



REPÚBLICA DE CUBA
MINISTERIO DE EDUCACIÓN SUPERIOR
INSTITUTO SUPERIOR MINERO METALÚRGICO DE MOA
“Dr. Antonio Núñez Jiménez”

Trabajo de Diploma

En opción al Título de Ingeniero Eléctrico

**Título: INFLUENCIA DE LOS ARMÓNICOS EN LA EFICIENCIA DE
LOS ACCIONAMIENTOS CON VARIADORES DE VELOCIDAD EN
LA EMPRESA COMANDANTE ERNESTO CHE GUEVARA DE MOA.**

Diplomante: Dichelton Alvarez Leyva

Tutores: Dr. C. Luis Delfín Rojas Purón

Ing. Emilio Santiesteban Fonseca

Curso, 2009-2010

“Año 52 de la Revolución”



INSTITUTO SUPERIOR MINERO METALÚRGICO DE MOA

“Dr. Antonio Núñez Jiménez”

FACULTAD DE METALURGIA ELECTROMECAÁNICA

DEPARTAMENTO DE ELÉCTRICA

INFLUENCIA DE LOS ARMÓNICOS EN LA EFICIENCIA DE LOS ACCIONAMIENTOS CON VARIADORES DE VELOCIDAD EN LA EMPRESA COMANDANTE ERNESTO CHE GUEVARA DE MOA.

Diplomante: Dichelton Alvarez Leyva

Tutores: Dr. C. Luis Delfín Rojas Purón

Ing. Emilio Santiesteban Fonseca



DECLARACIÓN DE AUTORIDAD

Yo: Dichelton Alvarez Leyva.

Autor de este trabajo de Diploma tutorado por el Dr. C. Luis Delfín Rojas Purón y el Ing. Emilio Santiesteban Fonseca, certifico la propiedad intelectual a favor del Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa “Dr. Antonio Núñez Jiménez”, el cual podrá hacer uso del mismo para fines docentes y educativos.

Dichelton Alvarez Leyva

(Diplomante)

Dr. C. Luis Delfín Rojas Purón

(Tutor)

Ing .Emilio Santiesteban Fonseca

(Tutor)



Agradecimientos

A la hora de agradecer no solo se agradece si no que también se deja incrustado en cada expresión la forma más sencilla de tener en cuenta el valor más colectivo y justo de la humanidad, que es la amistad.

Agradezco a todas las personas que de una forma u otra me han ayudado a desarrollar este Trabajo de Diploma principalmente a mis tutores Dr. C. Luis Delfín Rojas Purón y al Ing. Emilio Santiesteban Fonseca por su ayuda incondicional ante el trabajo de enseñarme todo el conocimiento que ambos poseen.

También especialmente a los profesores Ing. Yordan Guerrero Rojas y al Dr. C. Michel Roberto García Avilés por darme apoyo cuando más lo he necesitado.



Dedicatoria

A la memoria de mi padre Alberto Álvarez Zalazar

.....A mis amigos y a todas aquellas personas que me quieren.



Resumen

El trabajo aborda el estudio de la influencia de los armónicos en la eficiencia de los variadores de velocidad en los accionamientos eléctricos en la Planta de Lixiviación de la empresa Cmdte. Ernesto Che Guevara de Moa.

Para esto se desarrolla una metodología que incorpora la evaluación técnico-económica de las pérdidas en los principales componentes de los accionamientos eléctricos alimentados por variadores de velocidad.

Se elabora una base de datos a partir de mediciones directas desde la planta, y se proponen filtros para compensar los reactivos en los circuitos de potencia que incluyen el comportamiento de las variables del inversor de tensión, del motor de inducción, así como del mecanismo industrial (en este caso, las bombas centrífugas).



ABSTRACT

The work approaches the study of the influence of the harmonic in the efficiency of the electric drives in the workings in the plant of leaching out of the company Cmdte. Ernesto Che Guevara of Moa.

For this a methodology is developed that incorporates the technician-economic evaluation of the losses in the main components of the inverter fed induction motor drives.

A database is elaborated starting from direct mensurations from the plant, and they intend filters to compensate the reagents in the circuits of power that they include the behavior of the inverter fed induction motor drives, as well as of the industrial mechanism (in this case, the centrifugal pumps).



Índice

DECLARACIÓN DE AUTORIDAD	I
Agradecimientos	II
Dedicatoria.....	III
Resumen.....	IV
ABSTRACT	V
Índice.....	VI
Introducción general.	9
Situación problemática.	10
Problema.	10
Problema científico.....	11
Hipótesis.....	11
Objetivo.	11
Objetivos específicos.	11
Capítulo I Caracterización de los accionamientos eléctricos	12
1.1 Introducción.....	13
1.2 Caracterización general de la empresa.....	13
1.3 Esquema y síntesis del flujo tecnológico en la Planta de Lixiviación.....	14
1.4 Caracterización del sistema de suministro eléctrico de la Planta de Lixiviación.....	19
1.5 Características del variador de velocidad.....	23
1.5.1 Comportamiento energético del variador de velocidad.....	25
1.6 Conclusiones parciales del capítulo.	29
Capítulo II Calidad de energía en los variadores de velocidad	30
2.1 Introducción.....	32
2.2 Conceptos y definición sobre armónicos.....	32
2.2.1 Definición.....	34
2.2.2 Armónicos de corriente.....	37
2.2.3 Armónicos de tensión.	38
2.3 Clasificación de las perturbaciones en la tensión y en la corriente.	42



2.4 Normas técnicas y sus antecedentes.....	45
2.4.1 Norma nacional.....	48
2.5 Efecto de los armónicos en los componentes de los accionamientos de la Planta de Lixiviación y Lavado.....	49
2.5.1 Calentamientos.....	49
2.5.2 Fallos de operación.....	53
2.5.3 Efecto de las armónicas homopolares.....	54
2.6 Acciones de prevención y corrección de los efectos de los armónicos (soluciones).....	55
2.6.1 Filtros de eliminación de armónicos.....	57
2.7 Conclusiones parciales del capítulo.....	64
Capítulo III Resultados experimentales del estudio	65
3.1 Introducción.....	66
3.2 Mediciones. Planificación y equipamiento utilizado.....	67
3.2.1 Programación de las mediciones.....	67
3.2.2 Características del equipamiento utilizado.....	68
3.2.3 Puntos donde se han realizado las mediciones.....	70
3.3 Análisis de los armónicos generados.....	70
3.4 Propuesta de solución.....	77
3.4.1 Diseño y características específicas de los filtros para su selección.....	78
3.4.2 Ecuaciones generales para el diseño de un filtro sintonizado simple.....	79
3.4.3 Cálculo del filtro en el diseño (Filtro sintonizado simple).....	83
3.4.4 Cálculo de la eficiencia en el accionamiento.....	87
3.5 Conclusiones parciales del capítulo.....	93
Capítulo IV Valoración económica del trabajo	94
4.1 Introducción.....	95
4.2 Evaluación de las pérdidas por el consumo de armónicos.....	95
4.3 Análisis económico de los resultados obtenidos.....	97
4.3.1 Cálculo de los costos.....	97
4.3.2 Cálculo de los parámetros económicos VAN y TIR.....	100
4.4 Conclusiones parciales del capítulo.....	102
Conclusiones generales.....	103



Recomendaciones	104
Bibliografía	105
Anexos	108
Anexo II	
Anexo III	



Introducción general

[\(Volver\)](#)

Este trabajo constituye un estudio para mostrar la influencia de la calidad de la energía en la eficiencia de los sistemas de accionamientos de motores de inducción con bombas centrífugas, en la Planta de Lixiviación de la empresa Cmdte. Ernesto Che Guevara.

Conociendo que más del 60 % de la energía total que se consume en la industria es a costa de los accionamientos eléctricos con motores de inducción, y de estos más del 55 % lo constituyen los accionamientos de bombas centrífugas; se estima además que más del 20 % de la energía que se puede ahorrar está asociada con el mejoramiento del rendimiento en los motores y los subsistemas mecánicos, entonces tiene importancia atender cualquier medida que técnicamente se justifique y contribuya a mejorar los índices de rendimientos de estos sistemas.

La industria cubana del níquel inmersa en un creciente y constante ascenso en sus producciones, demanda cada vez más un apreciable consumo de energía cuyos portadores deciden la rentabilidad de sus empresas, que están entre los once más grandes consumidores de energía eléctrica del país.

Para cumplir estos lineamientos a mediano y largo plazo, se requiere que paralelamente al crecimiento progresivo se perfeccionen los parámetros y regímenes de trabajo de las instalaciones tecnológicas para explotar de una forma más racional y eficiente las grandes reservas de recursos minerales existentes en los yacimientos niquelíferos en la parte oriental de Cuba y se perfeccione el sistema de transportación de minerales lo que garantizará la existencia de un proceso productivo continuo.

El costo de producción del Níquel por el proceso CARON está incrementado en gran medida por el elevado consumo energético. En el tratamiento de las pulpas lateríticas incide, además, una baja eficiencia de los accionamientos eléctricos cuya causa se requiere precisar para disminuir los costos e incrementar su fiabilidad.

Situación problemática

[\(Volver\)](#)

En un apreciable por ciento de los accionamientos eléctricos en la industria del níquel cubana están presentes los variadores de velocidad, y en particular en la empresa Cmdte. Ernesto Che Guevara de Moa es más sensible el hecho de *no tener instalados en todos los lugares dispositivos de filtrados* para atenuar la contaminación de la presencia de armónicos en las redes de potencia eléctrica.

El uso de accionamientos de velocidad variable con Motores Asincrónicos (MA) crece cada día. Las pérdidas debido a la presencia de armónicos de orden superior, introducidos por las fuentes moduladas por ancho de pulso (PWM); juegan un papel importante en la distribución de las pérdidas en todo el sistema de accionamiento eléctrico [3].

La evaluación de estas es fundamental para la correcta selección de los motores de inducción en aplicaciones donde se requiere alto desempeño dinámico y un amplio rango de velocidad (por ejemplo la tracción eléctrica). [3]. La determinación de las pérdidas puede realizarse mediante ensayos de vacío y corto circuito. Estos ensayos están normalizados por ejemplo IEEE-Std 112-1996, IEC 34-2, solo para tensiones de alimentación senoidales.

Las pérdidas en el cobre del rotor y las producidas en el hierro forman un conjunto dentro de las pérdidas en vacío. La separación de este conjunto no es tarea fácil en el caso de que el motor asincrónico se encuentre alimentado con una fuente de tensión a PWM. Además muchos autores aseguran [7][9], que si el motor de inducción está alimentado por una fuente de tensión a PWM, las pérdidas no pueden despreciarse como en el caso de la alimentación ideal sinusoidal, debido a las pérdidas introducidas por los armónicos de orden superior.

Problema

Bajo este entorno se presenta la problemática de conocer cómo influye la presencia de armónicos en la eficiencia de los accionamientos de motores de inducción que accionan bombas centrífugas encargados de transportar pulpa laterítica.



Problema científico

Ausencia de un método que incluya en la evaluación de la eficiencia de los accionamientos eléctricos de bombas centrífugas, al variador de velocidad, el motor eléctrico y la carga mecánica.

Hipótesis

[\(Volver\)](#)

Mediante la caracterización de todo el accionamiento eléctrico en las condiciones de explotación minero metalúrgicas de Moa, se puede indicar una metodología para evaluar la eficiencia en estos sistemas donde se incluye la influencia de la calidad de energía.

Objetivo

Se tiene como objetivo ofrecer una metodología para mostrar la influencia de la presencia de armónicos en la eficiencia de los accionamientos eléctricos con variadores de velocidad.

Objetivos específicos

- Describir el sistema de accionamiento eléctrico.
- Ofrecer una metodología para evaluar la calidad de energía en los accionamientos eléctricos.
- Evaluar la influencia de la presencia de armónicos en la eficiencia de los accionamientos eléctricos.
- Mostrar resultados experimentales donde se reflejan la calidad de energía de los accionamientos eléctricos de una planta industrial.
- Evaluación económica del estudio realizado.



Capítulo I

Caracterización de los accionamientos eléctricos



- 1.1 Introducción
- 1.2 Caracterización general de la empresa
- 1.3 Esquema y síntesis del flujo tecnológico en la Planta de Lixiviación
- 1.4 Caracterización del sistema de suministro eléctrico de la empresa
- 1.5 Variador de velocidad
 - 1.5.1 Comportamiento energético del variador de velocidad
- 1.6 Conclusiones parciales del capítulo

1.1 Introducción

[\(Volver\)](#)

El marco teórico-metodológico como parte importante en la caracterización del objeto de estudio permite detectar de forma preliminar las diferentes características e interacciones que existen entre los múltiples elementos vinculados presentes en la investigación a realizar. [\[30\]](#)

En este capítulo se realizará una caracterización de la empresa Cmdte. Ernesto Che Guevara así como su sistema de suministro eléctrico. Además el variador de velocidad que se ha realizado el análisis de los armónicos ubicado en la Planta de Lixiviación y Lavado en la caseta #4 en el tanque SD-131^a de la 3^{ra} etapa de lixiviación en las bombas de fondo BO-133^a y BO-134^a se estudiará su comportamiento energético, el cual es un Altivar 68 de la marca Telemanique. Además del esquema y síntesis del flujo tecnológico simplificado de la Planta de Lixiviación de la fábrica.

1.2 Caracterización general de la empresa

[\(Volver\)](#)

La fábrica de níquel “Comandante Ernesto Che Guevara” se encuentra ubicada al norte del yacimiento mineral de punta gorda, provincia de Holguín, en la costa norte, a 4 Km. de la ciudad de Moa, Cuba. Desde su puesta en marcha en enero de 1986, su explotación ha sido muy importante para la economía del país, lo que ha favorecido el desarrollo de la zona y el progreso económico y social al generar empleo e inversiones.

El esquema tecnológico esta basado en la lixiviación carbonato-amoniaca de mineral reducido denominado también proceso **Caron**. La parte productiva está formada por 5 plantas con una pequeña instalación para la separación de cobalto. La cercanía de las reservas minerales y la reciente modernización de los 24 hornos de reducción han permitido el ascenso ininterrumpido de la producción siendo sus productos finales el oxido de níquel sintetizado, polvillo y sulfuro enriquecido mixto de níquel más cobalto. La fábrica cuenta para la calificación de calidad de su producción con un laboratorio químico con equipos modernos y personal especializado en la rama de la producción del níquel. Completan el sistema productivo varias plantas auxiliares para el suministro de agua, aire, vapor, amoníaco, etc.

1.3 Esquema y síntesis del flujo tecnológico en la Planta de Lixiviación

[\(Volver\)](#)

La función fundamental de la Planta de Lixiviación y Lavado radica en extraer el níquel y el cobalto del mineral reducido mediante la adicción de aire en un medio de carbonato amoniacal, o sea la lixiviación es el paso del níquel y el cobalto oxidado hacia el licor carbonato amoniacal. Para esto cuenta con 3 tanques de contactos con 3 ventiladores cada uno, 59 turboaeradores y 17 sedimentadores cada uno de ellos cuenta a su vez con 2 bombas de reboso y 2 bombas de vacío fondo. Tiene además un área de enfriamiento de licor y un sistema de absorción de amoníaco con 6 bombas y 3 ventiladores.

El mineral reducido desde cada horno se recoge en un transportador rotatorio que lo lleva al enfriador de tambor sumergido parcialmente en agua para enfriarlo desde 473 °K (200 °C) hasta 393 °K (120 °C) y mezclarlo con licor amoniacal de retorno en el canal de prelixiviación del cual pasa al tanque de contacto.

En cada etapa (de tres) de la lixiviación, el mineral presenta densidad variable, en la que se encuentran turboaeradores y sedimentadores conectados en serie. El turboaerador es un reactor químico con agitación intensa, cuya función primaria es inyectar aire a baja presión, cuya magnitud va estar regida por el tonelaje de mineral que entrega los hornos de reducción.

Este aire es introducido por la parte inferior del reactor en forma de bolas pequeñas y su cantidad debe ser el triple del que se absorbe en la parte superior del mismo, a fin de garantizar las reacciones de oxidación del níquel, hierro y cobalto, así como una presión negativa, establecida por los ciclones de tiro inducido en cada reactor, debido a que si fuese mayor, arrastraría pulpa para el circuito de absorción, y fuese menor, traería consigo el llamado fenómeno de “turbo positivo”, que provoca un escape de amoníaco a la atmósfera.

El oxígeno disuelto reacciona con las partículas pequeñas de la parte metálica presente en el mineral y forma el óxido de níquel. Cuando se forman las capas de óxido sobre las partículas del metal de níquel, las moléculas reactivas de óxido de níquel entran en combinación química con las soluciones de amoníaco para formar el complejo Carbonato-Amoniacal de Níquel.

El esquema del proceso tecnológico simplificado en la Planta Lixiviación se muestra en la siguiente figura:

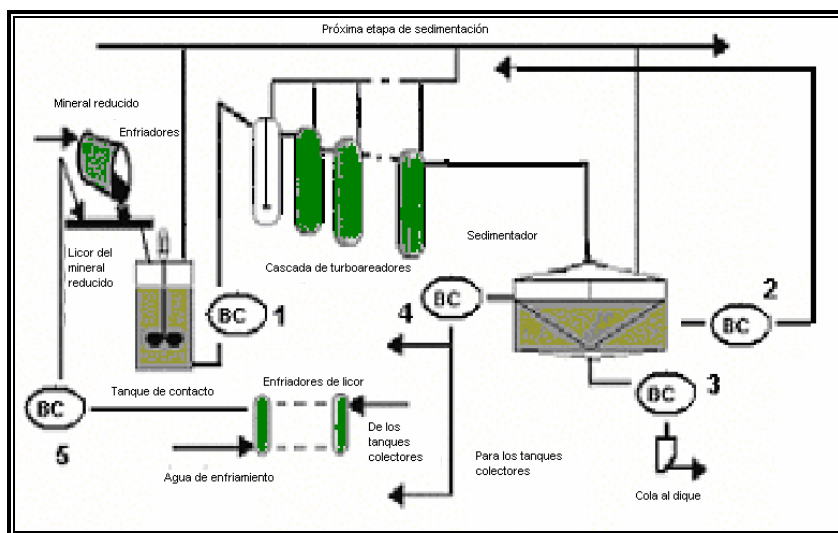


Figura 1.1: Diagrama del proceso tecnológico de la Planta de Lixiviación en la empresa Cmdte. Ernesto Che Guevara de Moa, Holguín.

Es adecuado aclarar de la figura anterior los accionamientos de bombas de pulpas, indicados con los números 1, 2, 3, 4 y 5. 1: accionamiento de bombeo a la salida del tanque de contacto; 2: accionamiento de bombeo desde el fondo de los tanques sedimentadores a otra etapa de turboareadores; 3: accionamiento de bombeo de pulpas de colas al dique; 4: accionamiento de

bombeo a los tanques colectores; 5: accionamiento de bombeo al canal de pre-lixiviación para realimentar al tanque de contacto. El estudio se realizó en el accionamiento 3 exactamente en la 3^{ra} etapa de lixiviación (en el tanque de sedimentación de la línea A).

Es preciso resaltar, que tanto la densidad como la temperatura de la pulpa son variables importantes en este proceso de reacciones porque afecta la cantidad de magnesio que entra en la solución, la misma también afecta la solubilidad del hierro en general. Cuanto más baja es la densidad de la pulpa, mayor será la cantidad del hierro disuelto inicialmente. Cuanta más alta es la densidad, mayor será la disolución del oxígeno procedente del aire, introducido a los turboareadores. De ahí la importancia del control de la densidad de la pulpa en el proceso, y por lo tanto su incidencia en la eficiencia del mismo.

