia la conexión de la fuente de alimentación y se realiza pruebas de operación dejando en

funcionamiento el equipo con una frecuencia fija de 43 Hz que representa 850 rpm cuya relación no se ve afectada ya que el motor averiado se encontraba trabajando a 57 Hz donde su velocidad era 845 rpm. En la figura 3.3 se evidencia la falla y se muestra el diagnóstico mediante equipo.

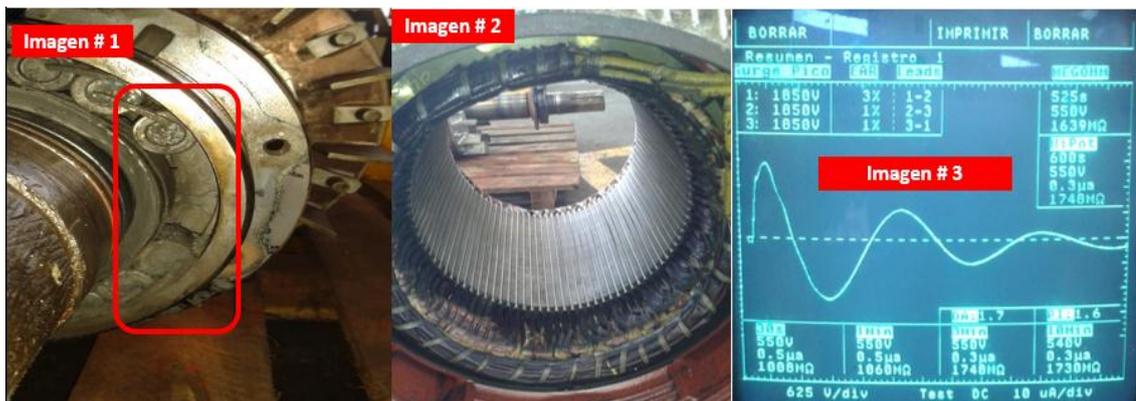


Figura 3. 3 Motor inducción

Fuente: el autor

Actualmente se viene presentado el daño frecuente de los elementos rodantes lado acoplamiento debido a la circulación de corriente de ejes donde su etapa inicial se presenta con degradación prematura del lubricante del rodamiento.

Recomendaciones:

Programar de formar constante la lubricación de los rodamientos lado acople y ventilador del motor. Además de instalar anillos de descargas de corriente AEGIS.

Realizar el cambio de la acometida actual por un cable concéntrico apantallado para uso de variador desde el cuarto de accionamiento hacia el motor.

Construir la malla de puesta a tierra y conectar equipotencialmente el equipo para reducir los niveles de circulación de corrientes de ejes que están provocando la degradación prematura de la grasa y causando

efecto paso de cebra (circulación de corrientes en pista externa de rodamientos).

En el ejemplo # 2 tenemos un Motor que trabaja con un eje como agitador en un tanque del proceso: Se procede a realizar mantenimiento general de cambio de rodamiento y pruebas eléctricas estáticas donde se encuentra en condiciones normales de operación, de acuerdo a su planificación para su respectivo mantenimiento preventivo. Sin embargo, se evidencia que los rodamientos instalados no son los adecuados para aplicación debido a que el mecanismo es un agitador accionado mediante bandas y debería haberse instalado rodamiento NU para soportar cargas radiales. Véase la figura 3.4.



Figura 3. 4 Motor agitador tanque deflaking

Fuente: el autor

Como tercer ejemplo el Motor # 2: Durante el mantenimiento preventivo se evidencia la descomposición de la grasa, ocasionada por el efecto de la distorsión armónica de Corriente THDcurrent, donde su efecto es la secuencia inversa e incremento de la temperatura, Además de las pérdidas Joule razón por la cual se solicita aumentar la frecuencia de reengrase de los elementos rodantes.

Véase en la figura 3.5 el motor de # 2.



Figura 3. 5 Motor Criba #2
Fuente: el autor

Se recomienda, continuar con el mantenimiento predictivo y la revisión de las cajas de conexiones de motores mayores a 100 HP en cada parada mensual, según plan preventivo de motores.

Cuarto ejemplo, en un Variador Velocidad: Se reporta que se dispara motor y bomba que trabaja haciendo vacío, motivo personal técnico revisa el variador y confirma que se disparó por sobrecarga y falla a tierra, procede a resetear la falla para volver arrancar el equipo, pero nuevamente se dispara el variador. Posteriormente proceden a revisar la acometida y caja de conexiones del motor. Véase la figura 3.6.



Figura 3. 6 Variador Velocidad Bomba Vacío #1 Mesa

Fuente: el autor

Al realizar la revisión de la caja de conexiones del motor se observa degradación del aislante eléctrico de los cables de fuerza que llega al motor, esto fue debido a gradiente térmico que hubo por soldadura de terminal de conexiones. Se procede a cortar puntas en mal estado del cable de fuerza y cambiar terminales machinables, para acelerar el proceso de reparación de puntas se deja acometidas por fuera de fundas selladas hasta una próxima parada de máquina programada. También se aprovechó para realizar pruebas eléctricas al motor las mismas que fueron satisfactorias para poner en servicio al mismo.

Recomendaciones:

Realizar pruebas eléctricas dinámicas a motores que hayan presentado fallas por sobrecarga. En ruta de inspecciones de motores eléctricos utilizar cámara infrarroja para llevar tendencia de temperatura. No resetear los variadores hasta que se haya confirmado que no existe novedades en las acometidas y cajas de conexiones de motores eléctricos.

Utilizar torquímetro para dar ajuste a las tuercas de las cajas de conexiones de los motores. Cambio de motor por problemas de aislamiento y chapas del rotor, ya existe motor para el cambio.

Quinto ejemplo en el Motor # 3: En la inspección por parada programada, este Motor presenta incremento en el desbalance resistivo y degradación por recalentamiento en la parte interna de las bobinas efecto que se evidencia en la RTG (resistencia a Tierra) y el Índice de Polaridad IP Adjunto Imágenes del estator. Se sugiere cambio de motor.

Véase en la figura 3.7 el fallo del motor de refinación.

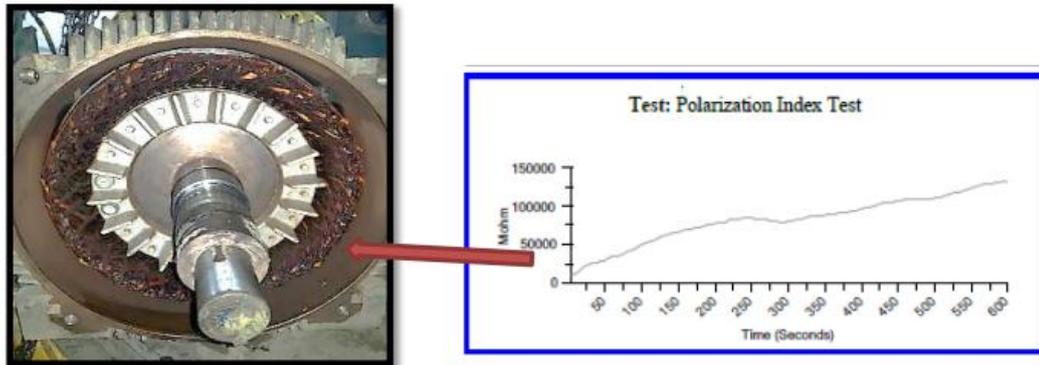


Figura 3. 7 Motor Refinador # 3

Fuente: el autor

Sexto ejemplo del Motor # 5: En la inspección por parada se evidencia que presenta daño por chapas abiertas en el rotor y las amplitudes se han elevado, ocasionando incremento en la temperatura externa del motor por pérdida de torque e incremento en la carga. Igualmente, se debe resaltar que el equipo se encuentra en condición de falla, donde se necesita realizar el cambio del rotor o motor. Véase la figura 3.8.