Después de la cascada de turboareadores de cada etapa, y antes de caer por gravedad al sedimentador, la pulpa pasa a través de un electroimán (floculador) con el objetivo de aglomerar las partículas de hierro magnesio y de esta forma, aumentar la velocidad de sedimentación.

El sedimentador es un tanque de forma cilíndrica con un diámetro nominal de 50 m y una altura de la parte cilíndrica del depósito de 5,5 m. Este es utilizado con el fin de separar los sólidos del líquido, funcionando a través del principio de decantación, disponiendo también de un dispositivo de descarga, bombeando una parte para la recuperación de amoníaco y la otra para la sección de enfriamiento o tanques colectores, con el objetivo de incorporarse nuevamente al proceso.

Los sólidos sedimentados son llevados para el cono central y enviados fuera por la parte inferior del mismo, en forma de pulpa.

Luego de la segunda etapa de lixiviación las colas se dividen y se dirigen hacia dos sistemas paralelos de cinco etapas de lavado, el cual se realiza con el licor carbonato amoniacal fuerte y fresco que se aplica en la tercera etapa de lavado.

El licor se evacua desde el sistema de lixiviación y lavado por dos puntos en forma de licor producto después de la primera etapa de lixiviación; y en forma de la fase líquida de la pulpa de cola desde la quinta etapa de lavado. Este licor producto y la pulpa de colas se bombean a la Planta de Recuperación de Amoníaco donde se extrae el níquel en forma de carbonato básico y se recupera el amoníaco.

La investigación de los armónicos en los accionamientos eléctricos de bombas en esta empresa se realiza en la 3^{ra} etapa de lixiviación en el tanque sedimentador SD-131^a en la figura 1.1 indicado



con el número 3 donde la pulpa se transporta con densidad variable, debido a que sus componentes se encuentran mezclados.

El estudio se centra en la influencia de los armónicos en la eficiencia de los accionamientos con motor de inducción que acciona bombas centrífugas de marca PB-315, con rodete de trabajo cerrado, encargada de enviar pulpa con temperaturas de 60 a 90 °C en La Planta de Lixiviación y Lavado de la empresa Cmdte. Ernesto Che Guevara de Moa, Holguín, Cuba.

Partes del licor proveniente desde la segunda etapa de lixiviación, la primera etapa y de los tanques colectores se enfría en los enfriadores de licor con agua y se dirigen al canal de prelixiviación para mezclarse con el mineral reducido.

Los gases que se evacuan desde los resecadores, así como productos de la aspiración se dirigen al sistema de captación de amoníaco, consistente en tres líneas paralelas de absorción (cinco en cada línea) que son regados con agua. Finalmente el licor amoniacal débil obtenido se enfría en el lavado y se aplica en la quinta etapa del mismo.

El licor producto pasa por tres etapas de aeración en la Planta de Recuperación de Amoníaco, con el fin de oxidar y precipitar el hierro, el cual es filtrado y enviado a los alambiques y pasando de plato a plato es tratado con vapor que se introduce a contracorriente por la parte inferior.

Durante este proceso el amoníaco se elimina del licor y se precipita el Carbonato Básico de Níquel. La pulpa de carbonato es enviada a los espesadores, el reboso de los mismos es filtrado en los filtros de cartucho y el flujo de la parte inferior en los discos de vacío. La pulpa de cola es enviada para ser destilada en los alambiques y el producto de desecho se bombea al depósito de colas.

Los gases de la destilación del licor producto y de las pulpas de colas después de haberse enfriado previamente, se envían al sistema de absorción para obtener un licor amoniacal fuerte. Este sistema está compuesto por cuatro líneas paralelas de torres de absorción unidas en serie que son regadas tanto por agua como por licor de retorno y que constituyen la primera etapa de absorción.

El licor amoniacal fuerte obtenido en el sistema de absorción se emplea en el sistema de lavado y se alimenta a la tercera etapa, las pérdidas de amoníaco se compensan suministrando $\text{NH}_4 \text{OH}$ del depósito al sistema de absorción. Otro componente que forma parte de la Planta de Lixiviación es lo

que se conoce en la empresa como Planta de Cobalto, la cual constituye un esquema corto de la misma. En esta se obtiene Ni y Co, en forma de sulfuro como resultado de la dosificación del licor producto como Hidrosulfuro de Amonio, rebajando el contenido de cobalto en el producto final de la Planta de Sínter. En la actualidad a pasado a ser un producto de salida más de la empresa con un mercado estable.

Los Enfriadores de licor tienen la función de enfriar la solución utilizada en los tanques de contacto, lo que ayuda a mantener la temperatura de la pulpa en un limite permitido en el proceso de lixiviación, favoreciendo la solubilidad del oxigeno en los licores, aspecto fundamental para la extracción de níquel y cobalto, evita incrementos en la tensión de vapor de amoníaco encima de los limites prescritos y aumenta la solubilidad del magnesio, factor este, muy negativo en el proceso, debido a que el mismo precipita en los equipamientos y líneas creando una costra endurecida.

El licor a enfriar llega de la primera y segunda etapa de lixiviación con una temperatura aproximada de 321 °K (48 °C), intercambia calor con el medio enfriante, el cual es agua de retorno que llega de los enfriadores de agua con una temperatura de 316 °K (43 °C) saliendo de los enfriadores por la red de retorno. El licor sale de los enfriadores para el tanque de contacto con una temperatura entre 306 °K (33 °C) y 308 °K (35 °C). El mineral reducido, proveniente de los hornos de reducción, es descargado de los enfriadores rotatorios, a una temperatura entre 446 °K (173 °C) y 473 °K (200 °C), con una composición de 1,53 % de níquel, 0,122 % de cobalto, 2,1 % de hierro metálico, 40 a 60 % de hierro magnético, para un total de hierro de 44,6 % además de contener 0,8 % de carbono y 0,6 % de azufre. El mineral reducido tiene una granulometría variada y una densidad de 3 300 a 3 500 kg/m³, su color es prieto.

En los tanques de contacto, el mineral reducido es mezclado con el licor fresco. Este licor, también denominado licor de contacto, tiene una temperatura en el rango de 306 °K a 308 °K (33 – 35 °C) y proviene de los enfriadores de licor. Estos componentes son mezclados en el tanque de contacto a través de un agitador que homogeniza la mezcla, formando una pulpa con una densidad de 1130 a 1140 kg/m³. La pulpa, con una proporción másica de seis partes de licor para una de sólido es bombeada para los distribuidores de pulpa.

Los tanques de contacto son recipientes con un diámetro de 4,80 m y una altura de 3,86 m. La tapa cónica proyectada para servir de soporte al mecanismo de accionamiento. En esa etapa aparece también el sello hidráulico para los gases amoniacales, así como un soporte para los medidores de nivel del tanque y una abertura circular para el mecanismo de accionamiento y el agitador. La masa del recipiente de contacto es de 17162 kg y su altura total es de 7,24 m. La velocidad de rotación del agitador llega a 55 r.p.m. y en régimen permanente, su corriente está entre 30 y 40 A.

El tanque de contacto, consiste en un recipiente con agitador llenado a flujo variable y de este enviado a la sección de unas claves enfriadoras. La otra sección representa la llamada cola o suspensión de sólido residual o desecho lixiviado, enviado desde la Planta de Lixiviación a la Planta de Recuperación de Amoníaco con alto contenido de NH_3 , de igual forma se bombea esta cola desde esta planta a un dique almacenador con bajo contenido de NH_3 . La sección más favorable para la realización de las mediciones debido a su importancia es en la 3ra etapa del proceso de lixiviación exactamente en el tanque sedimentador de la línea A (de 3 existentes A, B y C).

1.4 Caracterización del sistema de suministro eléctrico de la Planta de Lixiviación

[\(Volver\)](#)

En la Planta de Lixiviación y Lavado el suministro de energía a los equipos de fuerza es garantizado por cinco subestaciones transformadora, formada cada una de ellas por dos transformadores de 1.6 MVA, sistema de enfriamiento por aceite, con una tensión nominal por alta de 10.5 kV y por baja de 0.48 kV, una tensión de trabajo de los equipos de fuerza de 440 V. Los transformadores poseen el enrollado primario en delta y el secundario en estrella sólidamente aterrado, sistema TN-C. Cada uno de los transformadores que componen la subestación se alimenta de una sección diferente del centro de distribución. Estos transformadores poseen un enlace secundario (secundario selectivo). Todo esto proporciona una alta seguridad y flexibilidad en el suministro de energía a los equipos de fuerza, estando garantizada la energía para los más importantes, aún en el caso de avería en uno de los transformadores, el otro debe asumir toda la carga de la instalación.

El alumbrado y los sistemas de automática e instrumentación esta garantizada por dos subestaciones de alumbrado 1TP-22 y 1TP-23, con un transformador por subestación, estos transformadores tienen una potencia de 630 kVA. Una tensión nominal por alta de 10,5 kV y por baja 400 V, una tensión trifásica de trabajo de 380 V. Los transformadores poseen el enrollado primario en delta y el secundario en estrella sólidamente aterrado, sistema TN-C, con un sistema de enfriamiento por aceite. Todo el suministro de alumbrado debe tener una tensión de alimentación a 220 V.

Distribución de la energía eléctrica

Para la alimentación eléctrica de todo este equipamiento las subestaciones son: 1SR-2, 1TP-4, 1SR-1, 1SR-3, 1SR-17. Que son las encargadas de suministrar la energía necesaria para el funcionamiento del sistema.

De las cuales se muestra el esquema monolineal a continuación de la sección de barra lugar de ubicación de los motores a los cuales se realizó el análisis de los armónicos. Para más detalle en el anexo I se muestra el monolineal completo actualizado de la planta.

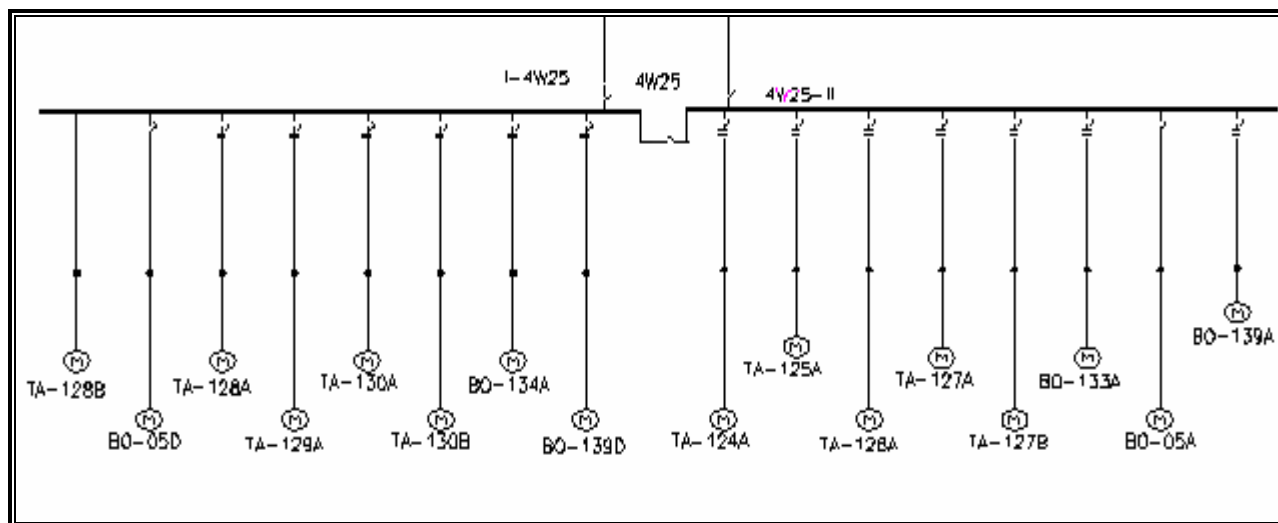


Figura 1.2: Barra donde esta ubicado las bombas BO-133^a y BO-134^a.



Características de los consumidores

La Planta de Lixiviación y Lavado es uno de los principales consumidores de la empresa, los receptores principales son motores asincrónicos que accionan en su mayoría maquinas de flujo en particular bombas centrífugas.

Los motores asincrónicos inciden considerablemente en el factor de potencia y en el rendimiento de la instalación es decir en el aprovechamiento energético y en última instancia en consumo de combustible y en costo de producto final. Tanto el factor de potencia como el rendimiento de estos motores son una función del momento que desarrollan y en última instancia de la potencia aplicada al árbol. También los armónicos influyen en el factor de potencia lo cual es perjudicial en la empresa puesto que un bajo factor de potencia puede esta ser penalizada por la empresa suministradora de energía por lo que se toma medidas para evitarlo.

Los valores de chapa de los motores ubicados en la barra de la figura 1.2 se muestran a continuación:

Tabla 1.1: Datos de los motores de la barra 4W-25.

#	Motores	V (kV.)	P (kW.)	I(A)	PF	Ef	RPM
1	BO-134A	0.44	40	63	0.82	0.91	1200
2	BO-133A	0.44	40	63	0.82	0.91	1200
3	BO-05C	0.44	60	96	0.82	0.91	1200
4	BO-139D	0.44	40	63	0.82	0.91	1200
5	TA-128A	0.44	55	86	0.82	0.91	1800
6	TA-129A	0.44	55	86	0.82	0.91	1800
7	TA-130A	0.44	55	86	0.82	0.91	1800
8	TA-130B	0.44	55	86	0.82	0.91	1800



9	TA-124A	0.44	55	86	0.82	0.91	1800
10	TA-125A	0.44	55	86	0.82	0.91	1800
11	TA-126A	0.44	55	86	0.82	0.91	1800
12	TA-127A	0.44	55	86	0.82	0.91	1800
13	TA-127B	0.44	55	86	0.82	0.91	1800
14	BO-05A	0.44	60	96	0.82	0.91	1200
15	BO-139A	0.44	40	63	0.82	0.91	1200
16	TA- 128B	0.44	40	63	0.82	0.91	1200

Los motores debido a la acción de los armónicos en la red aumentan su corriente de trabajo nominal tanto mayor sea la distorsión en esta debido a que estas se suman pudiendo traer consigo calentamientos en los devanados y por consecuencia fatiga en los enrollados y hasta la ruptura del propio motor. Si la corriente promedio de trabajo del motor es 58 A y el THD I es 12,6 A entonces:

$$I_m = I_n * THDI \quad (1.1)$$

$$I_m = 58A * 12.6A$$

$$I_m = 730.8A$$

Con esta corriente circulando por el motor pudiera darse el caso que afecte a este considerablemente.

1.5 Características del variador de velocidad

[\(Volver\)](#)

El convertidor de frecuencia o más comúnmente llamado (Variador de Velocidad) Altivar 68 de la marca Telemecanique es utilizado en motores asíncronos de elevada potencia, alimentados por una tensión trifásica 380 V a 500 V para las potencias comprendidas entre 75 y 630 kW. El que esta ubicado en la barra 4W-25 de la Planta de Lixiviación en la caseta #4 del SD-131^a de 3^{ra} etapa de lixiviación, en la bomba BO-133^a y BO-134^a son de una potencia de 75 kW.

El Altivar 68 presenta los últimos avances tecnológicos y realiza las funciones necesarias para las aplicaciones más comunes, especialmente:

- Ventilación, climatización
- **Bombas**
- Transporte
- Triturado
- Mantenición



Figura 1.4: Variador de velocidad Altivar 68 ubicado en la Planta de Lixiviación y Lavado de la empresa Cmdte. Ernesto Che Guevara, Moa, Holguín.

Este variador resulta fácil de configurar gracias al terminal de programación y cuenta con pre-configuraciones a medida (macros) cuyos parámetros básicos se pueden modificar libremente para crear funciones adicionales. A pesar de sus amplias prestaciones, el variador Altivar 68 se ajusta de forma sencilla. Para obtener un fuerte torque y una óptima calidad de accionamiento, incluso a

velocidades de rotación mínimas ($< 0,5$ Hz), basta con introducir los valores de la placa del motor y realizar un ajuste automático. Opciones completas y variadas permiten su adaptación y su integración en las instalaciones eléctricas y en los automatismos complejos: Inductancias de línea, inductancias motor, kit de consola remota, unidad de freno opcional, tarjetas de E/S adicionales, etc.

Funciones:

El Altivar 68 cuenta con las siguientes funciones principales:

- 4 Macro configuraciones de funciones (mas de 12 aplicaciones pre-configuradas)
- 4 niveles de ahorro de energía
- Regulador PID integrado (caudal, presión, corrección de velocidad)
- Protecciones del motor y del variador
- Hasta 7 velocidades preseleccionadas, marcha paso a paso (JOG)
- Recuperación automática con búsqueda de velocidad (retoma al vuelo)
- Fuerte sobre par de arranque con limitación de corriente
- Secuencia de control de freno
- Más/menos velocidad
- Frecuencias ocultas
- Función freno integrada sin necesidad del freno opcional
- Adaptación de la limitación de corriente en función de la velocidad, temperatura variada, etc.

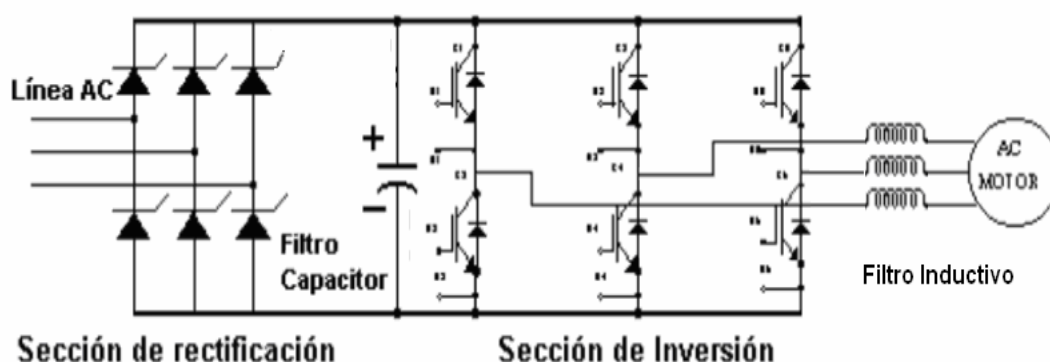


Figura 1.5: Esquema del variador Altivar 68 ubicado en la caseta #4 SD-131ª en la Planta de Lixiviación de la empresa Cmdte. Ernesto Che Guevara.

1.5.1 Comportamiento energético del variador de velocidad

[\(Volver\)](#)

El variador de velocidad en cuanto a su composición presenta en la entrada de alimentación un convertidor tipo puente trifásico controlado como también puede llamarse por tener en su composición 6 elementos semiconductores. Pero los tiristores están conduciendo a 180° es decir trabajan como diodos, los que de forma cíclica rectifican la corriente de AC a DC a una frecuencia de 60 Hz. De forma general el principio de funcionamiento del convertidor estático es conocido.

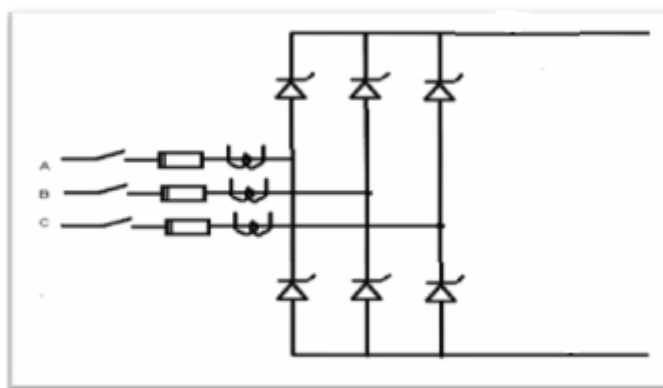


Figura 1.6: Esquema del convertidor AC/ DC.

El variador, además de poseer un convertidor en su estructura, a la salida lleva un dispositivo llamado inversor cuya función no es más que invertir la corriente de salida de directa del convertidor en alterna otra vez pero con una frecuencia diferente a la de entrada. El mismo está formado por seis transistores IGBT con su circuito de mando y por seis diodos conectados en antiparalelo a cada transistor respectivamente.

En la figura 1.10 se muestra el esquema eléctrico de un inversor trifásico alimentando un motor conectada en estrella y en la figura 1.7 las tensiones de cada fase con relación al punto central O y la tensión entre los puntos A y B. Como puede apreciarse, existen seis períodos de conducción diferentes por ciclo, conduciendo en cada período tres transistores diferentes. En la tabla 1.2 se muestran estos períodos de conducción con los transistores que conducen en ellos y las tensiones de línea correspondientes.

El valor y la polaridad de la tensión de línea en cada uno de estos intervalos dependen de los transistores en conducción. Obsérvese lo siguiente:

1. Cada fase tiene dos transistores que la conectan a los terminales positivo y negativo de la fuente. Por ejemplo, el transistor T1 conecta la fase A al terminal positivo y el T4 al negativo.

2. La tensión de línea U_{XY} es igual a $+U_d$ cuando la fase X se conecta al terminal positivo a través de su transistor correspondiente y la fase Y al terminal negativo de la misma forma. Por ejemplo, U_{AB} es igual a $+U_d$ sólo cuando conducen simultáneamente los transistores T1 y T6.

3. La tensión de línea U_{XY} es igual a $-U_d$ cuando la fase X se conecta al terminal negativo a través de su transistor correspondiente y la fase Y al terminal positivo de la misma forma. Por ejemplo, U_{AB} es igual a $-U_d$ sólo cuando conducen simultáneamente los transistores T3 y T4.

4. La tensión de línea U_{XY} es igual a cero cuando ambas fases se conectan al mismo terminal, sea éste positivo o negativo. Por ejemplo, U_{AB} es igual a cero cuando conducen simultáneamente el transistor T1 y el T3 que se conectan al terminal positivo o el T4 y el T6 que se conectan al negativo.

Siguiendo estas reglas puede construirse fácilmente la forma de onda de cualquier tensión de línea. En la figura 1.8 sólo aparece U_{AB} pero en la tabla 1.2 se da la información necesaria para los otros dos.

Es importante determinar también la forma de onda de las tensiones de fase en la carga U_{AN} , U_{BN} y U_{CN} . Para esto se analizará en cada intervalo la distribución de las tensiones en cada fase auxiliándonos de la figura 1.7. [28]

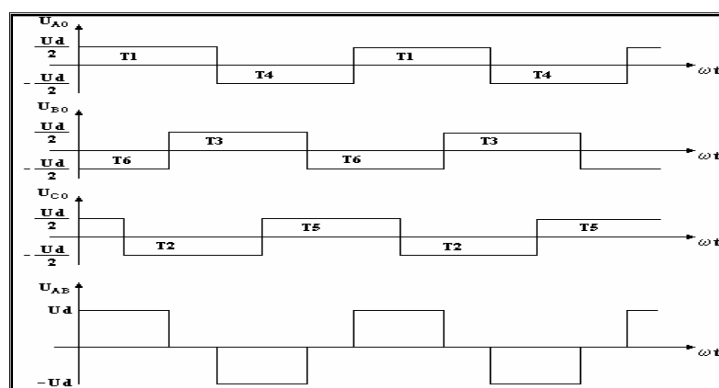


Figura 1.7: Formas de onda en el inversor autónomo trifásico.

Tabla 1.2: Intervalos de conducción de los transistores.

PERIODO	TRANSISTORES.	U_{AB}	U_{BC}	U_{CA}
I	5, 6, 1	U_d	$-U_d$	0
II	6, 1, 2	U_d	0	$-U_d$
III	1, 2, 3	0	U_d	$-U_d$
IV	2, 3, 4	U_d	U_d	0
V	3, 4, 5	U_d	0	U_d
VI	4, 5, 6	0	$-U_d$	0

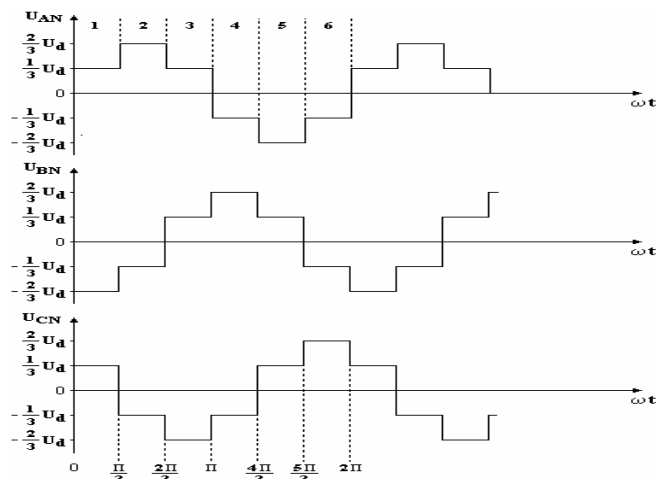


Figura 1.8: Forma de onda de tensión aplicando las reglas anteriores.

PERIODO 1 $0 - \frac{\pi}{3}$ T_5, T_6, T_1	PERIODO 2 $\frac{\pi}{3} - \frac{2\pi}{3}$ T_6, T_1, T_2	PERIODO 3 $\frac{2\pi}{3} - \pi$ T_1, T_2, T_3	PERIODO 4 $\pi - \frac{4\pi}{3}$ T_2, T_3, T_4	PERIODO 5 $\frac{4\pi}{3} - \frac{5\pi}{3}$ T_3, T_4, T_5	PERIODO 6 $\frac{5\pi}{3} - 2\pi$ T_4, T_5, T_6
$U_{AN} = \frac{1}{3} U_d$ $U_{BN} = -\frac{2}{3} U_d$ $U_{CN} = \frac{1}{3} U_d$	$U_{AN} = \frac{2}{3} U_d$ $U_{BN} = -\frac{1}{3} U_d$ $U_{CN} = -\frac{2}{3} U_d$	$U_{AN} = \frac{1}{3} U_d$ $U_{BN} = \frac{1}{3} U_d$ $U_{CN} = -\frac{2}{3} U_d$	$U_{AN} = -\frac{1}{3} U_d$ $U_{BN} = \frac{2}{3} U_d$ $U_{CN} = -\frac{1}{3} U_d$	$U_{AN} = -\frac{2}{3} U_d$ $U_{BN} = \frac{1}{3} U_d$ $U_{CN} = \frac{1}{3} U_d$	$U_{AN} = -\frac{1}{3} U_d$ $U_{BN} = -\frac{1}{3} U_d$ $U_{CN} = \frac{2}{3} U_d$

Figura 1.9: Determinación de las formas de onda de las tensiones de fase. [28]

En la figura 1.9 se muestra la conexión de la carga con relación a la fuente de alimentación para cada uno de los seis períodos de conducción posibles. Se observa que, en todos los casos, existen dos fases en paralelo, con la tercera en serie. Como la tensión de la fuente se divide o distribuye de forma inversa a la impedancia; dos tercios de esta tensión tienen que aparecer en la fase que está sola y el tercio restante en las que se encuentran en paralelo, cuya impedancia es la mitad. Teniendo en cuenta esto se analizó los seis intervalos de conducción posibles y se llegó a las tensiones de fase que aparecen en la figura 1.9.

Las ecuaciones para cada tensión de fase son las siguientes:

$$\begin{aligned} U_{AN} &= \frac{1}{3} \cdot (2 \cdot U_{AO} - U_{BO} - U_{CO}) \\ U_{BN} &= \frac{1}{3} \cdot (2 \cdot U_{BO} - U_{CO} - U_{AO}) \\ U_{CN} &= \frac{1}{3} \cdot (2 \cdot U_{CO} - U_{AO} - U_{BO}) \end{aligned} \quad (1.2)$$

La descomposición en series de Fourier de la onda de tensión de fase es:

$$U_{AN} = \frac{2}{\pi} \cdot U_d \cdot \left[\sin \omega t + \frac{1}{5} \cdot \sin 5 \omega t + \frac{1}{7} \cdot \sin 7 \omega t + \frac{1}{11} \cdot \sin 11 \omega t + \dots \right] \quad (1.3)$$

Obsérvese que debido a la conexión trifásica la tercera armónica y sus múltiplos no aparecen en la tensión de fase. La forma de onda real puede diferir ligeramente de la forma de onda ideal debido a los efectos de conmutación y las caídas de tensión internas en el circuito del inversor.

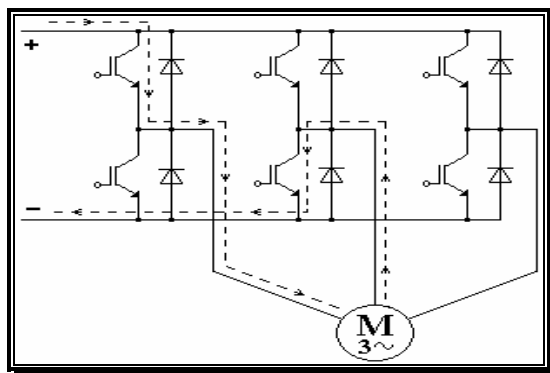


Figura 1.10: Esquema del inversor del Variador.

Este es el circuito inversor que usa la mayoría de los convertidores de frecuencia actuales por lo que la configuración es estándar para estos. Siendo así muy conocido por los que operan con estos y disímiles equipos como este.



1.6 Conclusiones parciales del capítulo

[\(Volver\)](#)

En el capítulo se abordaron los siguientes temas relacionados con los objetivos de la investigación en la cual se llegaron con las siguientes conclusiones:

- Los principales consumidores de la Planta de Lixiviación lo constituyen los accionamientos de bombas centrifugas, de los cuales más del 75 % se alimentan con variadores de velocidad por control escalar.
- Los variadores de velocidad poseen solo filtros inductivos, lo que provoca un consumo apreciable de reactivos y un alto valor de la presencia de armónicos en la red.



Capítulo II

Calidad de energía en los variadores de velocidad



2.1 Introducción

2.2 Conceptos y definición sobre armónicos

2.2.1 Definición

2.2.2 Armónicos de corriente

2.2.3 Armónicos de tensión

2.3 Clasificación de las perturbaciones en la tensión y en la corriente

2.4 Normas técnicas y sus antecedentes

2.4.1 Norma nacional

2.5 Efecto de los armónicos en los componentes de los accionamientos de la Planta de Lixiviación y Lavado

2.5.1 Calentamiento

2.5.2 Fallas de operación

2.5.3 Efecto de las armónicas homopolares

2.6 Acciones de prevención y corrección de los efectos de los armónicos (soluciones)

2.6.1 Filtros de eliminación de armónicos

2.6.1.1 Filtros Activos (Solución Activa)

2.6.1.2 Filtros Pasivos (Solución Pasiva)

2.6.1.3 Filtros Mixtos

2.6.1.4 Filtros de Protección

2.6.1.5 Filtros de Absorción

2.6.1.6 Filtros de Rechazo

2.7 Conclusiones parciales del capítulo



2.1 Introducción

[\(Volver\)](#)

En el presente capítulo se va a realizar un estudio de los conceptos que establecen los armónicos, así como las normas técnicas que rigen la contaminación armónica en una red eléctrica. También los efectos dañinos que estos provocan sobre los equipos y las medidas que debemos adoptar para su eliminación o de cierto modo atenuarlos hasta niveles que estén dentro de normas permisibles puesto que son perjudiciales para todos los que estén conectados a esta.

2.2 Conceptos y definición sobre armónicos

[\(Volver\)](#)

En muchas empresas existentes en nuestro país (Cuba) hay un desconocimiento total de los efectos de los armónicos en sus instalaciones. Este fenómeno eléctrico ha ido en aumento progresivamente y afecta seriamente a los equipos si no se toman las medidas adecuadas para eliminarlos o a lo menos neutralizarlos hasta cierto nivel que no los perjudique dentro de ciertas normas que existen que más adelante hablaremos. El uso de equipos electrónicos modernos ha cambiado nuestras vidas para siempre, proporcionándonos mayor comodidad y dependencia eléctrica tanto en una industria como en nuestros hogares, pero también hay que señalar que este hecho ha cambiado también la característica de la carga en todos los niveles de distribución.

Los armónicos pueden tener su origen en las propias industrias, o bien, en la red de suministro eléctrico al haber sido contaminadas sus redes de distribución por algunos clientes que por condiciones del proceso tecnológico las afectan.

Este aumento de armónicos se ha debido en gran medida al desarrollo de los accionamientos mediante semiconductores electrónicos de potencia, convertidores estáticos (Inversores), hornos de arco, entre otros y las cargas no lineales de media potencia (rectificadores, onduladores, reguladores de corriente alterna, etc.) que absorben de la red corrientes periódicas no sinusoidales. Estas corrientes están formadas por una componente fundamental de frecuencia 60 Hz. más una serie de corrientes superpuestas, de frecuencia múltiples de aquella, que se denomina **armónicos**.

La presencia de dichos armónicos en la red eléctrica en forma general ocasiona una serie de inconvenientes al sistema tales como:

- Sobrecarga en condensadores.
- Disparo intempestivo de algunas protecciones.
- Parpadeo del alumbrado.
- Averías frecuentes.
- Mal funcionamiento de equipos electrónicos.
- Interferencias en las telecomunicaciones.
- Distorsión en la tensión de la red.
- Perturbaciones en los sistemas electrónicos e informáticos.

Este fenómeno se manifiesta especialmente en los equipos provistos de fuentes de alimentación de entrada con condensadores y diodos, por ejemplo, cargadores de batería y otros. Estas perturbaciones que muchas veces las personas encargadas de las instalaciones eléctricas desconocen su origen, no saben que estas pudieran ser de origen armónicos atribuyendo muchos defectos de los motores a otras causas como ruptura de los aisladores y fallas de protección. Además de otras causas como el derrame de agua sobre estos en pleno trabajo ocasionando un cortocircuito en estos. La solución típica es instalar filtros de eliminación de armónicos que están constituidos por filtros de serie “reactancia-condensador”. Es decir, por una parte se debe mejorar el factor de potencia instalando condensadores y por otra parte se deben considerar los filtros para la protección de los mismos condensadores y para la eliminación de armónicos.

La presencia de armónicos puede plantear problemas tanto para los condensadores instalados como para el resto de aparatos conectados a la red. Por un lado las condiciones de trabajo de los condensadores pueden llegar a ser extremadamente duras o inadmisibles y por otro aparecen perturbaciones y distorsiones en el funcionamiento de equipos electrónicos, transformadores y otros. La solución de la compensación de energía reactiva en redes con armónicos se realiza protegiendo los condensadores mediante filtros de protección o reduciendo el nivel de armónicos mediante filtros de eliminación. También se puede pretender reducir el nivel de armónicos de una instalación sin

considerar la corrección del factor de potencia. Pero de todo esto hay que tener en cuenta que los filtros se pueden desintonizar y traer consigo otros perjuicios en la red.

2.2.1 Definición

[\(Volver\)](#)

Se dice que existe Distorsión Armónica Total o llamado también en sus siglas en ingles (THD), cuando la onda sinusoidal, prácticamente pura, que generan las centrales eléctricas sufre deformaciones en las redes de alimentación a los usuarios. Para cuantificar el grado de deformación de una onda de tensión o de corriente que no es sinusoidal pura - aunque sí periódica, con 60 Hz de frecuencia -, se recurre a su análisis frecuencial (en serie de Fourier). Este se lleva a cabo normalmente mediante la Transformada Rápida de Fourier, un algoritmo de cálculo que nos proporciona los contenidos de las diferentes ondas sinusoidales puras que componen la onda deformada.

Ésta se define como el cociente entre el valor eficaz de la onda formada por el conjunto de armónicos y el valor eficaz de la componente fundamental. Designado como I_{ef1} el valor eficaz de la componente fundamental de la corriente I , y como $I_{ef3}, I_{ef5}, \dots, I_{efn}$, Los valores de los distintos armónicos.

La Distorsión Armónica Total (DAT) ó (THD) puede expresarse como:

$$THD_I = \frac{\sqrt{I_{ef2}^2 + I_{ef3}^2 + I_{efn}^2}}{I_{ef1}} = \sqrt{\frac{I_{ef}^2}{I_{ef1}^2} - 1} \quad (2.1)$$

Donde I_{ef1} es el valor eficaz de la corriente total.

La distorsión armónica describe la variación en estado estacionario o continuo en la forma de onda de la frecuencia fundamental. Para esta condición de estado estacionario las frecuencias son múltiplos enteros de la frecuencia fundamental.

Cualquier fenómeno periódico puede ser representado por una serie de Fourier:

$$y(t) = Y_0 + \sum_{h=1}^{h=\infty} Y_h \sqrt{2} \sin(h\omega t - \delta_h) \quad (2.2)$$

Donde:

Y_0 = Es la componente de corriente directa, la cual es generalmente cero en sistemas eléctricos de distribución.

Y_h = Valor rms de la componente (h^{th}) armónica.

δ_h = Ángulo de fase de la componente (h^{th}) armónica cuando $t = 0$.

Los armónicos por encima del orden 23 usualmente son despreciables.

También aparecen en las redes eléctricas otras componentes de la onda de tensión o de corriente que se denominan **interarmónicos**, cuyas frecuencias no son múltiplos enteros de la fundamental. Estos interarmónicos se presentan tanto a unas ciertas frecuencias como en forma de espectro de banda ancha. Son de poca importancia, por lo que generalmente no se les tiene en cuenta pero en ciertas circunstancias se deben tratar aunque es aislado su aparición en la red.

Los armónicos se definen habitualmente con los dos datos más importantes que les caracterizan, que son:

- Su amplitud: hace referencia al valor de la tensión o intensidad del armónico.
- Su orden: hace referencia al valor de su frecuencia referido a la fundamental (60 Hz). Así, un armónico de orden 5 tiene una frecuencia 3 veces superior a la fundamental, es decir $5 * 60 \text{ Hz} = 300 \text{ Hz}$.

El orden el armónico, también referido como el rango del armónico, es la razón entre la frecuencia de un armónico f_h y la frecuencia del fundamental f_1 (60 Hz).

$$h = \frac{f_h}{f_1} \quad (2.3)$$

En la figura 2.1 Se representa una onda de tensión de 60 Hz deformada que contiene únicamente:

- Componente fundamental
- Armónico de orden 5

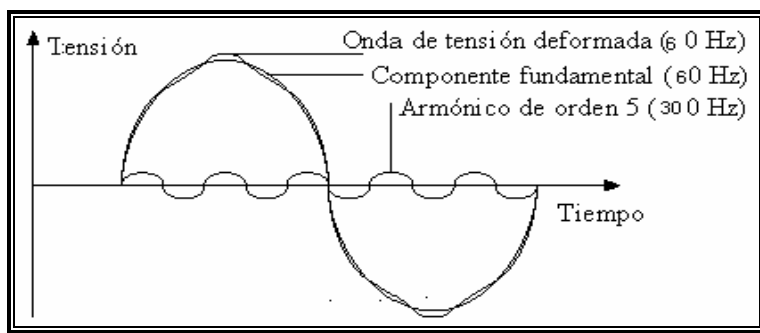


Figura 2.1: Onda de tensión deformada y sus componentes.