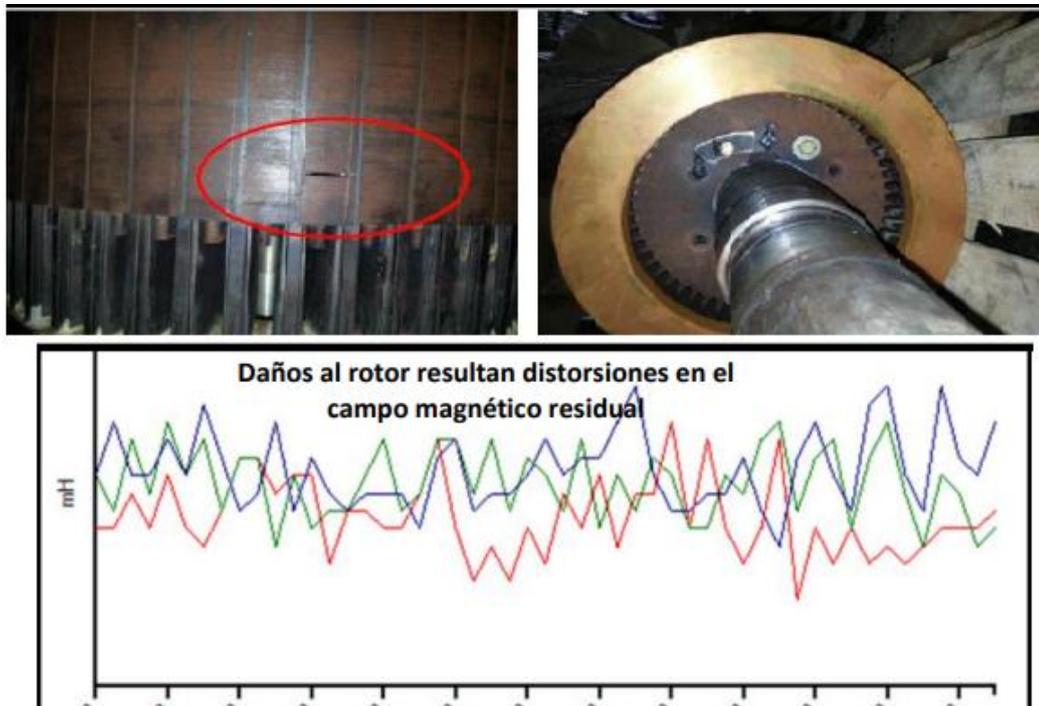


Figura 3. 8 Motor Refinador # 5

Fuente: el autor

Además, se realiza el diagnóstico por termografía al motor mencionado, el cual puede verse en la figura 3.9.



Figura 3. 9 Diagnóstico termográfico de motor de refinador #5

Fuente: el autor

Con el diagnóstico termográfico realizado al motor de inducción, se evidencia que existe daño en chapas del motor.

Se detalla una síntesis de los principales efectos encontrados en motores de inducción de una industria.

- Degradación y recalentamiento del aislamiento.
- Efecto de onda reflejada.
- Voltaje de eje en motores.
- Pérdidas magnéticas por efecto de histéresis.
- Falsos disparos de interruptores.
- Daño de aislamiento de los conductores efecto Skin.
- Aumento de la temperatura.
- Incremento del consumo de potencia en motores eléctricos.
- Pérdida de torque por secuencia negativa del quinto armónico.
- Daño en elementos rodantes (Rodamientos)

La tabla 3.1 detalla el resumen de causas de perturbación en motores eléctricos y el efecto de la misma.

Tabla 3. 1 Causas y efectos de las fallas más frecuentes en un motor eléctrico

Perturbación	subgénero	Causa de la perturbación	Efecto de la perturbación (falla)
Aumento de la temperatura		<ul style="list-style-type: none"> • Suciedad de las partes del motor. • Aislamientos térmicos defectuosos. • Cuchillas gastadas en molinos. • Sobrecarga de barrajes, cables y motores. • Sistemas de control desconfigurados. • Operación inadecuada de protecciones. 	<ul style="list-style-type: none"> • Calentamiento excesivo. • Destrucción de equipos. • Conatos de incendio. • Pérdidas de energía. • Paros indebidos. • Sobrecorrientes. • Caídas de tensión • Ineficiencia en el proceso. • Extracostos en operación y mantenimiento.
Vibraciones Mecánicas		<p>Rotor que no es redondo.</p> <ul style="list-style-type: none"> • Chumaceras del inducido que son excéntricas. • Falta de alineamiento entre el rotor y el estator. • Entrehierro no uniforme. • Perforación elíptica del estator. • Devanados abiertos o en corto circuito. • Hierro del rotor en corto circuito. • Bandas destempladas. • Poleas desgastadas en Accionamientos. 	<ul style="list-style-type: none"> • Calentamiento excesivo. • Desgaste y destrucción del equipo (disminución considerable de la vida útil). • Pérdidas de energía. • Paros indebidos. • Sobrecorrientes. • Desbalances de corriente. • Desbalances de voltaje. • Ineficiencia en el proceso. • costos extras en operación y mantenimiento.
	SAGS	<ul style="list-style-type: none"> • Corto circuito en un alimentador de alta potencia. • Arranque de motores de potencia alta 	<ul style="list-style-type: none"> • Apertura indebida en contactores y dispositivos de protección. • Arranque no exitoso del motor que genera la perturbación.
	SWEELS	<ul style="list-style-type: none"> • Incremento temporal del voltaje durante un desbalance de fases en una falla sólida a tierra. • Falla de un sistema no aterrizado y de impedancia de secuencia cero infinita. • Fallas localizadas en sistemas de alimentación de 4 hilos y múltiple aterrizaje. 	<ul style="list-style-type: none"> • Incremento temporal del voltaje. • Sobrevoltajes línea-tierra. • Operación inadecuada de dispositivos de control y protección. • Problemas de hardware por calentamiento en equipos de cómputo. • Destrucción de componentes electrónicos. • Daños en discos duros o en cabezales de diferentes dispositivos.
Variaciones momentáneas de bajo y alto voltaje (Cont.)	Interrupciones (momentáneas , temporales y	<ul style="list-style-type: none"> • Fallas en el sistema de potencia. • Fallas en motores de gran 	<ul style="list-style-type: none"> • Paros indebidos en los equipos del proceso. • Ineficiencia en el proceso.

	permanentes).	<p>consumo.</p> <ul style="list-style-type: none"> • Mala operación de controles. 	<ul style="list-style-type: none"> • costos extras en operación y mantenimiento. • Disminución de la vida útil de los equipos. • Se generan voltajes SAG (durante el intervalo el tiempo comprendido entre el inicio de la falla y el tiempo de operación del sistema de protección). • Pérdida de información y daños permanentes en discos duros.
	Sobretensiones	<ul style="list-style-type: none"> • Apagado de equipos de gran consumo. Por ejemplo, aires acondicionados de gran potencia y máquinas industriales. 	<ul style="list-style-type: none"> • Deterioro paulatino de los componentes de las computadoras y otros equipos. • Ocasionan en las computadoras pérdida de información, errores en la grabación de datos o daños permanentes.
	Subtensiones	<ul style="list-style-type: none"> • Se originan cuando se encienden equipos de alto consumo de energía, como ascensores, motores y compresores. • Caídas de voltaje en las centrales de generación por excesiva demanda de potencia. 	<ul style="list-style-type: none"> • Esfuerzo adicional para el funcionamiento de las fuentes de poder de las computadoras y equipo de control. • Errores en los archivos de datos. • Fallos o daños en los componentes eléctricos de los equipos de cómputo. • Algunos equipos no logran energizarse completamente.
Armónicos e Interarmónicos.		<ul style="list-style-type: none"> • Se originan por la operación de cargas no lineales y dispositivos que requieren de electrónica de potencia (convertidores, grandes motores de corriente directa y variadores de velocidad). 	<ul style="list-style-type: none"> • Paros indebidos en equipos sensibles. • Pérdidas de energía. • Sobrecargas en los equipos. • Operación inadecuada de fusibles y equipos de protección. • Calentamientos excesivos. • Resonancias electromagnéticas. • Errores de medición (adelanto y retraso de los contadores de energía), etc.

Fuente. El autor

A continuación, se procede con la identificación de niveles de armónicos en subestaciones y Punto Acoplamiento Común entre dos Plantas de diferentes procesos (PCC).

3.2.1.1 Distorsión por armónico en Planta # 1

Mediante el análisis respectivo (identificación de PCC), se determina los niveles de distorsión, tanto de corriente y de voltaje en la S/E # 1 de la Planta # 1. Véase la figura 3.10.

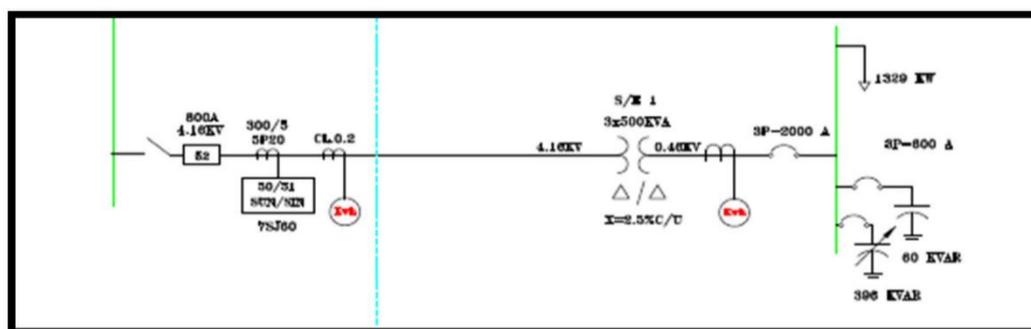


Figura 3. 10 Identificación PCC

Fuente: el autor

En las tablas 3.2 y 3.3 se puede observar la distorsión total de armónicos (THD) tanto, para corriente como para voltaje.

Tabla 3. 2 THD voltaje

% THD voltaje Total		Std. IEEE
Máximo	Promedio	519-2014
4.0	2.5	Observación

Nota: el autor

Tabla 3. 3 THD corriente

Armónicas			% THD voltaje Total		Std. IEEE
5 th	7 th	9 th	Máximo	Promedio	519-2014
10.1	5.5	5.75	7.3	4.0	Observación

Nota: el autor

A continuación, se muestra en el diagrama eléctrico del proceso de la S/E # 2 en la Planta # 1 (ver fig.3.11) y donde se estudia la distorsión de armónicos en dicha línea de producción.

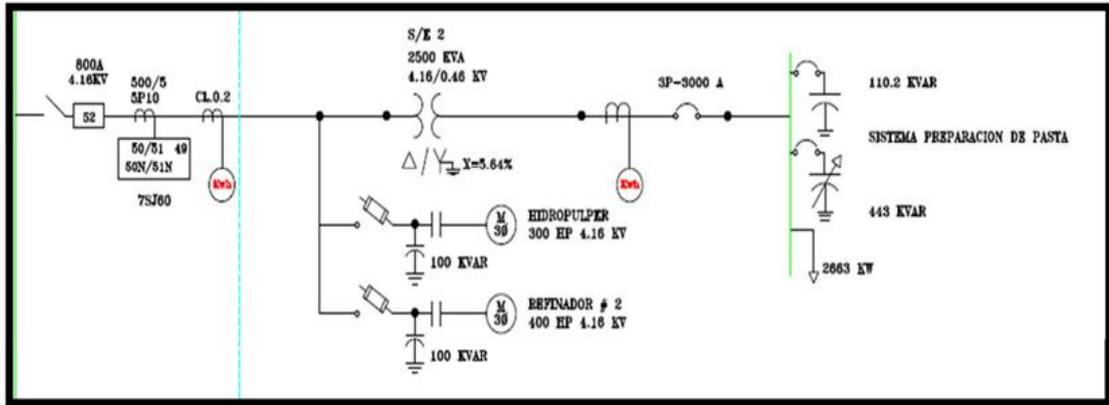


Figura 3. 11 Proceso de Planta # 1 en S/E # 2

Fuente: el autor

Luego, en la tabla 3.4 muestra el THD de voltaje y corriente para el proceso de la planta # 1.

Tabla 3. 4 THD de voltaje y corriente

% THD voltaje Total		Std. IEEE
Máximo	Promedio	519-2014
10.5	5.49	Observación

THD corriente Total		Std. IEEE
Máximo	Promedio	519-2014
22.5	15.28	No Cumple

Nota: el autor

3.2.1.2 Distorsión por armónico en la Planta # 2

En la figura 3.12 muestra la conexión eléctrica de una máquina de proceso en la S/E # 1.

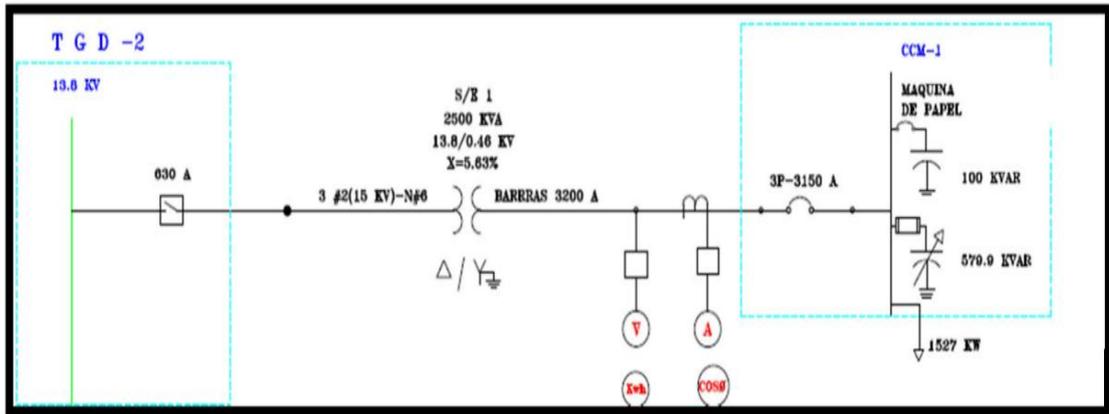


Figura 3. 12 Conexión eléctrica de máquina de proceso

Fuente: el autor

En las tablas 3.5 y 3.6 muestran los valores de THD, tanto para voltaje como para corriente.

Tabla 3. 5 THD voltaje

% THD voltaje Total		Std. IEEE
Máximo	Promedio	519-2014
5.5	3.5	Observación

Nota: el autor

Tabla 3. 6 THD corriente

SCR=Is/IL	h<11		Std. IEEE 519-2014	% THD corriente total		Std. IEEE 519-2014
	5 th	7 th		Máximo	Promedio	
16.37	17.30	11.50	No cumple	30.7	24.67	No cumple

Nota: el autor

A continuación, en la figura 3.13. se puede ver el diagrama de conexión eléctrica del proceso # 2 en la S/E # 6, y en tabla 3.7 el THD de corriente.