Los contenidos o tasas de los diferentes armónicos de tensión que constituyen una onda deformada se expresan en forma de porcentaje respecto de la componente fundamental, de acuerdo con la siguiente relación:

Tasa de distorsión de armónicos (THD – Total harmonic distortion):

$$THD_U(\%) = 100 * \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} (U_h)^2}}{U_1} \quad (2.4)$$

Donde:

I_h : Magnitud de la armónica h de tensión.

I_1 : Magnitud de la onda de tensión a frecuencia fundamental.

También para las corrientes la expresión es:

$$THD_I(\%) = 100 * \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} (I_h)^2}}{I_1} \quad (2.5)$$

Donde:



I_h : Magnitud de la armónica h de corriente.

I_1 : Magnitud de la onda de corriente a frecuencia fundamental.

Los equipos electrónicos han ganado el sobrenombre de "Carga no lineal", debido a su particular característica de consumir corriente no senoidal al aplicársele alimentación senoidal. Con lo cual se produce una distorsión de las señales de tensión y corriente a lo largo del sistema de distribución eléctrica. Produciendo algunos efectos adversos, como lo son:

- Corrientes excedentes por el neutro
- Altos niveles de voltaje de neutro a tierra
- Recalentamiento en transformadores
- Reducción en la capacidad de distribución
- Penalización por bajo factor de potencia

2.2.2 Armónicos de corriente

[\(Volver\)](#)

Un equipo que se alimente de la red eléctrica puede alcanzar corriente armónica hasta un mínimo regulado. Normalmente, antes que se alcance este límite el condensador se recarga hasta el valor de pico en el siguiente semiperíodo de la onda sinusoidal. Este proceso se repite una y otra vez. Básicamente, el condensador sólo absorbe un impulso de corriente durante la cresta de la onda; durante el tiempo restante de la misma, cuando la tensión es inferior al valor residual del condensador, éste no absorbe corriente.

Normalmente las fuentes de alimentación con condensador y diodos que llevan incorporados los equipos de oficina son cargas monofásicas no lineales. En las plantas industriales, por el contrario, las causas más frecuentes de corrientes armónicas son cargas trifásicas no lineales, como motores de accionamiento controlados electrónicamente y fuentes de alimentación ininterrumpidas (UPS).

2.2.3 Armónicos de tensión

[\(Volver\)](#)

Una red de alimentación pudiera ser fuente indirecta de armónicas de tensión. La relación entre la corriente armónica absorbida por cargas no lineales y la impedancia de fuente del transformador de alimentación se rige por la ley de Ohm. [\[2\]](#)

$$Z_h = \frac{U_h}{I_h} (\Omega) \quad (2.6)$$

Lo que provoca armónicos de tensión. La de la fuente la constituyen el transformador de alimentación y los componentes de la línea. Las cargas instaladas a un transformador o una barra con fuente armónica, podrán ser afectadas por los armónicos de tensión producida por los distintos componentes del sistema. El rendimiento de la fuente de alimentación por condensador y diodos depende críticamente de la magnitud del pico de la onda de tensión. Los armónicos de tensión pueden provocar un achatamiento de los máximos de amplitud de la onda de tensión, reduciendo de ese modo el pico de tensión.

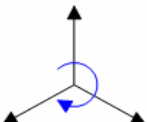
En el entorno industrial, los motores de inducción y los condensadores para corrección del factor de potencia también pueden resultar gravemente afectados por los armónicos de tensión. Los condensadores de corrección del factor de potencia pueden formar un circuito resonante con las partes inductivas de un sistema de corriente. Si la frecuencia resonante es coincidente con la frecuencia de la tensión de armónico, la corriente armónica podrá aumentar considerablemente, sobrecargando los condensadores y quemando los fusibles de éstos. Luego, en caso de ocurrir esto, la falla del condensador desintoniza el circuito y la resonancia desaparece.

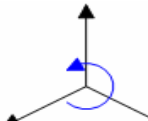
Las combinaciones de armónicos también tienen impacto importante en los accionamientos. Por ejemplo, los armónicos de tensión (5º y 7º) combinados dentro de motores producen un evento que está en el orden del 6º armónico. El armónico originado ocasiona una amplia gama de problemas

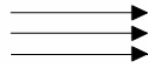
que llevan a elevar la temperatura de motores a límites inadmisibles, vibración y desgaste ocasionando hasta el deterioro (la quema de este). El bajo factor de potencia para cargas no lineales ocurre debido a que la corta duración de la corriente eleva los volt-amperes (VA) sin el correspondiente incremento en los Watts. Como el factor de potencia es igual a los watt (W) divididos por los VA, cualquier aumento en VA sin un aumento correspondiente en los watt conducirá a un factor de potencia menor. Aunque en la empresa Cmdte. Ernesto Che Guevara no ha habido reportes de deterioro de motores por este fenómeno pudiera en algún momento traer consigo hasta la quema de estos.

Generalmente los armónicos provienen de los convertidores estáticos de frecuencia presentes en la propia industria, aunque también pueden ser inyectados a través de la red desde el exterior. En servicio, los convertidores estáticos consumen energía reactiva, que debe ser compensada mediante condensadores, y además generan corrientes armónicas. Cada armónica tiene un nombre, frecuencia y secuencia. La secuencia se refiere al giro del fasor con respecto a la fundamental (f), por ejemplo, en un motor de inducción, la armónica de secuencia positiva generaría un campo magnético que gira en la misma dirección que la fundamental. Una armónica de secuencia negativa giraría en forma contraria.

Dependiendo de su secuencia y rotación, las armónicas presentan diferentes efectos:

1. Secuencia (+):  (3k+1) rotación directa, puede producir calentamiento de conductores, rotura de circuitos, etc.

2. Secuencia (-):  (3k+2) rotación inversa, produce afectaciones en el rotor, además calentamiento de conductores y por ende problemas en el motor.

3. Secuencia (0):  (3k) no tiene sentido de rotación, pero puede causar calentamiento. La secuencia de armónicas cero (múltiplos de la 3ra.) son llamados "homopolares".

Existen dos categorías generadoras de armónicos. La primera es simplemente las cargas no lineales en las que la corriente que fluye por ellas no es proporcional a la tensión. Como resultado de esto, cuando se aplica una onda senoidal de una sola frecuencia, la corriente resultante no es de una sola frecuencia. Invariablemente esta categoría de elementos generadores de armónicos, lo harán siempre que estén energizados con una tensión alterna. Estas son las fuentes originales de armónicos que se generan sobre el sistema de potencia.

El segundo tipo de elementos que pueden generar armónicos son aquellos que tienen una reactancia dependiente de la frecuencia. Para entender esto más fácilmente mencionaremos algunos conceptos previos. En la figura 2.2 se ha representado la variación de la reactancia de una inductancia respecto a la frecuencia.

La fórmula que determina la función de la reactancia inductiva dependiente de la frecuencia es la siguiente:

$$X_L = L * 2 * \pi * f \quad (2.7)$$

Análogamente, en la figura 2.3 se ha representado la misma curva para una reactancia capacitiva:

$$X_c = \frac{-1}{(2 * \pi * f) * C} \quad (2.8)$$

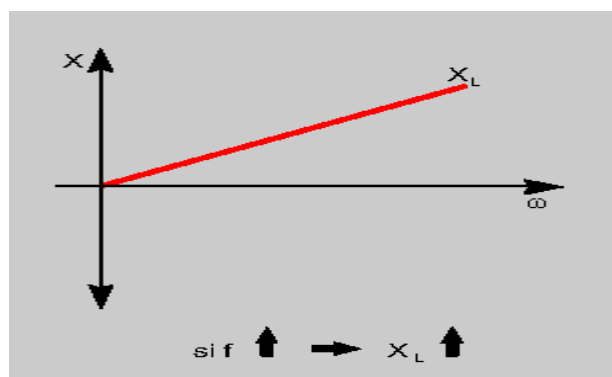


Figura 2.2: Variación de la impedancia inductiva en función de la frecuencia.

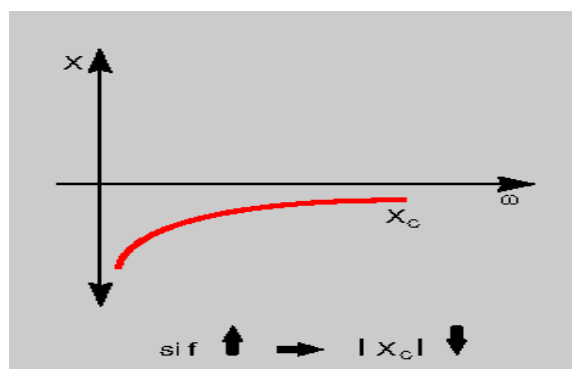


Figura 2.3: Variación de la impedancia capacitiva en función de la frecuencia.

O sea, a una determinada frecuencia pueden tener una impedancia constante pero su impedancia varía en función de la frecuencia, ejemplo 3 W a 60 ciclos, 5 W a 120 ciclos, etc., filtros eléctricos y electrónicos, servomecanismos de motores, variadores de velocidad de motores tienen estas características. Estos tipos de elementos no generan armónicos si son energizados con una tensión de una sola frecuencia, sin embargo, si distorsionan la entrada, si existe más de una frecuencia y pueden alterar el contenido de armónicos. Estos elementos pueden mitigar o incrementar el problema del contenido de armónicos. Las dos categorías de equipos generadores de armónicos, pueden originar una interacción compleja en la cual la energía de los armónicos es transformada o multiplicada de una frecuencia a otra.

En determinadas circunstancias la sobrecarga o daño de equipos pueden ser la causa de generación de armónicos. La gran cantidad de los armónicos en la mayoría de los sistemas de potencia son generados por los equipos de la misma planta.

A continuación, se mencionan algunas de las posibles fuentes de armónicas presentes en la Planta de Lixiviación y Lavado de la empresa:

- Saturación de transformadores
- Corrientes de energización de transformadores
- Conexiones al neutro de transformadores
- Fuerzas magneto motriz en máquinas rotatorias de corriente alterna
- Lámparas fluorescentes
- Fuentes reguladas por conmutación
- Cargadores de baterías
- Compensadores estáticos de VAr
- Variadores de frecuencia para motores
- Convertidores de estado sólido

Las corrientes y tensiones de armónicos se crean a partir de cargas no lineales conectadas al sistema de distribución de potencia de una industria. La distorsión por armónicos es una forma de contaminación en la Planta Eléctrica que puede provocar problemas si la suma de las intensidades de armónicos supera ciertos límites.

El principio del modo en el que los componentes armónicos se suman a la intensidad fundamental se muestra en la figura 2.4. En la que solamente se muestra el quinto armónico.

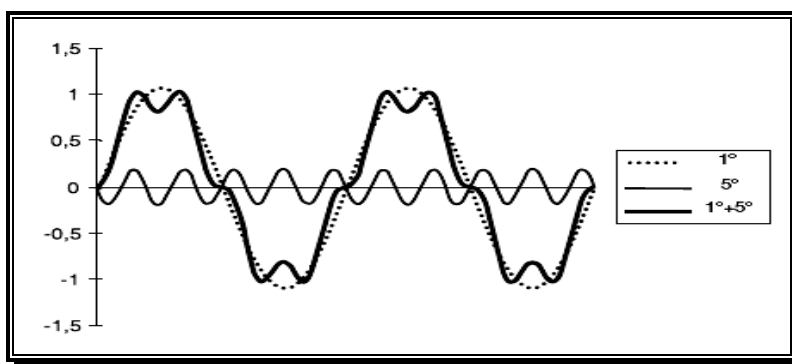


Figura 2.4: La intensidad total como la suma de la fundamental y el quinto armónico.

2.3 Clasificación de las perturbaciones en la tensión y en la corriente

[\(Volver\)](#)

Las perturbaciones que existen en la onda pueden clasificarse según la distorsión de las formas de ondas y las variaciones de frecuencia.

Distorsión de las formas de ondas: Se da cuando los efectos de los armónicos dan lugar a que la forma de onda de tensión o corriente de régimen permanente difiera de la puramente sinusoidal. Dentro de las distorsiones se encuentran:

- **Armónicos:** Son tensiones o corrientes sinusoidales, cuya frecuencia es un múltiplo entero de la fundamental. La combinación de los armónicos y de la senoide de frecuencia fundamental da lugar a formas de onda distorsionadas. Generalmente, las cargas no lineales dan lugar a la inyección de

armónicos de corriente, los cuales, al circular por el sistema de potencia, dan lugar a distorsión armónica en las tensiones.

- **Interarmónicos:** Son componentes armónicas de la tensión o de la corriente, cuya frecuencia no es múltiplo entero de la fundamental. Los interarmónicos pueden presentarse a frecuencias discretas, o distribuidos a lo largo de una determinada banda del espectro. Las principales fuentes generadoras de interarmónicos son los convertidores estáticos de frecuencia, los ciclo convertidores, los hornos de inducción y los dispositivos generadores de arco eléctrico.
- **Microcortes:** Son huecos estrechos, que aparecen periódicamente en la forma de onda de tensión como consecuencia de la conmutación de la corriente entre las fases de los convertidores estáticos conectados a la red. La duración de estos suele ser de algunas centenas de microsegundos, y generalmente son provocados por la conmutación de los rectificadores controlados y no controlados.
- **Componentes de continua:** Consiste en la aparición de componentes de continua en la forma de onda de tensión y corriente. Las mismas pueden ser originadas por perturbaciones geomagnéticas o asimetrías en los convertidores estáticos de potencia.
- **Ruido de alta frecuencia:** Son señales indeseables con un espectro armónico disperso, cuya frecuencia suele ser inferior a 200 kHz. Estas señales se encuentran superpuestas a las formas de onda de tensión o corriente, y suelen estar originadas por sistemas electrónicos de potencia.

Variaciones de la frecuencia: Consiste en desviaciones de la frecuencia fundamental del sistema de potencia respecto de su valor nominal. Estas variaciones de frecuencia suelen ser debidas a desequilibrios bruscos entre la producción [El sistema electro energético nacional (SEN)] y la carga, y son más importantes en sistemas débiles o aislados.

Las tensiones en la cabecera de los sistemas de potencia (a la salida de los generadores) pueden ser consideradas como sinusoides perfectas y equilibradas. De hecho, las tensiones existentes en la mayoría de los sistemas de transmisión presentan una distorsión inferior al 1%. La distorsión de estas formas de onda de tensión se incrementa a medida que nos aproximamos a las cargas finales del sistema electro energético. La forma de onda de la corriente solicitada por determinadas cargas

dista mucho de ser sinusoidal, lo cual da lugar a una serie de efectos que conllevan a la distorsión de la tensión.

Para explicar la relación entre los armónicos de tensión y corriente consideremos el sistema de la figura 2.5. Los sistemas de potencia son principalmente inductivos a frecuencia fundamental, despreciándose normalmente los efectos capacitivos de las líneas de distribución, y su impedancia equivalente es conocida como impedancia de cortocircuito (Z_s). Cuando los armónicos de corriente generados por alguna carga (en este caso L_1 y L_2) circulan a través de esta impedancia, se produce una caída de tensión en la misma, y como resultado, aparece en la distorsión de la tensión del punto de acoplo común con el resto de cargas del sistema (PCC – Punto de Conexión Común).

Aunque las corrientes de la carga sean las responsables de dicha distorsión de tensión, una carga individual no puede controlar dicha distorsión, ya que también depende de las corrientes solicitadas por el resto de las cargas y de la impedancia del sistema de potencia.

La norma IEEE 519 establece para el control de estos armónicos:

- El control sobre la cantidad de armónicos de corriente inyectado en el sistema tendrá lugar en el punto final de consumo.
- Si se asume que la inyección de armónicos de corriente está en los límites razonables, el control sobre la distorsión de tensión será ejercido por la entidad que tiene el control sobre la impedancia del sistema, la cual generalmente es la compañía suministradora.

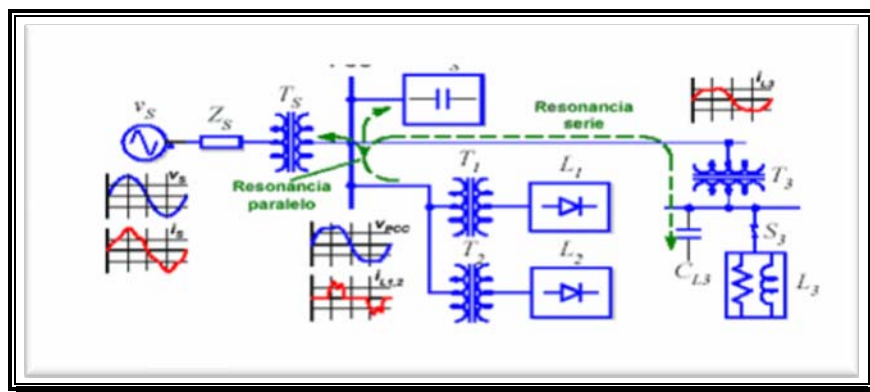


Figura 2.5: Distorsión de tensión debida al flujo de armónicos de corriente.

Cuando se insertan bancos de condensadores en el sistema de potencia, ya sea en el lado del consumidor para corregir el factor de potencia (C_{L3}), o en la barra de la subestación para controlar el nivel de tensión (C_s), la impedancia de cortocircuito pasa a ser un parámetro decisivo en el análisis de la respuesta frecuencial del sistema. La inserción de condensadores en el sistema no genera armónicos, sin embargo, su presencia puede ocasionar distorsión. Los circuitos que contienen múltiples condensadores e inductancias presentan más de una frecuencia natural de resonancia. En un sistema cuando una de esas frecuencias de resonancia coincide con algunas de las frecuencias de los armónicos de tensión y de corriente, puede aparecer una situación de resonancia, y las tensiones y corrientes a esa frecuencia pueden alcanzar valores peligrosamente elevados.

2.4 Normas técnicas y sus antecedentes

[\(Volver\)](#)

Es de gran importancia tener siempre la idea de existan normas que limiten los contenidos armónicos en los sistemas eléctricos de potencia con el fin de:

- Controlar la distorsión de corriente y tensión de un sistema eléctrico a niveles que las componentes asociadas puedan operar satisfactoriamente, sin ser dañadas.
- Asegurar a los usuarios que puedan disponer de una fuente de alimentación de calidad aceptable.
- Prevenir que el sistema eléctrico interfiera en la operación de otros sistemas (protección, medición, y/o conmutación).
- Limitar el nivel de distorsión que un cliente puede introducir a la red.
- La distorsión de la armónica de voltaje es el resultado de la interacción de la armónica de corriente con la impedancia del sistema.
- El usuario final puede limitar la corriente armónica inyectándolas sobre el sistema de energía.

- La empresa distribuidora de energía controlara las distorsiones de los armónicos de voltaje desde la fuente, para estar seguros que las condiciones de resonancia no causaran una excesiva elevación de los niveles de armónicos.

La primera norma sobre armónicos de baja frecuencia nació en Europa. En 1969, el European Committee for Electro technical Standardization (CENELEC) y el International Electro technical Commission (IEC) formaron comités para investigar los efectos de los armónicos causados por circuitos conmutados de estado sólido usados en aplicaciones domésticas. La primera norma (EN50006) la publicó CENELEC en 1975 y fue adoptada por 14 países europeos. Más tarde, en 1982, Alemania Occidental promovió la sustitución de la norma por otra un poco más comprensiva, la IEC 555.

La norma IEC 1000-3-2 es en la actualidad la norma con más potencial de aplicación en todo el mundo. CENELEC la ha convertido en una norma de obligado cumplimiento en Europa (norma EN61000-3-2) a partir de principios de 2001, siendo también recomendada aunque no obligatoria en Japón, donde los valores máximos admisibles para cada uno de los armónicos debe modificarse multiplicándose por el cociente entre los valores de la tensión de red en Europa y en Japón.

La sección 2 de la norma IEC 1000-3 se refiere a la limitación de armónicos de corriente inyectados en la red pública. Especifica límites de las componentes armónicas de la corriente de entrada de los diferentes tipos de equipos, y deben ser medidos bajo unas condiciones especiales detalladas en el texto de la norma.

Esta norma clasifica a los diferentes equipos en 4 clases, A, B, C y D como puede verse en la figura 2.6.

- Clase A: Equipos trifásicos equilibrados, accionadores de motores y todos aquellos equipos que no pertenezcan a cualquier otra clase y cuya forma de onda de corriente de entrada tenga más de un 5% fuera de la máscara de forma de onda especial de la figura 2.8.
- Clase B: Equipos portátiles (no trifásicos).
- Clase C: Equipos de iluminación (no trifásicos).

- Clase D: Equipos con una potencia menor de 600 watt que no pertenezcan al resto de clases y con una forma de onda de corriente de entrada que quede incluida en más de un 95% dentro de la máscara de forma de onda especial. Formas de onda que tengan pequeños picos fuera de la máscara serán clasificadas por tanto como clase D.

En la tabla 2.3 puede verse el contenido armónico máximo para cada una de las clases.

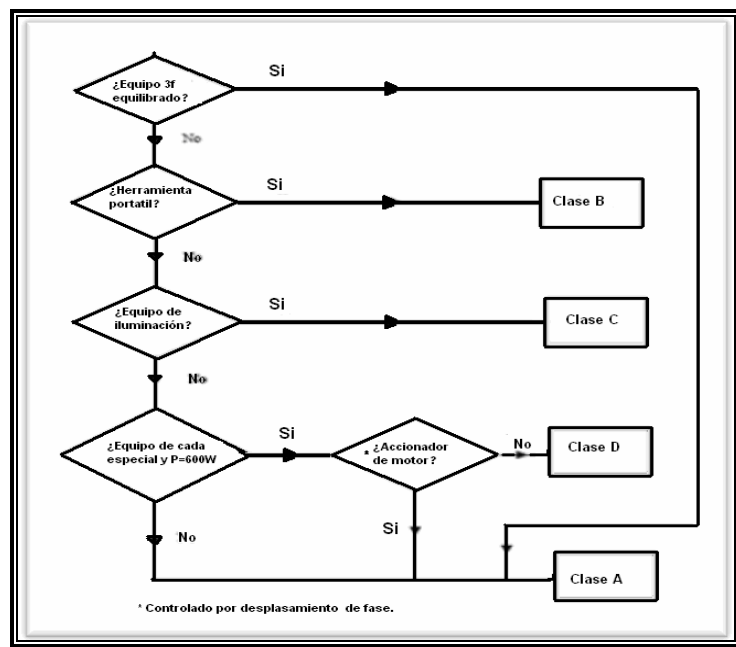


Figura 2.6: Diagrama de flujo para la clasificación de equipos según la norma IEC 1000-3-2.

Tabla 2.3: Contenido armónico por fase según la norma utilizada.

Clase	A	B	C	D
Orden del armónico, n	Amperios	Amperios	% de la corriente de entrada fundamental	mA/W
Impares				
3	2,3	3,45	30xFactor de Potencia	3,4
5	1,14	1,71	10	1,9
7	0,77	1,155	7	1,0
9	0,4	0,6	5	0,5
11	0,33	0,495	3	0,35
13	0,21	0,315	3	0,296
15≤n≤39	2,25/n	3,375/n	3	3,85/n
Pares				
2	1,08	1,62	2	-
4	0,43	0,645	-	-
6	0,3	0,45	-	-
8≤n≤40	1,84/n	2,76/n	-	-

Analizando esta clasificación se puede observar que los tipos de equipos que definen las clases B y C están unívocamente encasillados en esas clases, pero, sin embargo, muchos equipos de uso habitual pueden ser incluidos en la clase A o en la clase D, dependiendo únicamente de la forma de onda de corriente que demandan.

Tradicionalmente estamos acostumbrados a utilizar el factor de potencia como parámetro cuantificador de la calidad de las formas de onda aunque en asignaturas como circuito # 3 se ve este fenómeno y en otras como suministro eléctrico 1 y 2. En las empresas el factor de potencia sí lo toman como parámetro de calidad. Es bien conocida la definición de factor de potencia como la relación entre la potencia activa total consumida por la carga y la potencia aparente suministrada en (VA). Es decir:

$$f_p = \frac{P_a}{S} = \frac{P_a}{V_{gef} * I_{gef}} \quad (2.9)$$

Siendo V_{gef} el valor eficaz de la tensión de entrada y I_{gef} el valor eficaz de la corriente de entrada. Considerando que ambos conservan su carácter senoidal esto nos conduce a la tradicional concepción electrotécnica del factor de potencia:

$$f_p = \cos(\varphi) \quad (2.10)$$

Donde φ es el desplazamiento de fase entre la corriente de entrada y la tensión de entrada.

2.4.1 Norma nacional

[\(Volver\)](#)

En nuestro país existen normativas relacionadas con el nivel de armónico recogidas en la regulación **CONELC 004-01** aquí se establecen los niveles de calidad de la prestación del servicio eléctrico de distribución y los procedimientos de evaluación a ser observados por parte de las empresas distribuidoras.



2.5 Efecto de los armónicos en los componentes de los accionamientos de la Planta de Lixiviación y Lavado

[\(Volver\)](#)

La posible existencia de armónicos en la empresa Cmdte. Ernesto Che Guevara, debido a cargas no lineales es decir variadores de velocidad, trae consigo una serie de problemas que afectan al resto de equipos conectados a dicha red, produciendo daños para los equipos, mal funcionamiento u operación y aumento de los costes económicos de una instalación eléctrica así como efectos indeseables sobre esta.

El efecto principal causado por los armónicos consiste en la aparición de voltajes y corrientes no sinusoidales en diferentes puntos del sistema. Ellos son producidos por la circulación distorsionada de estas a través de las líneas. La circulación de estas corrientes provoca caídas de voltaje deformadas que hacen que a los nodos del sistema no lleguen tensiones puramente sinusoidales. Mientras mayores sean las corrientes armónicas circulantes a través de los alimentadores del sistema eléctrico de potencia de la planta, más distorsionadas serán las tensiones en los nodos del circuito y más agudos los problemas que pueden presentarse por esta causa.

Estos efectos pueden dividirse en dos apartados principales:

1. Calentamientos
2. Fallos de operación

2.5.1 Calentamientos

[\(Volver\)](#)

El flujo de corrientes armónicas por los equipos eléctricos da lugar en general a un calentamiento adicional debido al aumento de pérdidas y por lo tanto, al envejecimiento prematuro de los aislamientos. Entre los equipos que más sufren este tipo de efecto están los condensadores, las lámparas de descarga, motores y transformadores.



Lámparas de descarga: Los únicos efectos que se conocen son la aparición en ciertos casos de un ligero ruido, y la posibilidad de resonancia del equipo de encendido con los armónicos, si bien ésta es poco probable, al encontrarse entre los 75-80Hz. Se cuenta en la planta con un total de más 340 lámparas.

Motores: El incremento del calentamiento en motores se produce por dos efectos diferentes:

El primero es el producido por el aumento de la corriente que atraviesa los bobinados con respecto a una corriente perfectamente senoidal, y el reparto de esta corriente dentro de los conductores (a mayores frecuencias el efecto Piel toma mayor importancia, concentrándose la corriente en el exterior de los conductores y aumentando las pérdidas por efecto Joule en estas zonas). Las pérdidas causantes de los calentamientos adicionales en este caso son las pérdidas por efecto Joule en rotor y estator, no influyendo apenas las pérdidas en el hierro.

El segundo está relacionado con el aumento de la resistencia del rotor a altas frecuencias. Dependiendo del tipo de componente de secuencia de armónico, éste se transmite al rotor con una frecuencia " $h+1$ " veces superior al valor del armónico " h " al que pertenecen si son de secuencia negativa, y " $h-1$ " si son de secuencia positiva, dando lugar a un aumento de pérdidas importantes en el rotor. Este efecto es comparable con el funcionamiento de este tipo de equipos en redes desequilibradas.

Otro efecto de la presencia de armónicos de tensión en la alimentación a motores, es la reducción del par eficaz generado por el motor. De estudios realizados en las siguientes bibliografías [\[9 y 16\]](#), se demuestra que para limitar estos efectos de armónicos sobre motores, no basta con limitar la distorsión total de la onda, ya que algunos armónicos (por ejemplo, el segundo), tienen efectos más perjudiciales que el resto. Asimismo, demuestran que los motores menores de 5 HP se ven más afectados que los grandes.

Otro efecto perjudicial existente es la aparición de vibraciones torsionales debidas a los armónicos, que reducen la vida de los equipos por fatiga, y el aumento del ruido producido por el equipo. En la planta existe un total de 227 motores de media potencia.

Transformadores: En estos, los armónicos causan un aumento de pérdidas en el cobre y adicionales, principalmente por el aumento de la circulación de corrientes parásitas y por el efecto

Piel. Del mismo modo, armónicos de secuencia homopolar pueden dar lugar a calentamientos excesivos en zonas no diseñadas para la circulación permanente de corrientes. Dos son las soluciones al problema de utilización de transformadores en presencia de armónicos:

1. Sobredimensionamiento del transformador
2. Diseño especial de transformadores

Siendo ésta última la medida más recomendada. El primer método se trata en las diferentes normas de construcción de estas máquinas, como por ejemplo, en la IEEE C57.110. El segundo se basa en un diseño aparecido recientemente en EEUU y que cubre los requisitos de transformadores en presencia de armónicos y que se denominan transformadores “k-rated”. Estos se diseñan específicamente para operar a una temperatura concreta mientras suministra potencia a una carga que genera un nivel específico de armónicos. Los cambios en el diseño de estos transformadores, respecto del diseño de transformadores estándar incluyen: conductores de hilo múltiple en lugar de conductores sólidos, conductores de neutro más grandes, conductores paralelos para disminuir el efecto Piel, modificaciones en el diseño del circuito magnético y apantallamiento entre los devanados de primario y secundario. Actualmente, en los precios del mercado internacional el precio de un transformador “k-rated” es aproximadamente el doble del precio que vale un transformador estándar.

Por otra parte, a los calentamientos adicionales que se producen, hay que añadir como efecto perjudicial de los armónicos, los sobreesfuerzos mecánicos que se pueden producir en los aislamientos de bobinados y chapas del núcleo, y el aumento del ruido.

Transformadores con factor K disponibles comercialmente son:

- K- 4
- K- 9
- K- 13
- K- 20
- K- 30
- K- 40

Especificar los transformadores de factor k requiere de un método para calcular el valor nominal k de la corriente de carga, lo mismo desde un análisis armónico de carga real, o desde estimaciones del contenido de corrientes de armónicos. La ecuación de cálculo del factor k recomendada es:

$$k = \sum_{h=1}^{\infty} \left(I_h (pu)^2 \right) * h \quad (2.11)$$

En la planta existe un total de 12 transformadores de ellos 2 están en la parte de la subestación 1SR-2 que van a modernizar el próximo año.

Capacitores: Las pérdidas causadas por calentamiento son debidas a dos fenómenos:

1. Conducción
2. Histéresis en el dieléctrico

Como una primera aproximación, ellas son proporcionales al cuadrado del voltaje aplicado para conducción y a la frecuencia para histéresis. Los capacitores son por consiguiente sensibles a sobrecargas, tanto debido a un excesivo voltaje a la frecuencia fundamental o a la presencia de tensiones armónicas.

Estas pérdidas son definidas por el ángulo de pérdida (δ) del capacitor cuya tangente es la razón entre las pérdidas y la energía reactiva producida. Esto se representa en la figura 2.7.

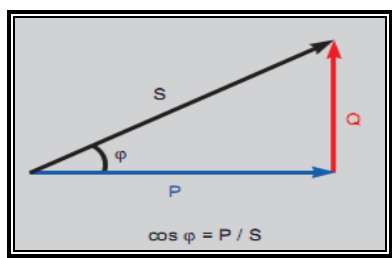


Figura 2.7: Triángulo relacionado con la potencia del capacitor, (potencia activa (P), reactiva (Q), aparente (S)).

No existen conectados en estos momentos a ninguna barra pero existe un banco listo para conectar en el momento que así se requiera. El estudio se centra en los componentes de los accionamientos de potencia de la planta, siendo estos los principales: los motores, los transformadores y el variador de velocidad.

2.5.2 Fallos de operación

[\(Volver\)](#)

Los fallos de operación abarcan un amplio campo de accionamientos eléctricos. A continuación se enumeran algunos de los más representativos que pueden existir aunque no en mucha medida en la planta.

- Interruptores automáticos. La capacidad de corte de corrientes de cortocircuito en interruptores automáticos puede verse afectada por la distorsión de la onda debido a aumentos en la variación de crecimiento de la onda de intensidad, lo cual puede dificultar el apagado del arco, así como a la capacidad de soplar el arco en los interruptores de soplado magnético.
- Convertidores y equipos electrónicos. Los equipos electrónicos, incluidos los convertidores, son causantes de la distorsión de la onda (operación del filtro de entrada, decrecimientos de señal durante el arranque), pero a su vez padecen fallos debidos a la misma.
- Armónicos de voltajes pueden distorsionar los controles usados en los sistemas electrónicos. Ellos pueden por ejemplo afectar las condiciones de conmutación de los tiristores por el desplazamiento del cruce por cero de la onda de voltaje.

A continuación se muestra algunos de los fallos que los armónicos pueden ocasionar a los elementos de los accionamientos en la planta debido a los efectos que estos ocasionan.

- Pueden darse fallos en el comportamiento de las cargas alimentadas por convertidores debido a la transmisión de armónicos a través del filtro de salida (causados por los impulsos, muescas y distorsión de la tensión).

- El ruido electromagnético producido por los armónicos, puede dar lugar a fallos de operación en sistemas de control.
- La presencia de armónicos de tensión en el punto de conexión común puede causar problemas a otros usuarios. Por ejemplo, una forma de onda de tensión con muescas como la generada por muchos convertidores electrónicos puede crear interferencias con computadores u otros equipos electrónicos conectados al mismo punto.
- Todos estos efectos llevan a un aumento de coste (debido a la necesidad de mayores condensadores de almacenamiento, filtros, apantallamiento, etc.)
- La reducción de la vida útil del equipamiento de potencia y como consecuencia la degradación de su eficiencia y funcionamiento en general.

La magnitud de los problemas que causan las tensiones y corrientes armónicas en los equipos instalados en un determinado entorno electromagnético depende del valor de las tasas de las componentes armónicas - es decir, del grado de deformación de la onda (THD) - y de la sensibilidad de dichos equipos a este tipo de alteraciones.

2.5.3 Efecto de las armónicas homopolares

[\(Volver\)](#)

En condiciones normales, con una carga trifásica lineal equilibrada, las porciones fundamentales a 60 Hz. de las corrientes de cada fase se anulan mutuamente en el conductor del neutro. En un sistema de cuatro conductores con cargas no lineales, ciertas armónicas impares denominadas "homopolares" (múltiplos impares de los terceros armónicos: 3° , 9° , 15° , etc.) no se anulan entre sí, sino que se suman en el conductor neutro. En sistemas con muchas cargas monofásicas no lineales, la corriente del neutro puede llegar a superar el valor de las corrientes de fase. En este caso, el peligro es un excesivo calentamiento, al no existir en el conductor neutro ningún interruptor automático que limite la corriente como ocurre en los conductores de las fases.

Una corriente excesiva en el conductor puede provocar también caídas de tensión superiores a lo normal entre el conductor neutro y tierra en la toma de corriente a 230 V.

2.6 Acciones de prevención y corrección de los efectos de los armónicos (soluciones)

[\(Volver\)](#)

En los últimos años, en nuestro país ha tenido lugar un sustancial incremento de la actividad normativa a nivel nacional para evitar el aumento de la distorsión armónica en las redes eléctricas. Usualmente la solución al problema de armónicos es eliminar los síntomas y no el origen, los aparatos que crean los armónicos generalmente constituyen una pequeña parte de la carga, eliminar su uso no es posible, modificar esos equipos para que no causen armónicos tampoco es factible. Lo que nos queda es reducir los síntomas ya sea incrementando la tolerancia del equipo y del sistema a los armónicos o modificar los circuitos y los sistemas para reducir su impacto, atrapar, o bloquear los armónicos con filtros. Por supuesto hay excepciones. En casos de sobrecarga, daño de equipo o diseño inapropiado, estas causas que generan armónicos pueden ser corregidas, similarmente un aparato o equipo particular que produce un alto nivel de armónicos debe ser modificado o reemplazado.

La adopción de medidas correctoras en la instalación. Cabe citar las siguientes:

- La utilización de filtros, esta medida es una de las más eficaces ya que en la actualidad debido a las cargas no lineales, se les exige el filtro sintonizado a la frecuencia que generen.
- La alimentación de la carga perturbadora con un transformador de uso exclusivo. Por ejemplo, así se hace en el alumbrado de vías de la planta con lámparas de descarga.
- La utilización de transformadores con devanados en triángulo en los equipos que forman parte de la red eléctrica. Contribuye a limitar la aparición de tensiones armónicas homopolares. Ya que van a circular las corrientes armónicas dentro de la delta.

Desde el punto de vista de sobretensiones transitorias y armónicas, disminuyendo la impedancia a tierra e incrementando la amplitud del neutro con frecuencia se resuelven problemas de calidad de

la potencia (incluyendo armónicas). Los problemas de puesta a tierra contribuyen de un 33 a un 40% de los problemas relacionados con la calidad de energía.

En [4] se hace referencias a algunos aspectos importantes relacionados con la utilización de los filtros. Los filtros se utilizan para bloquear o atrapar la energía de los armónicos de tal manera que no fluya por los equipos o que no entre al sistema, son las dos soluciones más usadas para el problema de las armónicas.

Como se ha establecido, la norma IEC 1000-3-2 no utiliza prácticamente para nada el concepto de corrección del factor de potencia. En realidad, habría que hablar de corrección del contenido armónico o de reducción de armónicos de corriente de baja frecuencia. Sin embargo, es la corrección de factor de potencia la denominación que se ha impuesto, quizá debido a la familiaridad de su uso.

En realidad, esta interpretación de la norma abre un nuevo camino a circuitos con criterios de diseño distintos de los tradicionales. Hasta el momento, el propósito de los circuitos de corrección del factor de potencia era obtener una forma de onda de corriente de entrada senoidal o casi senoidal. Por el contrario, si nos ceñimos a la interpretación de la norma e intentamos simplemente mantener el valor de los armónicos de corriente dentro de los límites permitidos, obtendremos circuitos de menor coste, menor peso y en general, con mejor rendimiento y calidad de la onda.

Las soluciones pasivas son más baratas, más robustas y no generan armónicos de alta frecuencia, más bien todo lo contrario, ya que incluso en muchas ocasiones contribuyen a disminuir los generados por otros convertidores conectados a ellos.

Por otra parte, las soluciones activas son en general más pequeñas y su salida está regulada frente a variaciones de tensión de entrada y en la carga.

Los filtros son elementos cuya impedancia varía con la frecuencia. También tienen el potencial de crear y amplificar el problema de las armónicas, a menos que cuidadosamente sean localizados y diseñados, en algunos casos un diagnóstico y diseño pobres, origina que el remedio sea peor que la enfermedad.