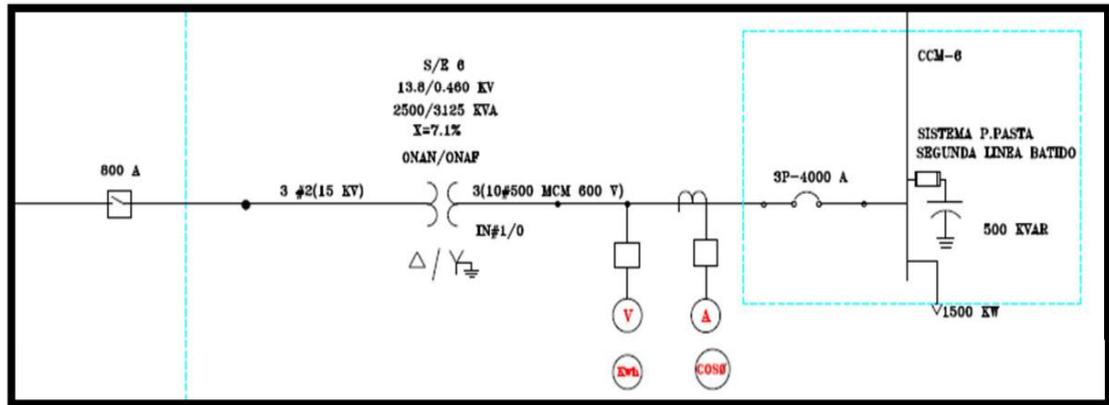


Figura 3. 13 Conexión eléctrica del proceso # 2 de la S/E # 6

Fuente: el autor

Tabla 3. 7 THD voltaje

Armónicas			% THD voltaje total		Std. IEEE
5 th	7 th	9 th	Máximo	Promedio	519-2014
7.90	3.34	0.40	11.46	8.68	No Cumple

Nota: el autor

Tabla 3. 8 THD corriente

SCR= I_{sc}/I_L	h<11			Std. IEEE	% THD corriente total		Std. IEEE
	3 th	5 th	7 th	519-2014	Máximo	Promedio	519-2014
18.33	2.70	21.78	8.88	No cumple	69.78	21.83	No cumple

Nota: el autor

Dentro de la criticidad de las operaciones se evidencia que el Planta # 1 [S/E # 1 Máquina de proceso; S/E # 2 máquina de proceso], Planta # 2 [S/E # 1 Máquina de proceso; S/E # 6], presentan observaciones de no cumplimiento de la Normativa Internacional IEEE 519-2014.

Luego, se procede a analizar el estado de operación de los motores más grandes y con mayores problemas de la Planta # 1 y Planta # 2.

3.2.1.3 Distorsión por armónico en Motor de la Planta # 1

Con el analizador de espectro, (véase figura 3.14) se obtiene imágenes de la onda de armónicos.

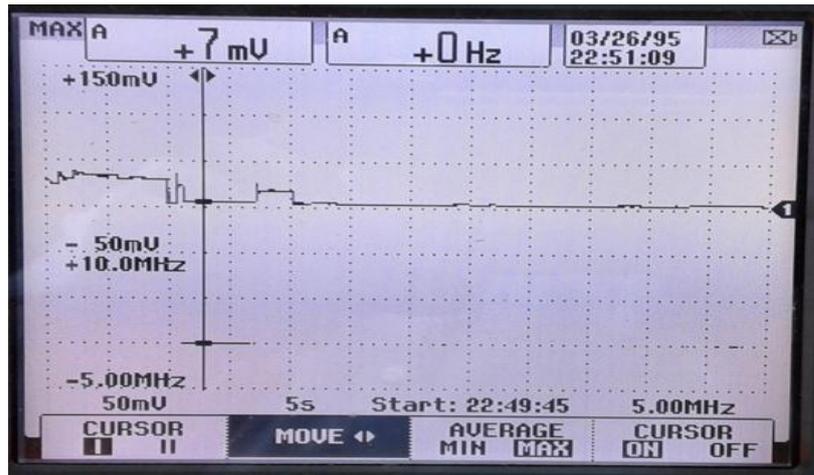


Figura 3. 14 Análisis del motor Planta #1

Fuente. El autor

El voltaje del eje puede causar descargas de EDM, en los cojinetes del motor y potencial de falla catastrófica del motor. El voltaje del eje es descargado a tierra a través de las microfibras conductoras AEGIS®. El rodamiento está protegido contra daños por electroerosión.

3.2.1.4 Distorsión por armónico en motor Hidropulper # 2

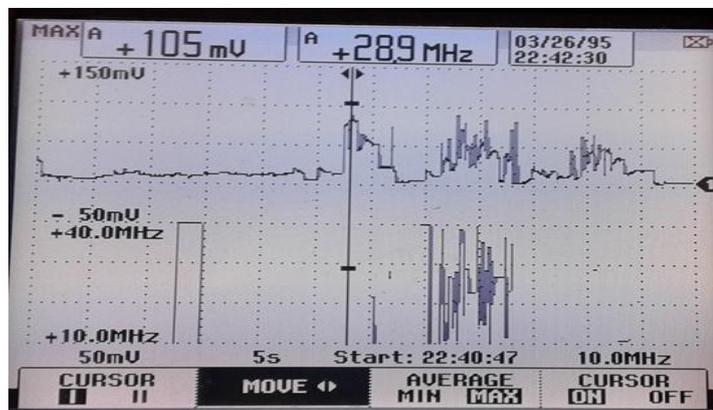


Figura 3. 15 Motor Planta #2

Fuente. El autor

El voltaje del eje es descargado a tierra a través de las microfibras conductoras AEGIS. El rodamiento está protegido contra daños por electroerosión.

3.2.1.5 Análisis de espectros del Motor de la Planta #2

Del motor Punto 1 se obtiene la gráfica de espectro Demodulación (TRA).

Velocidad: 1XM 742. Amplitud máxima global: 0.74 mm/s. Véase la figura 3.16.

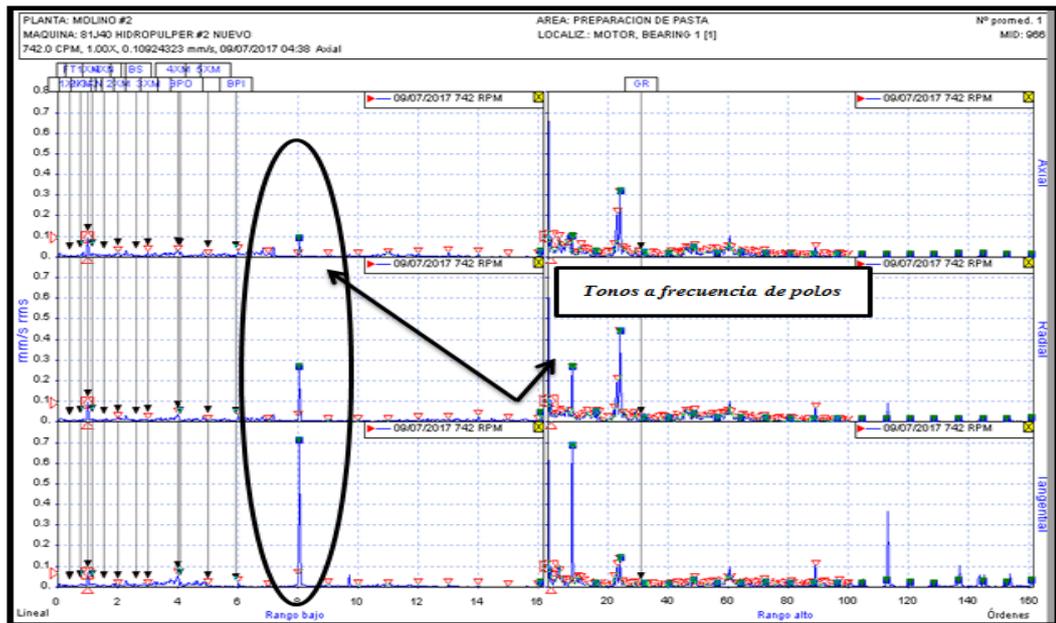


Figura 3. 16 Motor planta # 2

Fuente. El autor

3.2.1.6 Análisis del espectro del Motor de la Planta # 1

Del motor Punto 1 se obtiene la gráfica de espectro Demodulación (TRA)

Velocidad: 1XM 825. Amplitud máxima global: 0.39 mm/s. Véase la figura 3.17.