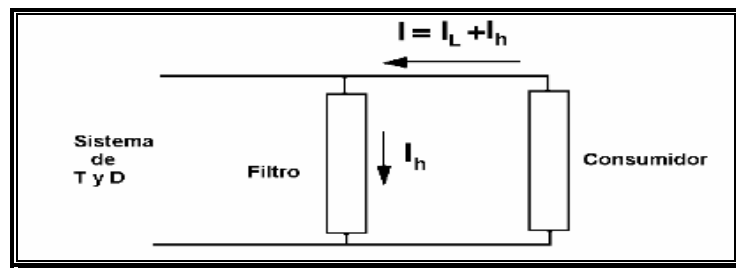


Figura 2.8: Localización de los filtros en el sistema eléctrico.

Los filtros son usualmente aplicados como un camino en paralelo con el equipo que crea armónicas, como se indica en la figura 2.8. Ambos filtros el activo y el pasivo desvían las corrientes armónicas I_h por una trayectoria para desviarlos del sistema, con esto se deja que solo la corriente de carga fluya al sistema:

- Los filtros pasivos proporcionan una impedancia muy baja en la trayectoria en paralelo.
- Los filtros activos originan que la corriente armónica fluya con una corriente que ellos mismos generan, esencialmente forzándola por su trayectoria.

2.6.1 Filtros de eliminación de armónicos

[\(Volver\)](#)

Un filtro de armónicos se puede entender como un dispositivo que presenta una severa variación de su impedancia en función de la frecuencia. La inserción de estos dispositivos en el sistema de potencia de cualquier planta en la empresa modificará la respuesta de frecuencias del mismo, con lo que se podrá alterar el camino de circulación de armónicos de corriente. Sobre la base de esta concepción, los filtros de armónicos se podrán clasificar en las siguientes categorías fundamentales:

- Filtros activos
- Filtros pasivos
- Filtros mixtos
- Filtros de protección
- Filtros de absorción
- Filtros de rechazo

Sin embargo atendiendo a los usos que todos estos dan en la calidad de la energía de la red se propone un filtro pasivo en este estudio ya que estos son los que resuelven el problema de una manera rápida, eficaz y principalmente con un bajo costo de inversión.

Todos los filtros en cierta manera responden a un solo objetivo que es el de librar las redes de contaminaciones por armónicas mejorando así el uso de los accionamientos de potencia.

A continuación se verá las diferentes características de tipos de filtros y sus características principales:

2.6.1.1 Filtros activos (Solución activa)

[\(Volver\)](#)

Los filtros activos son circuitos electrónicos especiales que analizan continuamente la corriente de carga y generan una corriente de compensación que resulta igual a la diferencia entre la corriente de carga y la corriente de frecuencia fundamental. Esta diferencia, que es la suma de las corrientes armónicas desfasadas en 180° , se inyecta a la carga de modo que la resultante no contenga componentes armónicos. Estos presentan excelentes prestaciones en el acondicionamiento de tensiones y corrientes.

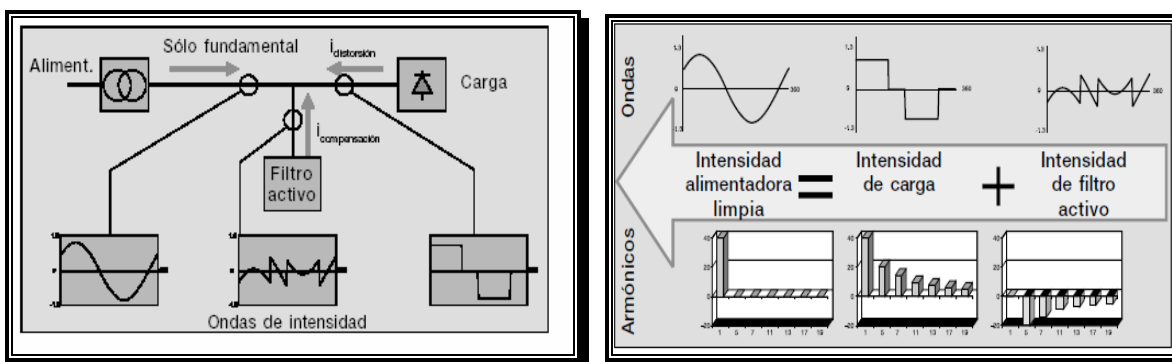


Figura 2.9: Diagrama del principio del filtro activo externo y sus ondas.

2.6.1.2 Filtros pasivos (Solución pasiva)

[\(Volver\)](#)

Los filtros pasivos, como su nombre indica, están contruidos mediante la asociación de inductancias y capacidades, calculadas para la eliminación de armónicos concretos. Las configuraciones más comunes:

- Sintonizado simple.
- Pasa alto de 2^{do} orden.

Los filtros pasivos de armónicos de corriente, aunque no consiguen resultados óptimos, son una solución simple y económica. Su utilización debe ir acompañada de un estudio pormenorizado de la instalación, y no se puede garantizar su efectividad ante condiciones cambiantes en la red o ante envejecimientos. En algunos casos particulares, la instalación de filtros pasivos puede llegar a ocasionar graves problemas en la red.

Estos filtros son los más utilizados en los sistemas eléctricos por su bajo costo y fácil instalación, aunque en algunos casos trae consigo problemas de resonancia. La figura 2.10 muestra la configuración de estos filtros.

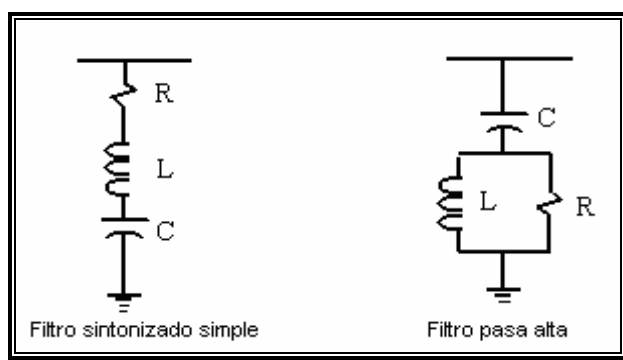


Figura 2.10: Topología de los filtros pasivos shunt.

El filtro se caracteriza por presentar una impedancia baja a una corriente de una frecuencia determinada, esto significa que los elementos del filtro entran en resonancia serie, ocasionando la circulación de esta corriente. De esta manera a partir de un valor del banco de capacitores se obtiene el valor del reactor del filtro:

$$X_{cap} = \frac{kV^2}{MVA_{r(cap)}} \quad (2.12)$$

$$X_{reac} = \frac{X_{cap}}{h^2} \quad (2.13)$$

Donde h es la armónica a la cual esta sintonizado el filtro, y por tanto a la corriente que se quiere drenar.

El filtro sintonizado es utilizado para eliminar en forma individual las armónicas más bajas como la 3^{ra}, 5^{ta} y 7^{ma}. En cambio el filtro pasa altas es utilizado para eliminar un rango de armónicas las cuales tienen un valor pequeño de corriente, por lo general son usados para eliminar de la armónica 11^{na} en adelante.

2.6.1.3 Filtros mixtos

[\(Volver\)](#)

Los filtros mixtos, están formados por la asociación de filtros pasivos y activos. Los filtros de potencia, pueden estar formados por un único filtro o por la combinación de varios. En una combinación de filtro serie - paralelo cada bloque, a su vez, puede estar formado por la asociación de distintos filtros. Además, se pueden conectar filtros activos o pasivos en cada caso, dando lugar a múltiples combinaciones.

La combinación de filtros activos y pasivos permite reducir el tamaño, y por lo tanto el coste de los filtros activos manteniendo las ventajas que presentan estos últimos frente a los filtros pasivos.

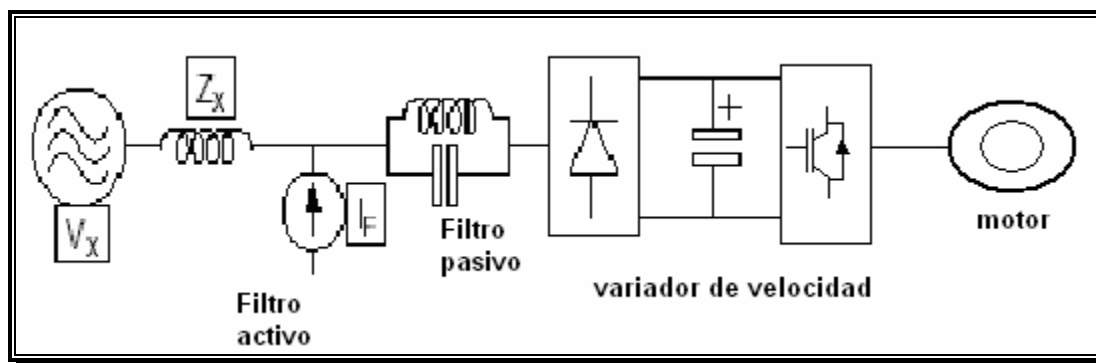


Figura 2.11: Topología del filtro activo paralelo, combinado con un filtro pasivo serie.

2.6.1.4 Filtros de protección

[\(Volver\)](#)

Los filtros de protección son usados en redes de distribución que tienen un alto nivel de distorsión armónica, cuando el objetivo final es la compensación del factor de potencia a la frecuencia fundamental. Su propósito es impedir las sobrecargas por corrientes armónicas en el capacitor, desviándolas hacia la red.

Los filtros de protección se realizan mediante la conexión de inductancias anti resonantes en serie con los capacitores, y se diseñan de forma que el filtro presente una elevada impedancia para todas las frecuencias armónicas indeseables.

Para las frecuencias menores a la frecuencia de resonancia del conjunto capacitor inductor, el mismo se comporta como un capacitor que mejora el factor de potencia, de tal forma que la frecuencia de sintonización de cada filtro se ajusta a un valor entre la frecuencia fundamental y la frecuencia del menor armónico presente en la red, el que generalmente es el 5^{to} armónico, consiguiéndose además una leve atenuación en el nivel de distorsión armónica de la onda de tensión resultante. Hay que considerar que la conexión de una inductancia en serie con un capacitor de potencia hace que la tensión de trabajo del capacitor sea mayor que la tensión de la red. A causa de ello, deben estar diseñados para trabajar a tensiones mayores que los capacitores normales.



Figura 2.12: Topología del filtro de protección.

2.6.1.5 Filtros de absorción

[\(Volver\)](#)

Estos filtros se usan cuando el principal objetivo es la reducción de la distorsión armónica presente en la instalación, generalmente están formados por un conjunto de una o varias etapas filtrantes serie inductancia-capacitor (con un resistor para ajustar el factor de calidad), sintonizadas en el entorno de las frecuencias características que se desean eliminar, comenzando por la menor de las mismas, y sin omitir ninguna frecuencia característica intermedia (caso contrario, la misma se amplificaría).

Ya que la mayor parte de las corrientes armónicas van a ser derivadas por cada filtro respectivo, los mismos deben diseñarse térmicamente para poder soportarlas. Asimismo, las tolerancias de los elementos constitutivos son muy estrictas, pues la frecuencia de sintonía real debe coincidir con la prevista en la etapa de diseño. A menudo, los capacitores y los reactores constitutivos se suministran con "taps", para poder realizar un ajuste fino de las frecuencias de sintonía del filtro.

La instalación de los filtros produce una modificación importante en la topología del sistema eléctrico de alimentación. Por esta razón, el diseño de los filtros de absorción debe ser realizado mediante un cuidadoso análisis y un estudio del sistema completo en todas las situaciones operativas. La eficacia de cualquier instalación de filtros depende del rendimiento reactivo del filtro, la exactitud de su sintonización y la impedancia de la red en el punto de conexión.

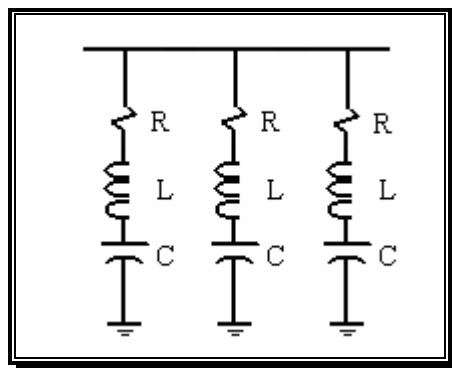


Figura 2.13: Topología del filtro de absorción.

2.6.1.6 Filtros de rechazo

[\(Volver\)](#)

El objetivo del filtro de rechazo es impedir la resonancia paralela entre el transformador y el condensador y evitar la sobrecarga de armónicos en las baterías de condensadores. El filtro está compuesto por varias ramas LC con una configuración y una curva de respuesta determinada para dicho tipo de filtro. El mismo puede formarse con tantas ramas como sean necesarias para compensar la energía reactiva de la instalación. La frecuencia de resonancia suele escogerse entre 180 y 210 Hz y dependiendo de esta se genera una determinada sobre tensión en los condensadores que suelen estar entre un 5% y un 7,5%.

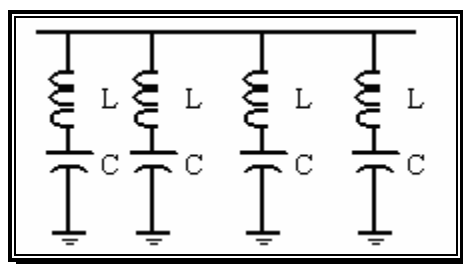


Figura 2.14: Topología del filtro de rechazo.



2.7 Conclusiones parciales del capítulo

[\(Volver\)](#)

- Los motores asíncronos son consumidores y generadores de armónicos, siendo responsables de la diseminación en la red por su distribución espacial y por el número de conmutaciones que asocian en su operación. Aspecto que será corroborado en las mediciones.
- El uso de un filtro pasivo se recomienda en este estudio ya que permite mejorar las prestaciones compensando distintos tipos de perturbaciones. Además es más económica esta solución y de fácil instalación en cualquier empresa.



Capítulo III

Resultados experimentales del estudio



- 3.1 Introducción
- 3.2 Mediciones. Planificación y equipamiento utilizado.
 - 3.2.1 Programación de las mediciones
 - 3.2.2 Características del equipamiento utilizado
 - 3.2.3 Puntos donde se han realizado las mediciones
- 3.3 Análisis de los armónicos generados por el variador de velocidad
- 3.4 Propuesta de solución para reducir los armónicos
 - 3.4.1 Diseño y características específicas de los filtros para su selección
 - 3.4.2 Ecuaciones generales para el diseño de un filtro sintonizado simple
 - 3.4.3 Consideraciones en el diseño (Filtro sintonizado simple)
 - 3.4.4 Cálculo del filtro propuesto
 - 3.4.4 Cálculo de la eficiencia en el accionamiento
- 3.5 Conclusiones del capítulo

3.1 Introducción

[\(Volver\)](#)

En este capítulo se hace un estudio del comportamiento energético del variador. Para ello se tomaron una serie de mediciones en la Planta de Lixiviación y Lavado lo cual nos da una idea clara de que es lo que sucede con los armónicos en ese punto del sistema de la fábrica. Y además se evaluará una metodología para reducir los armónicos o que al menos estén dentro de las normas permitidas que no afecten a los equipos conectados en la red ni al motor instalado al variador lo cual pueda dar lugar a desperfectos o hasta su destrucción.

3.2 Mediciones. Planificación y equipamiento utilizado.

[\(Volver\)](#)

Para la realización del estudio es necesario contar con algunos parámetros que nos permitan caracterizar el objeto, dentro de estos encontramos: la potencia activa, potencia reactiva, factor de potencia y por ciento de la tasa Total de Distorsión de Armónicos, que se obtendrán con las mediciones, necesarias para la implementación de cualquier variante de solución.

Se realizaron mediciones en el variador de velocidad conectado en la barra 4W-25 en la caseta #4 de la 3^{ra} etapa de lixiviación en el tanque de sedimentación **SD-131^a** en las bombas de fondo **BO-133^a** y **BO-134^a** que están alimentadas ambas de las subestaciones 1SR-1 y 1SR-3. Para conocer el contenido de armónicos que el motor se ve sometido así como el comportamiento del mismo ante los distintos tipos de carga y la repercusión de este factor en la cantidad de corrientes armónicas inyectadas a la red por este.

Además, se obtuvieron una serie de parámetros eléctricos como: corrientes y tensiones de fase, potencia aparente y todos los que permitan caracterizar el sistema de potencia. Todos estos valores fueron obtenidos en intervalos de 5 minutos entre cada medición. Los resultados de las mediciones se muestran en el anexo III.

3.2.1 Programación de las mediciones

[\(Volver\)](#)

El programa de mediciones se estructura para secuencias de 24 horas con muestras cada 5 minutos durante más de un mes. Debido al sistema de trabajo del objeto bajo estudio y a la densidad de datos requerida para lograr una aproximación aceptable de la contaminación armónica total existente en la planta, a través del parámetro o variable de medición (THD).

3.2.2 Características del equipamiento utilizado.

[\(Volver\)](#)

Las mediciones realizadas se efectuaron con un analizador de red digital (**PQM**). Este instrumento está destinado estrictamente a la medida de calidad. Permite medir y registrar simultáneamente los principales parámetros, así como la calidad de la energía: U, I, $\cos(\phi)$, P, Q, S, THD, f, y armónicos.

El analizador de red permite capturar y registrar gran cantidad de datos. Estos datos suelen ser tratados en tiempo diferido, transfiriendo los datos del analizador a un fichero y posteriormente procesando dichos datos, permite obtener registros gráficos donde se puede tener una visión general de la evolución de cualquier magnitud eléctrica y permite también obtener tablas numéricas que muestran los valores en un determinado instante o intervalo de tiempo.

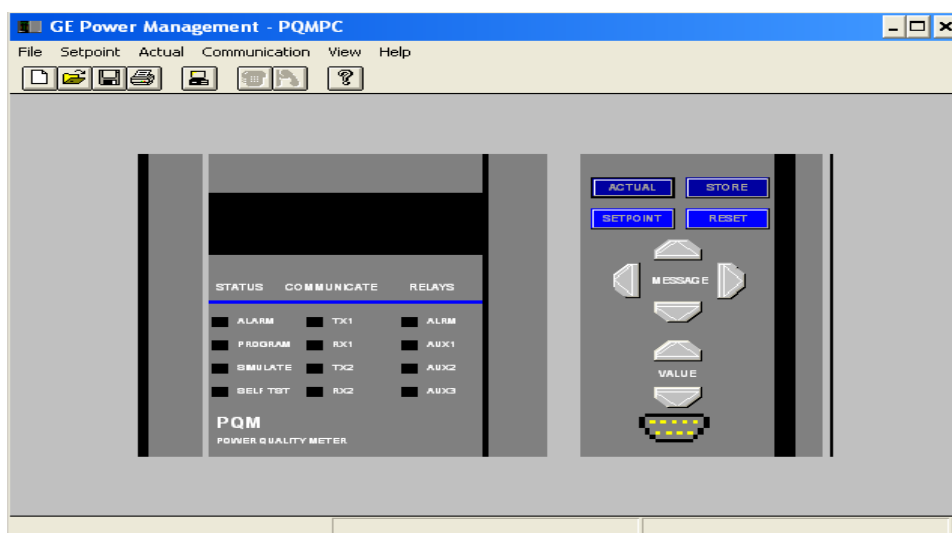


Figura 3.1: Interfase gráfica del analizador de redes PQMPC.