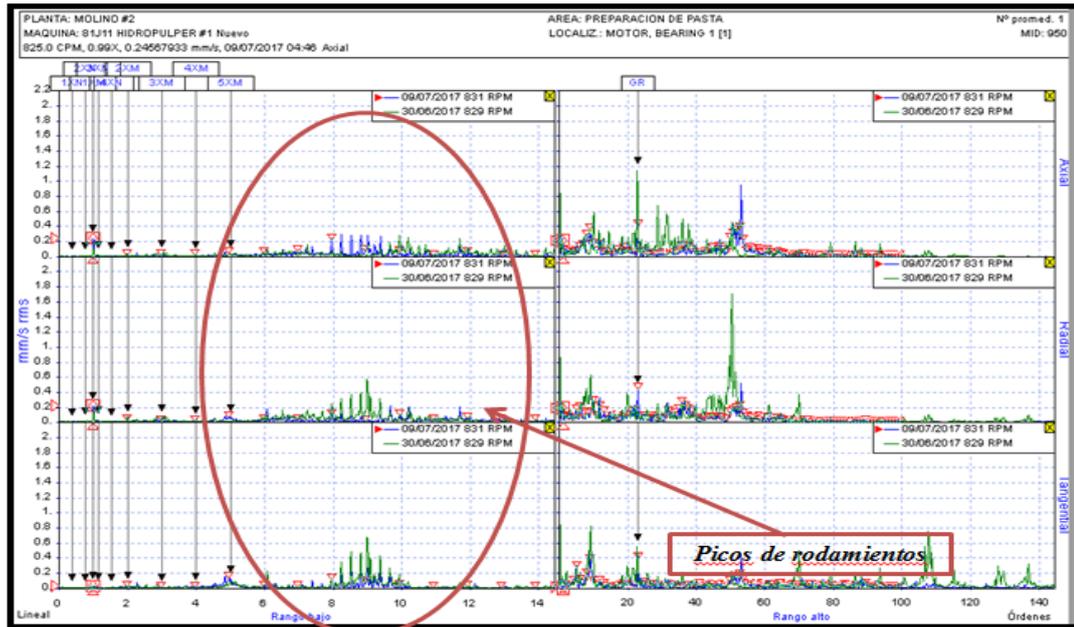


Figura 3. 17 Planta #1

Fuente. El autor

Como se observa, se realizó las mediciones de voltaje de ejes y espectro de vibraciones, donde se comparó el Upgrade del Motor de la Planta # 2, en el cual se obtuvo un voltaje máximo entre 37 y 7 mV (milivoltios) y con la técnica de vibraciones muestra en bajo rango, condiciones normales de elemento rodantes. Sin embargo, el Motor de la Planta # 1 obtuvo valores de 105 mV (milivoltios), evidenciando picos de circulación de corrientes en bajo rango, tal como muestra en la figura 3.17.

3.3 Análisis de calidad de energía en industria típica

Por medio del Análisis de Calidad de Energía se determinó un suministro de voltaje que fluctúa entre 449 y 488 Vrms, con una capacidad de carga que varía entre 474 y 3452 Amperios. Asimismo, se evidencia la circulación de corriente por el neutro del transformador entre 4 y 38 Amperios. La distorsión armónica de voltaje y corriente total mantiene valores del 11.46 % y 23.84 %.

Los valores porcentuales de distorsión armónica individual se reflejan en el 5ª y 7ª armónica de corriente cuyo valor es de 21.78 % y 8.88 % se encuentran fuera del límite permitido del 4 % por el Std. IEEE 519-2014. Durante la adquisición de datos en 16 días se evidencia un consumo de Potencia Aparente entre 437.9 Kva. y 2166.64 Kva. El factor K calculado es de 2.47, el cual permite realizar el Derating de la Capacidad Total considerando las corrientes de Cargas No Lineales, donde se obtiene 2289 Kva Potencia Instalada donde se evidencia que el transformador se encuentra al 94.65 % de su capacidad.

Donde efectivamente se viene evidenciando el incremento de las pérdidas en el núcleo (Corrientes circulante en el hierro – Alteración del ciclo de histéresis), Pérdidas en el Cobre (Aumento en la temperatura – Degradación del Aceite Dieléctrico).

Observaciones:

En función del Alto contenido de armónicos en el sistema, se recomienda disminuir los niveles de distorsión acorde a los Std. IEEE 519-2014. Dentro de las medidas a considerar son:

- En conjunto con el Departamento Eléctrico (Actualización del Diagrama Unifilar de las Cargas en los cuartos de accionamientos) identificando cargas Lineales y No Lineales.

- Instalación de Reactancia de Línea a la Entrada y Salida de los Accionamiento por Variadores de Frecuencia.
- Instalación de Acometida (Cable Apantallado) desde el Accionamiento por VDF hacia el Motor Eléctrico.
- Adquisición del Nuevo Transformador considerando el porcentaje de cargas no Lineales (Factor K)
- Realizar el cambio del actual sistema de Compensación Reactiva por un Banco Desintonizado de Capacitores para evitar efecto de Resonancia (Incremento en la Amplitud de los Niveles de Distorsión Armónica).

En la tabla 3.9 se puede ver el resumen de efectos y recomendaciones a máquinas rotatorias, en las industrias.

Tabla 3. 9 Descripción de falla de motores eléctricos en industria típica

Planta # 1

EQUIPOS	EFEECTO	RECOMENDACION
Motor Bomba Brocke	Degradación de Aislamiento y Desbalance Resistivo > 5 %	Instalación Cable Apantallado, Motor Inverter Duty y mejora en el sistema de puesta a tierra.
Motor Bomba Consistencia	Recalentamiento, Degradación del Aislamiento e Índice de Polaridad [IP] 5.59	Realizar el cambio de acometida normal por cable apantallado para uso VDF e instalar Reactancia de Línea Entrada y Salida.
Motor Refinador # 3	Desplazamiento Axial y Resistencia a Tierra menor a 800 Mega Ohmios e Índice de Polaridad [IP] 1.00 Cuestionable. Además presenta Amplitud de Daño de Chapas de Rotor.	Realizar Pruebas Estáticas y Cuantificar los niveles de Amplitudes del Daño del Rotor.
Motor Refinador # 5	Desplazamiento axial y problemas de conexión en barras del rotor.	Realizar cambio de Motor o Adquirir Nuevo Rotor
Motor Bomba Vacío # 1 - 2	Degradación, Recalentamiento de Aislamiento, efecto perdida de torque por Secuencia Negativa Quinto Armónico	Adquisición Motor Inverter Duty con Aislamiento Clase H e incrementar potencia

Motor Bomba Vacío # 5	Voltaje de Eje ocasionando efecto capacitivo y circulación de corriente degradando el aceite base de los elementos rodantes. Además evidencia desbalance resistivo	Realizar el cambio de acometida normal por cable apantallado para uso VDF e instalar Reactancia de Línea Entrada y Salida.
------------------------------	--	---