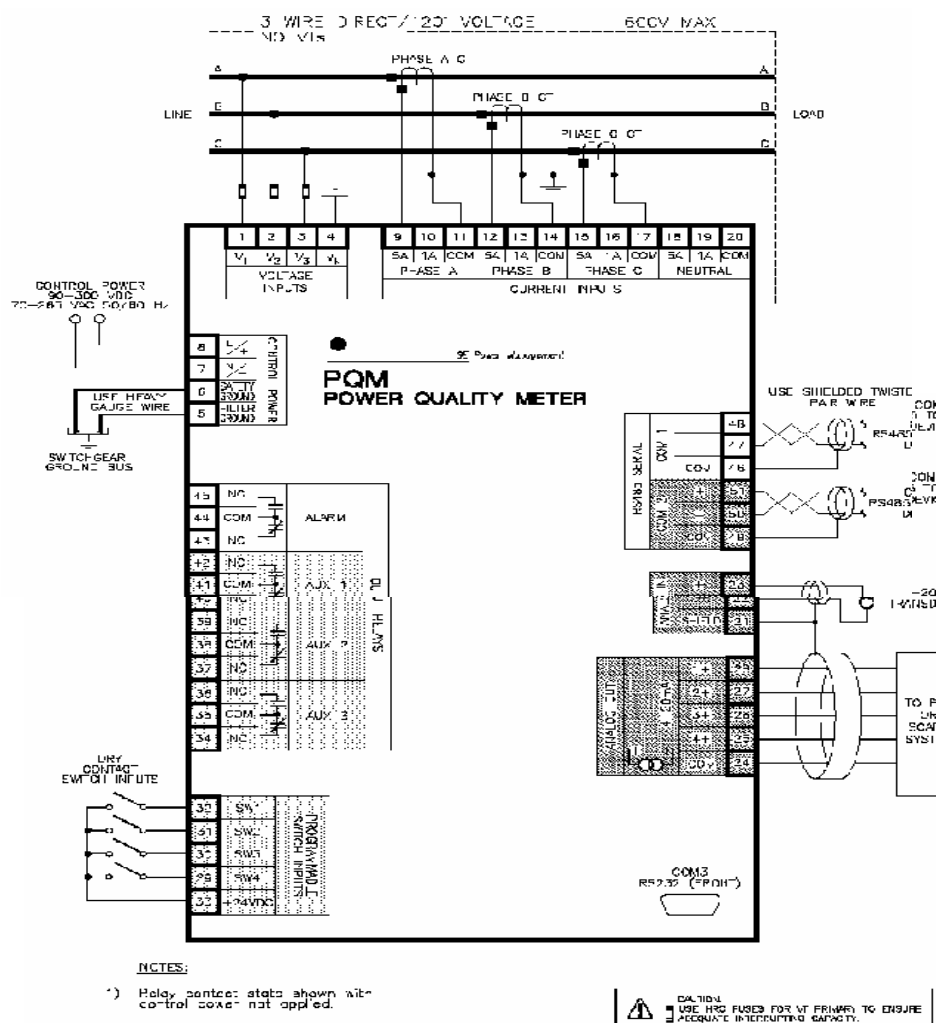
Tipo de conexiones

El analizador **PQM** puede utilizarse para visualizar todos los tipos de líneas eléctricas más comunes. A continuación se mencionan cinco de las más usuales en el campo de la especialidad. El tipo de conexión que utilizamos para medir con el analizador de red en la Planta de Lixiviación de la empresa Cmdte. Ernesto Che Guevara fue (La línea trifásica a 4 hilos).

Este instrumento nos da la posibilidad de medir en otros tipos de conexiones como:

- Línea trifásica a 4 hilos
- Línea monofásica a 3 hilos (conexión Edición)
- Fase única a 2 hilos
- $2^{1/2}$ elemento batimétrico
- Líneas trifásicas a 4 hilos (con el neutro desconectado)

En la figura 3.2 se muestra la conexión utilizada para la realización de las mediciones en el estudio.



3.2.3 Puntos donde se han realizado las mediciones

(Volver)

Este es el esquema de conexión de las barras y su posición por armarios donde se realizaron las mediciones en la subestación.

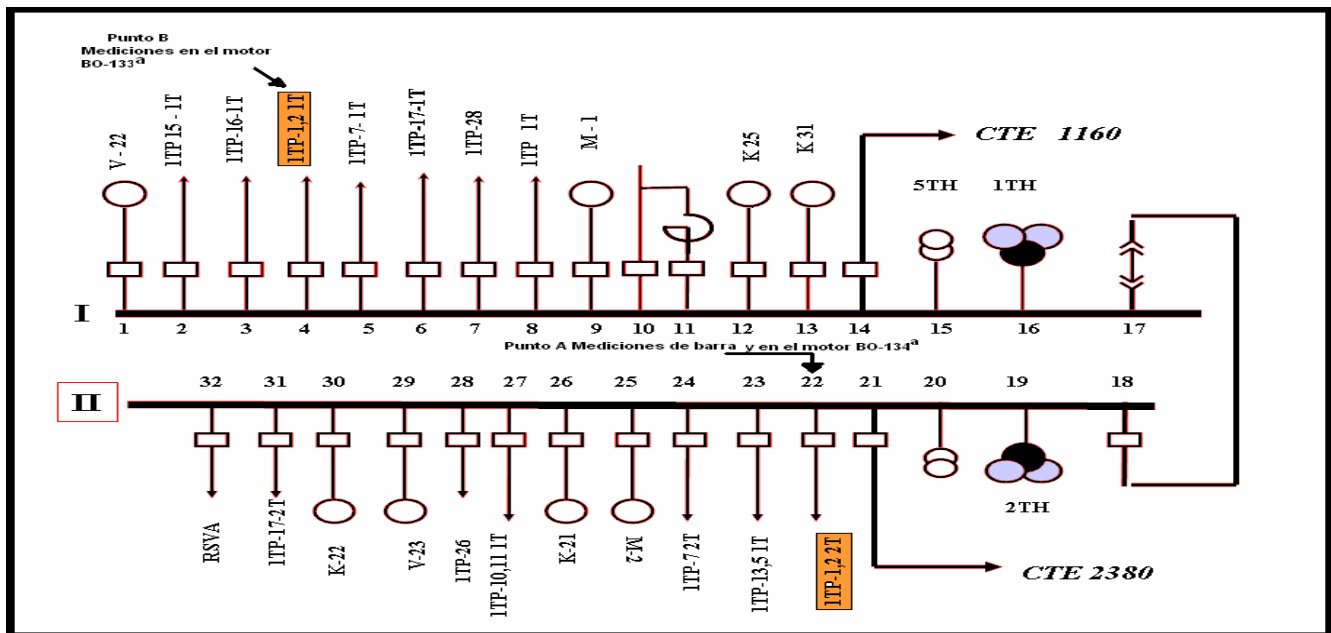


Figura3.3: Esquema de 1ra y 2da sección de barra de la 1RS.

En el anexo I se muestra el mono lineal completo de la Planta de Lixiviación y Lavado.

3.3 Análisis de los armónicos generados

(Volver)

Los siguientes gráficos muestran el comportamiento de los armónicos de corriente y tensión en el variador y también en la sección de barra 4W-25.

Comportamiento de los armónicos de corriente

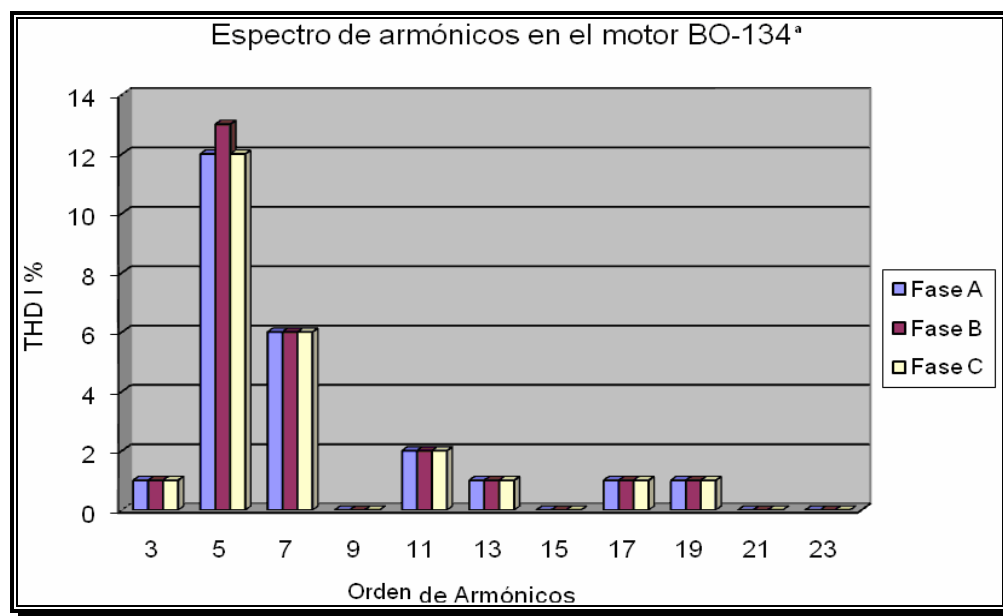


Figura 3.5: Gráfico del comportamiento de los armónicos de corriente en la Planta de Lixiviación en la 3ra etapa en SD-131^a en la bomba BO-134^a.

El gráfico de la figura 3.5 muestra que los mayores valores de corrientes armónicas corresponden al 5^{to} y 7^{mo} armónico. Por lo que trabajaremos en función de reducir los mismos, para que su efecto sobre el sistema sea menor. Específicamente los valores promedios que se registraron.

Si comparamos los valores obtenidos con otros estudios realizados [\[3, 9 y 13\]](#) en el variador, observamos un incremento en un 5% de los armónicos de corriente, lo que demuestra que estos han adquirido mayor fuerza, por tanto es imprescindible trabajar sobre la reducción de los mismos para mitigar sus efectos sobre el sistema.

Comportamiento de los armónicos de tensión

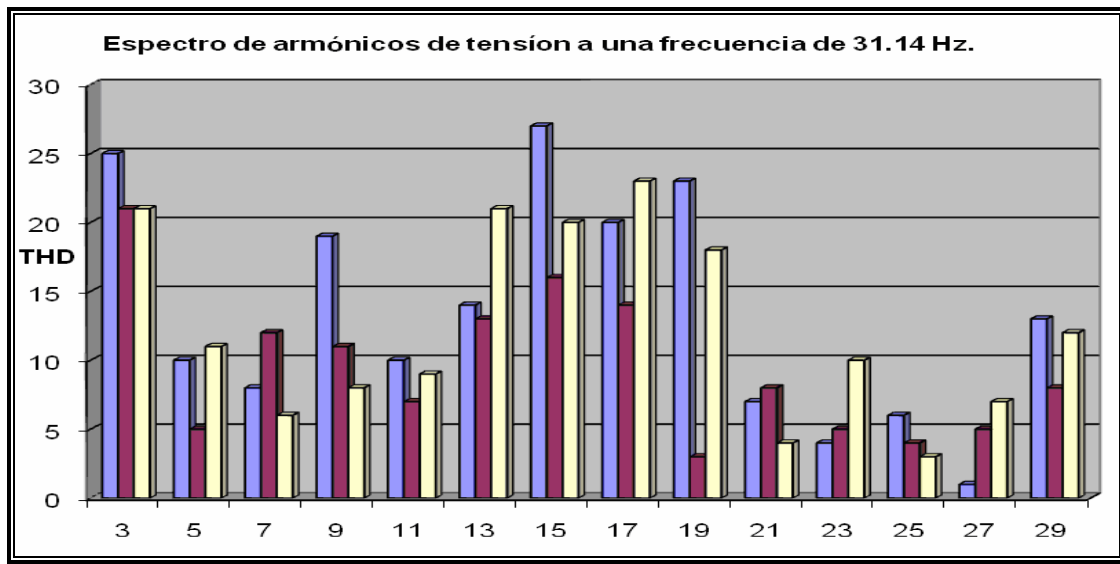


Figura 3.6: Gráfico del comportamiento de los armónicos de tensión en Planta de Lixiviación en la 3^{ra} etapa en SD-131^a en la bomba BO-134^a.

Si comparamos los resultados obtenidos en la figura anterior con lo que plantea la norma IEEE-519 con respecto a los valores de tensión admisibles para distintos tipos de niveles de tensión, comprobamos que los armónicos de tensión están por encima de los límites admisibles, puesto que la norma establece tensiones armónicas no mayores del 5% y el valor mayor de las mediciones tomadas esta en el rango del 13 % aproximadamente para los de corriente. Sin embargo para bajas frecuencias los armónicos son elevados lo que demuestra que si trabajan por un largo periodo en esas condiciones puede dar lugar a calentamientos excesivos produciendo el deterioro de estos y cuanto más tiempo trabajen bajo esas condiciones menor será el tiempo de vida que pueda este tener.

En la siguiente gráfica se muestra el comportamiento de las ondas de corriente y tensión con la influencia de los armónicos, existe una deformación de estas ondas producto a la característica que presenta esta carga, donde tiene incorporado elementos no lineales que inyectan armónicos a la red de suministro y provocan estas deformaciones que luego repercuten en otras cargas conectadas al sistema.

Gráfica que muestra el espectro de armónicos en los accionamientos de la barra 4W-25

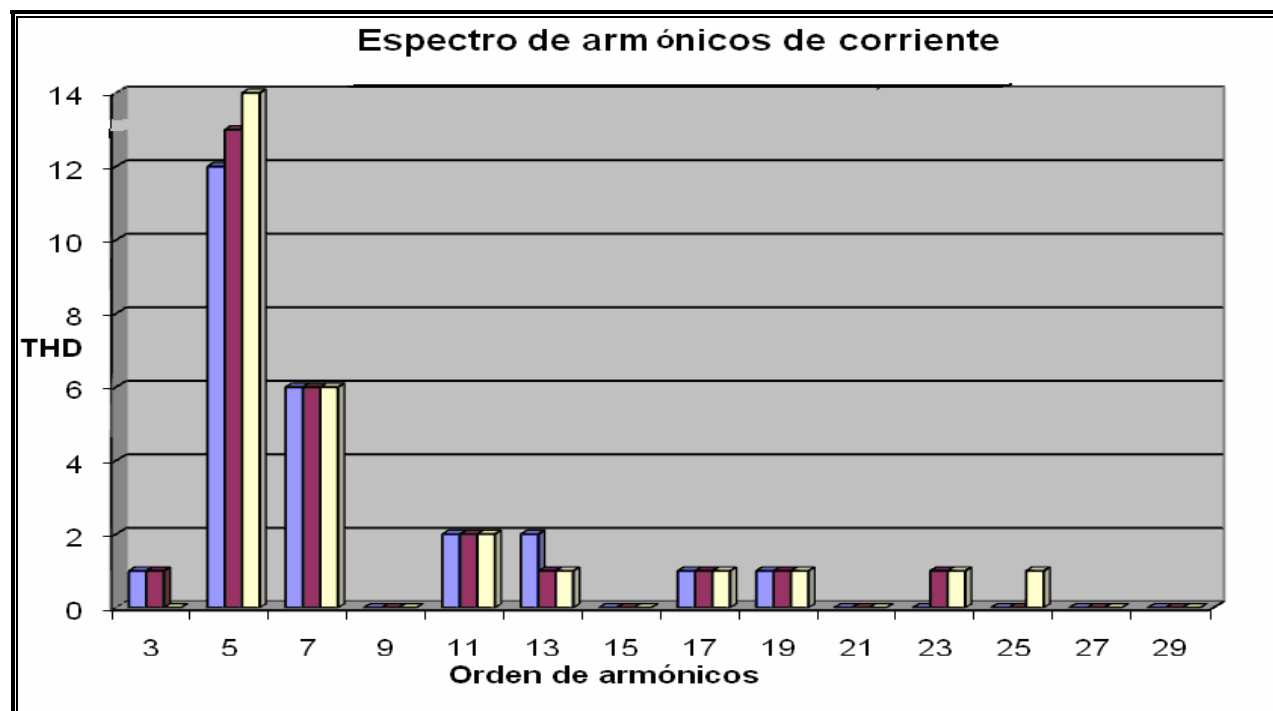


Figura 3.7: Espectro de Armónicos de corriente.

Aquí se muestra que solo los armónicos de corriente que influyen en el sistema son el 5^{to} y el 7^{mo}.

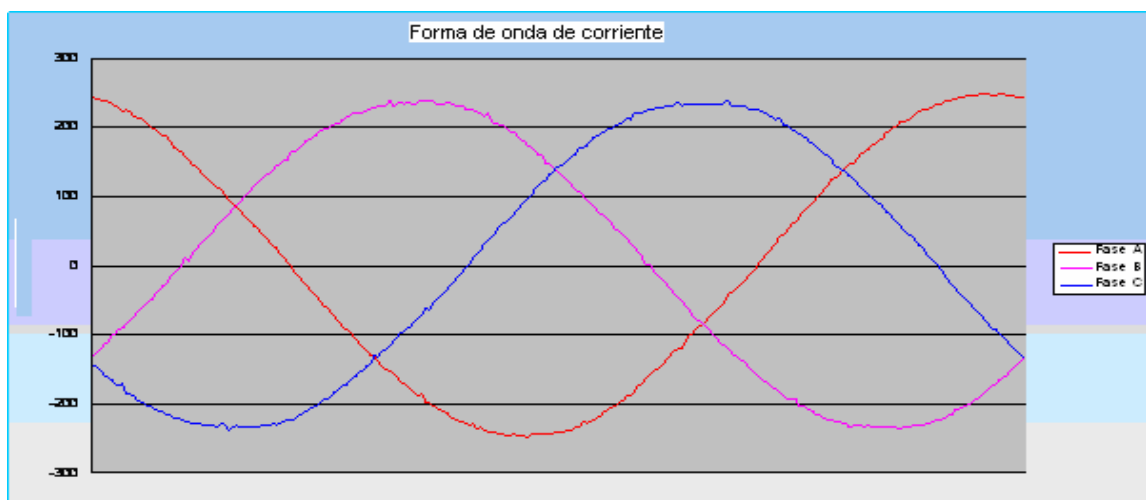


Figura 3.9: Gráfico de la onda de corriente con la influencia de los armónicos

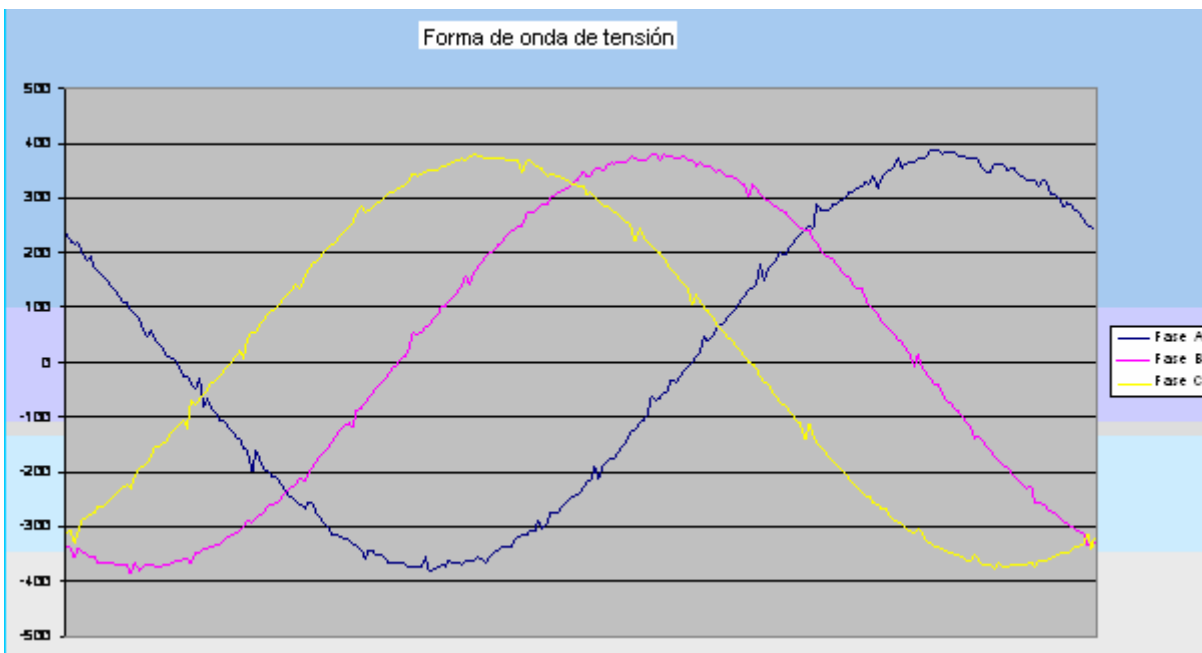


Figura 3.10: Gráfico de la onda de tensión con la influencia de los armónicos.