Planta # 2

EQUIPOS	EFEECTO	RECOMENDACION
Motor Bel Purge Motor Bomba P-09 Motor Bomba P-03 Motor Bomba P-14 Motor Bomba P-25	Degradación e Índice de Polaridad Alto por recalentamiento del Aislamiento por efecto de secuencia negativa Quinto Armónico	Seguimiento mediante Pruebas MCE y evaluar a la criticidad del Equipo el cambio del motor con Aislamiento Clase H.
Motor Blower Bajo Vacío Motor Ventilador Presecado Motor Extractor Presecado Motor Ventilador PostSecad	Onda Reflejada, picos de voltaje por PWM degradando el aislamiento del motor, circulación de corriente en el eje y daño de elementos rodantes.	Instalación de Reactancia entrada y salida del variador, cable apantallado debido a la distancia entre el arrancador y el motor.
Motor Bomba Vacío Couch	Efecto de Tracking o descargas con chapas del rotor abierta	Adquisición de Motor o Rotor

Nota: el autor

3.4 Buenas prácticas para minimizar el efecto de armónicos

3.4.1 Apantallamiento eléctrico del motor

Una buena práctica para reducir las corrientes en rodamientos inicia conociendo el tipo de corriente que se está produciendo en el rodamiento. A continuación, se describe algunas de las metodologías más usadas e investigadas en la literatura técnica para la reducción de corrientes en rodamiento.

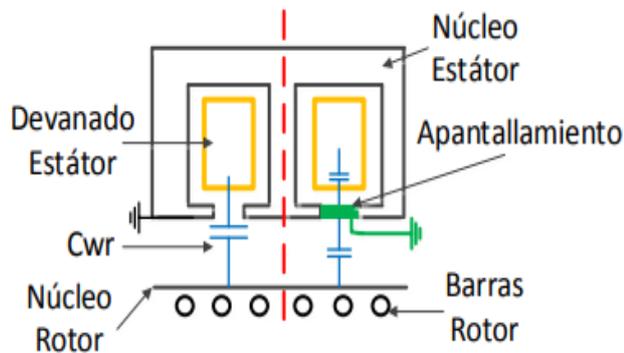


Figura 3. 18 Perfil de 2 ranuras, (izq. sin apantallamiento; der. con apantallamiento a tierra entre el devanado del estator y rotor)

Fuente: (Mejía, 2015, pág. 64).

En la instalación del conjunto motor de inducción y variador de frecuencia: Se demanda emplear cables simétricos y con apantallamiento de baja impedancia. Los conductores de tierra junto con las fases de alimentación deben tener una disposición simétrica para evitar que se induzcan tensiones sobre los conductores de puesta a tierra por flujos magnéticos desbalanceados de los conductores.

Se debe diseñar trayectos cortos y de baja impedancia por donde circularán las corrientes de modo común que son en el conductor de puesta a tierra y en el apantallamiento de baja impedancia de los cables de alimentación. Adicionalmente, el apantallamiento debe tener conexiones de 360° en ambos extremos que garantice una conexión de puesta a tierra de baja impedancia.

Así también aumentar conexiones de alta frecuencia para obtener puntos de referencia equipotenciales en la instalación, que garantice que las corrientes parásitas de rotor aterrizado no circulen por las cargas mecánicas acopladas.

Para solucionar inconvenientes por tensiones inducidas en motores de inducción que se utilizan en diferentes procesos de una industria. Se puede emplear filtros de modo común que eliminan o suprimen componentes de

alta frecuencia de la tensión. La desventaja de aplicar filtros en el conjunto variador de frecuencia y motor de inducción es su complejidad. Se debe verificar que los filtros no generen pérdidas, caídas de tensión o consumos excesivos de corriente y de potencia. Otra técnica es utilizar rodamientos cerámicos.

3.4.2 Rodamientos cerámicos

Los rodamientos cerámicos tienen formas de esferas y surcos, su construcción emplea el material cerámico en lugar del acero habitual. A su vez, se diferencian:

- Los rodamientos cerámicos híbridos (hybrids) con esferas en material cerámico
- Los rodamientos cerámicos integrales (full ceramic) que tienen tanto las esferas como las pistas/surcos en material cerámico.

El compuesto cerámico más empleado para la fabricación de estos rodamientos es el Nitruro de Silicio Si_3N_4 de un característico color gris oscuro. Los rodamientos cerámicos son costosos comparados con el de tipo híbrido, pues requieren materiales con revestimiento de diamante para el maquinado y el corte de este material. Además, los materiales cerámicos tienen un coeficiente de fricción significativamente menor (20–30 veces menos) que los rodamientos de bolas de acero con sellos y lubricación estándar. Esta fricción reducida da como resultado una resistencia a la rodadura reducida y velocidades de rotación más rápidas. Véase la figura 3.19.

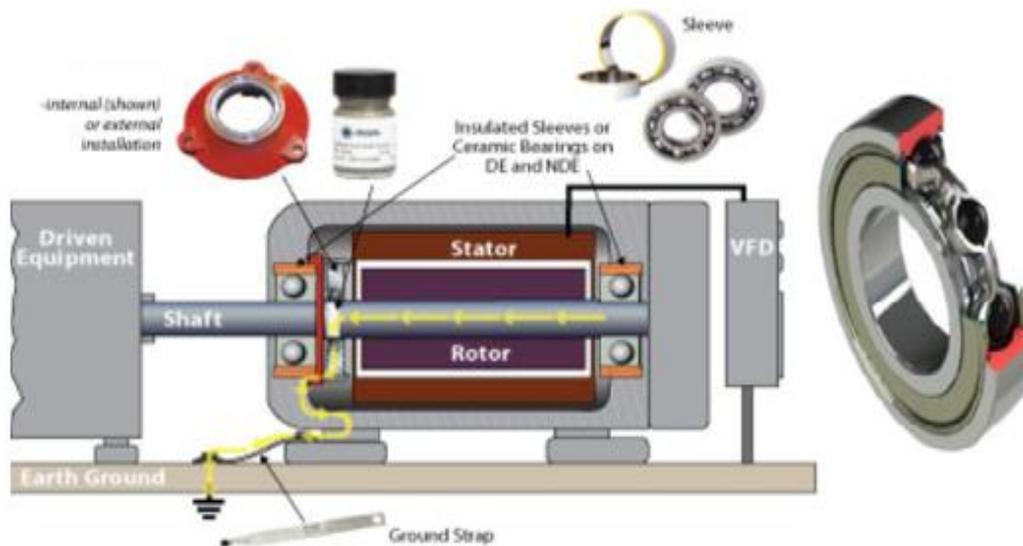


Figura 3. 19 Rodamientos de cerámica en motor de inducción

Fuente: (AEGIS, 2016, pág. 1)

Los rodamientos de cerámica también son más duros que los rodamientos de acero y, por lo tanto, son más duraderos. Los estudios demuestran que los cojinetes de cerámica pueden durar entre 5 y 20 veces más. La superficie más lisa de la cerámica también reduce significativamente el riesgo de asimiento de los rodamientos con poca o ninguna lubricación. Además, los cojinetes de cerámica pueden operar en ambientes hostiles debido a su resistencia a la corrosión y degradación. Finalmente, sus propiedades de aislamiento eléctrico eliminan el riesgo de erosión eléctrica y picaduras de los elementos rodantes.

Los fabricantes y usuarios de motores listos para el inversor deben esforzarse por proteger los cojinetes de los motores, así como sus devanados. Las siguientes medidas han demostrado ser efectivas en condiciones operativas reales y deben considerarse para su inclusión en cualquier actualización de las normas NEMA:

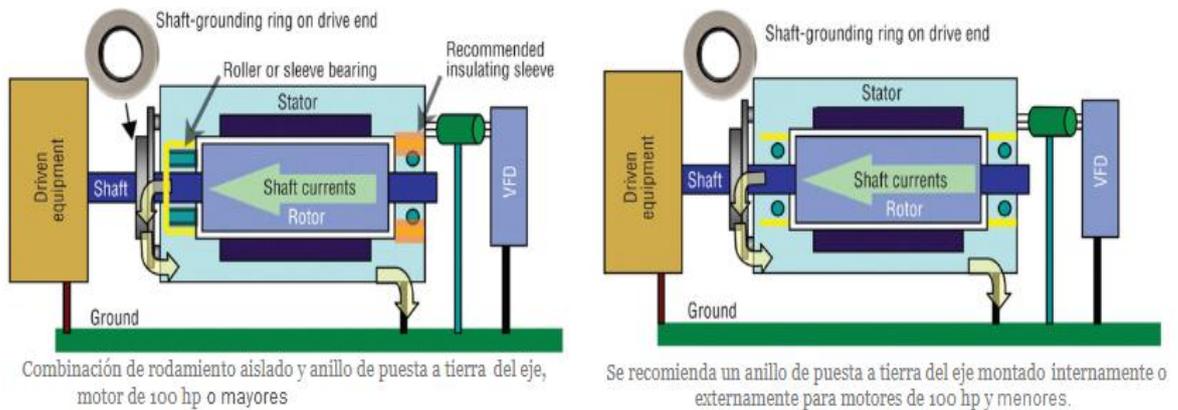


Figura 3. 20 Mejores prácticas para mitigar el daño al rodamiento

Fuente: (HPAC Engineering, 2013, pág. 2)

Para motores de más de 100 hp, en los que tanto las corrientes de circulación como las tensiones en modo común pueden causar daños en los cojinetes, un cojinete aislado en un extremo y un anillo de conexión a tierra del eje (figura 3.20 izquierda) brindan la mejor protección contra el daño del cojinete eléctrico.

Para motores de 100 hp y de menos potencia, la adición de un anillo de conexión a tierra del eje, ya sea dentro de un motor o externamente (figura 3.20 derecha), protege eficazmente los rodamientos y el equipo conectado contra las corrientes.

CAPÍTULO 4

4.1 Conclusiones

- El análisis en el dominio de la frecuencia de los armónicos permitió establecer los diferentes elementos adecuados para el sistema en eléctrico, consiguiendo disminuir la propagación de los armónicos.
- El uso de cables apantallados mitiga los efectos causados por los armónicos en los rodamientos de los motores y en el aislamiento de los conductores.
- Se puede acudir a reactancias de entrada (bobinas de red), que acrecientan la impedancia de entrada de los equipos que crean armónicos (como los variadores de frecuencia), obteniendo porcentajes próximos al 20% de THDi.
- Las reactancias son una técnica fácil de emplear para minimizar efectos de armónicos por cargas no lineales, deben conectarse en serie con la red para reducir efectos no deseados en la instalación de los variadores de frecuencia.

4.2 Recomendaciones

Mediante el estudio de los efectos de los armónicos en los sistemas eléctricos que utilizan variadores de frecuencia, se pudo determinar:

- Para incrementar la vida de los equipos eléctricos es necesario instalar cables apantallados con su respectiva puesta a tierra.
- Instalar reactancias a la entrada y a la salida de los equipos no lineales para disminuir el efecto de los armónicos.
- Es necesario detallar en un diagrama unifilar la distribución de cargas lineales y no lineales del sistema eléctrico.
- Se debe considerar que los motores de inducción para su respectivo trabajo específico tengan rodamientos de cerámica.

Referencias Bibliográficas

- ABB. (2006). *Manual para motores y generadores de inducción*. Obtenido de <http://www.inspt.utn.edu.ar/academica/carreras/61/bajar/generales/abb.manual.para.motores.pdf>
- ABC of Motors- SIEMENS. (2009). Obtenido de <https://www.induteq.nl/bestanden/masterclass/w33/motors-abc-en.pdf>
- AEGIS. (2016). *Motors with Both Bearings Insulated—Any HP/kW*. Obtenido de <https://www.est-aegis.com/best-practices-3.php>
- Baker. (2009). *Pruebas y diagnóstico de motores eléctricos en servicio*. Obtenido de <http://www.emb.cl/electroindustria/articulo.mvc?xid=1254>
- Carrasco, L. (2011). *Implementación de un módulo de laboratorio para el control y monitoreo de un motor asíncrono jaula de ardilla mediante un variador de frecuencia, un PLC y software*. Obtenido de <http://dSPACE.espace.edu.ec/bitstream/123456789/1878/1/25T00170.pdf>
- Catálogo Técnico. (2016). *Motor Eléctrico Trifásico*. Obtenido de <https://www.totaline.com.ar/wp-content/uploads/2016/08/28-Cat%C3%A1logo-Motores-Weg.pdf>
- Chauvin Arnoux. (2015). *Guía de medición de tierra*. Obtenido de http://www.chauvin-arnoux.com/sites/default/files/documents/cat_guia_de_medicion_de_tierra_ed2.pdf
- Circutor. (2017). *Armónicos: Problemática actual y su solución*. Obtenido de <http://circutor.es/es/productos/destacados/4194-armonicos-problematica-actual-y-su-solucion>

- Fraile Mora, J. (2008). *Máquinas Eléctricas*. Madrid: Mc Graw Hill.
- Guinudinik, J. (2016). *ACCIONAMIENTOS Y CONTROLES ELECTRICOS*.
Obtenido de Universidad Tecnológica Nacional (UTN)- Facultad
Regional Tucumán:
<http://www.frt.utn.edu.ar/tecnoweb/imagenes/file/Apuntes%20del%20Dpto%20Electrica/MOTORES%20ASINCR%C3%93NICOS.pdf>
- Helukabel. (2015). *TOPFLEX-EMV-UV-3 PLUS 2YSLCYK-J*. Obtenido de
<http://www.eurocabos.com.br/files/cabos/helukabel/cabos-servo-encoder/d-023-topflex-emv-uv-3-plus-2yslcyk-j.pdf>
- Hernández, F., Moran, T., Espinoza, J., & Dixon, J. (2001). *A generalized control scheme for active front-end multilevel converters*. Obtenido de <https://ieeexplore.ieee.org/document/975887>
- Hernández, R., Fernández, C., & Baptista, P. (2010). *METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN*. México: McGrawHill.
- HPAC Engineering. (2013). *NEMA Standards Are Giving Motor Bearings the Shaft*. Obtenido de <https://www.hpac.com/motors-drives/nema-standards-are-giving-motor-bearings-shaft>
- IEEE. (2014). *IEEE 519-2014 - Prácticas y requisitos recomendados por IEEE para el control de armónicos en sistemas de energía eléctrica*. Obtenido de <https://standards.ieee.org/content/ieee-standards/en/standard/519-2014.html>
- Institution of Engineering and Technology (IET) . (2015).
- Instituto de energía y termodinámica - UPB. (2015).
- Mamani Conto, E. (2011). *ANALISIS DEL METODO DE CONTROL REGENERATIVO DE FRENTE ACTIVO (AFE) EN VARIADORES DE FRECUENCIA*. Obtenido de http://cybertesis.uni.edu.pe/bitstream/uni/9616/1/mamani_ce.pdf

- Mejía López, W. (2015). *Caracterización de corrientes de rodamientos en motores de inducción de Jaula de Ardilla alimentados por variadores de velocidad*. Obtenido de Universidad Nacional de Colombia: <http://bdigital.unal.edu.co/48444/1/1018422900.2015.pdf>
- Mejía, W. (2015). *Caracterización de corrientes de rodamientos en motores de inducción de Jaula de Ardilla alimentados por variadores de velocidad*. Obtenido de <http://bdigital.unal.edu.co/48444/1/1018422900.2015.pdf>
- Meléndez, J., Herraiz, S., & Colomer, J. (2005). *Calidad de onda en el servicio eléctrico*. Obtenido de Universitat de Girona.
- Motor. (2014). *Diseño y Categoría en Motores Eléctricos* . Obtenido de <http://www.motortico.com/biblioteca/MotorTico/2014%20FEB%20-%20Diseno%20y%20Categoria%20en%20Motores%20Electricos.pdf>
- MTE Corporation. (2008). *Línea RL/Reactores de carga*.
- Murillo, W. (2016). *Mantenimiento Predictivo para Motores Eléctricos*. Obtenido de <https://docplayer.es/4601174-Mantenimiento-predictivo-para-motores-electricos-ing-william-murillo.html>
- Navarro, P. (2017). *Implementación del accionamiento de velocidad variable para optimizar la productividad de la planta Ace EIRL*. Obtenido de https://repositorio.continental.edu.pe/bitstream/continental/4173/3/INV_FIN_109_TE_Navarro_Rojas_2017.pdf
- Peralta Núñez, G. (2009). *DIAGNOSTICO DE FALLAS EN MOTORES DE INDUCCIÓN*. Obtenido de <http://repositorio.uncp.edu.pe/bitstream/handle/UNCP/3559/Peralta%20Nu%C3%B1ez.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

Picazo Ródenas, M. (2016). *DIAGNÓSTICO DE MÁQUINAS ELÉCTRICAS MEDIANTE TÉCNICAS DE TERMOGRAFÍA INFRARROJA*. Obtenido de UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA-DPTO. DE INGENIERÍA ELÉCTRICA:
<https://es.scribd.com/document/352736657/PICAZO-Diagnostico-de-Maquinas-Elctricas-Mediante-Tecnicas-de-Termografia-Infrarroja>

Quiñonez, M. (2010). *"CRITERIOS PARA LA SELECCIÓN DE UN MOTOR Y CONTROLES ELECTRICOS COMO PREVENCION DE RIESGOS EN LA INDUSTRIA*. Obtenido de ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL- Facultad de Ingeniería Eléctrica y Computación:
<https://www.dspace.espol.edu.ec/bitstream/123456789/10967/3/MIGUEL%20GEOVANNY%20QUI%20C3%91ONEZ%20ESPA%20C3%91A.doc>

Rockwell Automation. (1998). *Fundamentos de Protección*. Obtenido de http://www.infopl.net/files/documentacion/motion_control/infopl_net_icg_wp001_es_p.pdf

Schneider electric . (2015). *Manual Calidad de energía*.

SIEMENS. (2010). Obtenido de https://www.siemens.com/investor/pool/en/investor_relations/siemens_ar_2010.pdf

VEM motors GmbH . (2015). *Motores trifásicos asíncronos para baja tensión con rotor de jaula y para baja tensión con rotor de anillos colectores*. Obtenido de https://www.vem-group.com/fileadmin/content/pdf/Produkte_Komponente/Niederspannung/Downloads/buw_es.pdf

ZVL Slovakia. (2017). *Rodamientos para motores eléctricos*.

DECLARACIÓN Y AUTORIZACIÓN

Yo, **Canales Cevallos, Iván Mesías**, con C.C: 060298034-4 autor del trabajo de titulación: **Estudio Análisis de los efectos que causan los armónicos en los motores a inducción cuando usan los variadores de frecuencia**, previo a la obtención del Título de Ingeniero Eléctrico-Mecánica con Mención en Gestión Empresarial Industrial de la Universidad Católica de Santiago de Guayaquil.

1.- Declaro tener pleno conocimiento de la obligación que tienen las instituciones de educación superior, de conformidad con el Artículo 144 de la Ley Orgánica de Educación Superior, de entregar a la SENESCYT en formato digital una copia del referido trabajo de titulación para que sea integrado al Sistema Nacional de Información de la Educación Superior del Ecuador, para su difusión pública respetando los derechos de autor.

2.- Autorizo a la SENESCYT a tener una copia del referido trabajo de titulación, con el propósito de generar un repositorio que democratice la información, respetando las políticas de propiedad intelectual vigente.

Guayaquil, 14 de marzo del 2019

Canales Cevallos, Iván Mesías

C.C:060298034-4



REPOSITORIO NACIONAL EN CIENCIA Y TECNOLOGÍA

FICHA DE REGISTRO DE TESIS/TRABAJO DE TITULACIÓN

TEMA Y SUBTEMA:	Análisis de los efectos que causan los armónicos en los motores a inducción cuando usan los variadores de frecuencia.		
AUTOR(ES)	Canales Cevallos, Iván Mesías		
REVISOR(ES)/TUTOR(ES)	Echeverria Parra, Ricardo Xavier		
INSTITUCIÓN:	Universidad Católica de Santiago de Guayaquil		
FACULTAD:	Facultad de Educación Técnica para el Desarrollo		
CARRERA:	Ingeniería en Eléctrico-Mecánica		
TÍTULO OBTENIDO:	Ingeniero Eléctrico-Mecánica con Mención en Gestión Empresarial Industrial		
FECHA DE PUBLICACIÓN:	14 – marzo - 2019	No. DE PÁGINAS:	108
ÁREAS TEMÁTICAS:	Máquinas eléctricas, control eléctrico, control electrónico		
PALABRAS CLAVES/KEYWORDS:	Armónicos, rodamientos, Motor inducción, Mantenimiento predictivo, variador. AFE		

RESUMEN/ABSTRACT (150-250 palabras):

El presente trabajo aborda las causas de fallas por efectos de armónicos, que las cargas domésticas e industriales contienen cada vez más circuitos electrónicos que se alimentan de corriente que no es senoidal pura, donde se tiene como objetivo principal desarrollar un contexto operacional para minimizar los daños que presenta los armónicos en los motores de inducción. Así, por ejemplo, los motores utilizan cada vez más la regulación de frecuencia, que requiere un paso de corriente alterna a corriente continua (rectificadores, onduladores, etc.) e inclusive para realizar transformaciones CC-CA. La metodología aplicada en este trabajo corresponde a la descriptiva por cuanto estudia los armónicos, y posibles tecnologías y técnicas para solucionar los mismos, emplea el método de campo y posteriormente el método analítico por cuanto a través de levantamiento de información obtenidas en máquinas rotatoria de una industria típica, es posible determinar causas o fallas ubicando las cargas no lineales en un plano unifilar, para plantear soluciones como colocar reactancias, cables apantallados y que los



motores consten con sus respectivos rodamientos de cerámicas, consiguiendo minimizar el efecto de armónicos en los motores y prolongando la vida útil de las maquinas rotatorias.

ADJUNTO PDF:	<input checked="" type="checkbox"/> SI	<input type="checkbox"/> NO
CONTACTO CON AUTOR/ES:	Teléfono: +593-4-(2729442)	E-mail: (ivan_mesias38@hotmail.com)
CONTACTO CON LA INSTITUCIÓN (COORDINADOR DEL PROCESO UTE):	Nombre: Orlando Philco Asqui	
	Teléfono: +593-980960875	
	E-mail: luis.philco@cu.ucsg.edu.ec	
SECCIÓN PARA USO DE BIBLIOTECA		
Nº. DE REGISTRO (en base a datos):		
Nº. DE CLASIFICACIÓN:		
DIRECCIÓN URL (tesis en la web):		