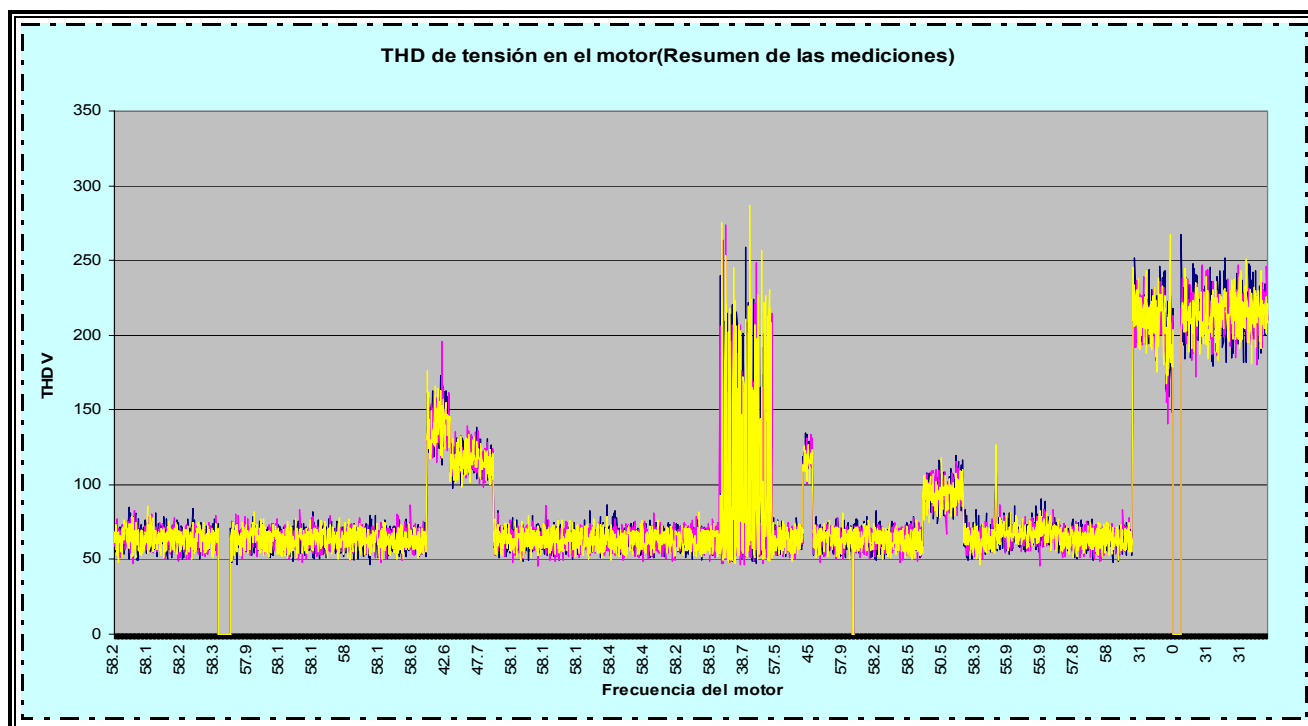


Figura 3.11: Valores promedios de armónicos de tensión en función de la frecuencia.

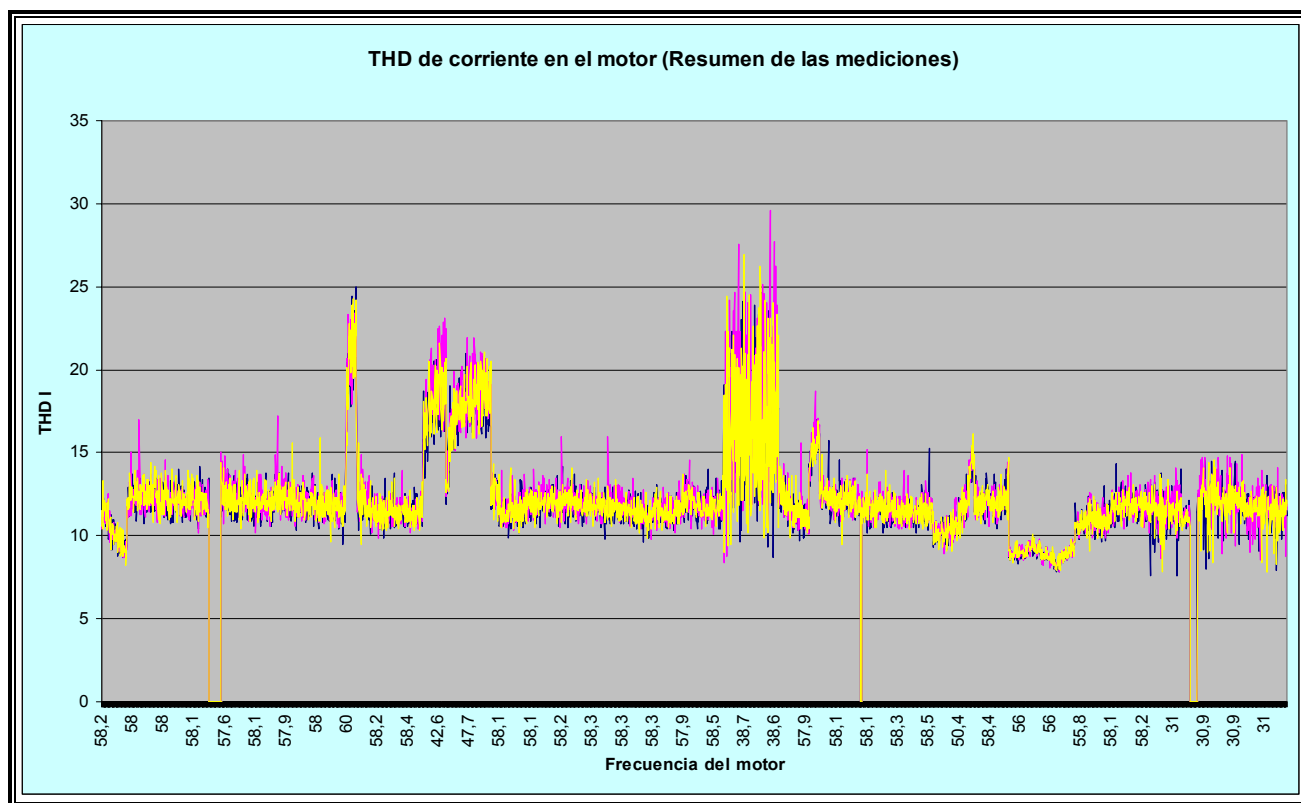


Figura 3.12: Valores promedios de armónicos de corriente en función de la frecuencia.

En los gráficos anteriores se muestra los valores promedios de las mediciones mostrando para el THD I un valor de 12,5 % y para los de THD V de 85,2 %. También es de considerar que para bajas frecuencia los valores de THD aumentan es decir que el accionamiento se ve afectado por trabajar a ese régimen pudiendo traer consigo problemas en el motor.

En la tabla 3.2 se pueden apreciar las distintas magnitudes sin la aplicación del filtro, donde muestra el efecto de los armónicos.

Medidas promedios de armónicos

Tabla 3.2: Mediciones promedias realizadas durante más de un mes.

# Armónicos	1	3	5	7	9	11	13	Σ THD%
THD _v (%) Motor	100	0	0,66	0,66	0,21	0,13	0,1	85,20 %
THD _i (%) Motor	100	1	10,89	4,66	0,11	2	1	12,53 %
THD _v (%) Acc.	100	1	1	1	0,3	0,6	0,2	2,82 %
THD _i (%) Acc.	100	1	13,5	6,11	0,4	2	1	9,30 %

En la tabla 3.2, se recogen distintas magnitudes donde se aprecia claramente la acción de los armónicos que afectan al sistema.

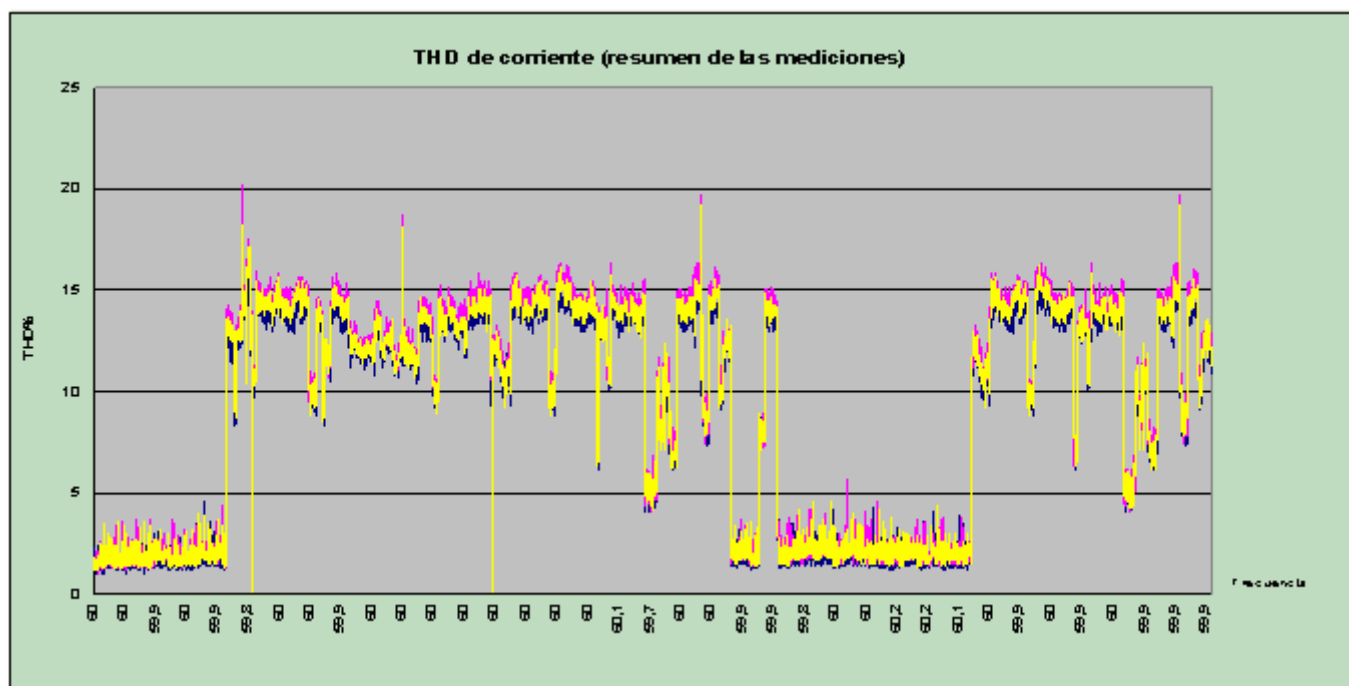


Figura 3.13: THD de corriente (resumen) en el accionamiento.

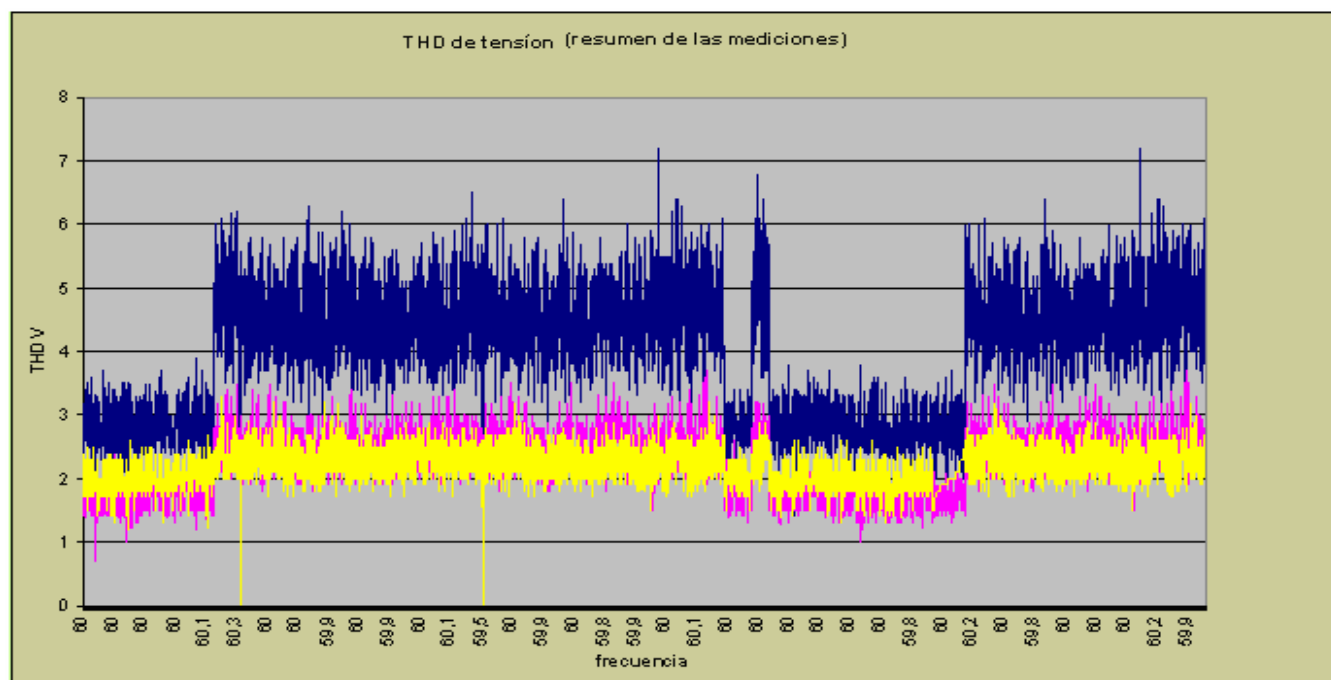


Figura 3.14: THD de tensión (resumen) en el accionamiento.

Si comparamos los resultados obtenidos con lo que plantea la norma IEEE-519 con respecto a los valores de tensión admisibles para distintos tipos de niveles de tensión, nos percatamos que estos se encuentran en niveles por encima de los valores que estos deberían tener por norma. En cuanto a los armónicos de corriente, se manifiesta mayor problema con la influencia del 5^{to} y 7^{mo}, debido a que son mayores los niveles de distorsión, esto trae como consecuencia pérdidas al sistema, por tal motivo debemos trabajar en este sentido para lograr una disminución de los mismos y por consiguiente mejorar la calidad de la energía y su eficiencia.

3.4 Propuesta de solución

[\(Volver\)](#)

Por los resultados obtenidos en las mediciones realizadas, atendiendo a los gastos y prejuicios que los armónicos presentan en la red se propone la solución de un... **(((Filtro Pasivo)))**. Con el uso de un filtro sintonizado simple de dos ramas.

Filtro sintonizado simple: Es el más sencillo, consiste en un banco de condensadores conectados en serie con un inductor. Ambos se sintonizan a la frecuencia que se desea atenuar. El filtro pasivo es un filtro que se sintoniza para una armónica en especial, o un rango determinado.

Este filtro se sintoniza a la frecuencia armónica (5^{ta} y 7^{ma}) que son los más pronunciados, o sea que, para estas frecuencias, las reactancias inductiva y capacitiva son iguales y por lo tanto se anulan, entonces la impedancia que presentará el filtro para esta frecuencia es mínima (valor igual a la resistencia), y absorberá gran parte de la corriente armónica contaminante. El factor de calidad del filtro, determina la forma de la característica de impedancia, y hace que ésta sea más o menos estrecha o abrupta.

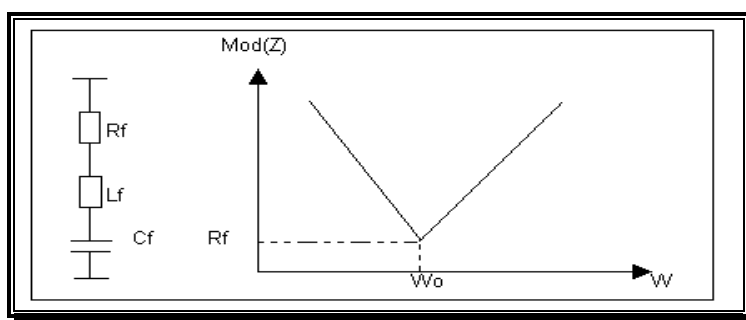


Figura 3.13: (a) Filtro sintonizado simple, (b) comportamiento en frecuencia.

3.4.1 Diseño y características específicas de los filtros para su selección [\(Volver\)](#)

Para el diseño de un filtro se tienen en cuenta varios criterios de selección. Los criterios que se deben tener en cuenta en la selección de un filtro se detallan a continuación:

- Impedancia Z
- Distorsión de voltaje
- Distorsión de Corriente

Consideraciones en el diseño

Las consideraciones que se deben tener en cuenta para el diseño de un filtro independientemente de la función que el mismo vaya a realizar son los siguientes:

- Tipos de fuentes contaminantes
- Nivel de corrientes armónicas
- Espectro de corrientes armónicas
- Potencia reactiva requerida en la red
- Valor límite de distorsión
- Respuesta en frecuencia de impedancias Z en el punto de conexión del filtro para diferentes configuraciones y puntos de operación de la red
- Frecuencias de resonancia paralela antes y después de la conexión del filtro.
- Tensiones y corrientes transitorias durante y después de la conexión de filtros a la red.
- Determinación de los valores nominales de componentes.

3.4.2 Ecuaciones generales para el diseño de un filtro sintonizado simple

[\(Volver\)](#)

Este filtro elimina una armónica determinada y consiste en un banco de condensadores conectado en serie con un inductor.

$$\omega_h = 2\pi fh \quad (3.1)$$

ω es la frecuencia angular, Donde h es el armónico al cual se quiere sintonizar y f es la frecuencia fundamental.

$$C_F = \frac{1}{2\pi fX_c} \quad (3.2)$$

Capacitancia del filtro, Donde X_c es la reactancia capacitiva del filtro y f es la frecuencia.

$$L_F = \left[\frac{1}{2\pi 60 h \sqrt{C_F}} \right]^2 \quad (3.3)$$

Inductancia del filtro, Donde h es el armónico y C_F es la capacitancia del filtro.

$$Q = \frac{h * X_L}{R} \quad (3.4)$$

El factor de calidad Q de la reactancia, Donde R =resistencia en serie de los elementos filtrantes, h = armónica sintonizada, X_L =reactancia de la bobina de filtrado a la frecuencia fundamental

$$X_{Lh} = \omega_h L_F \quad (3.5)$$

Reactancia inductiva para el armónico. Donde L_F es la inductancia del filtro y ω_h es la velocidad angular.

$$R_F = \frac{X_{Lh}}{Q} \quad (3.6)$$

Resistencia interna del inductor R_f , Donde Q es el factor de calidad del filtro [\[24\]](#).

$$Z = R + j\left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right) \quad (3.7)$$

Impedancia de filtro, Donde:

R = Resistencia, (Ω)

L = Inductancia del filtro, (mH)

C = Capacitancia del filtro, (μF)

ω = Velocidad angular, también se da por la relación $2\pi \cdot f$ (rad/s)

Tamaño del condensador:

$$X_c = \frac{1}{\omega C} = \frac{|V_L|^2}{Q_c} \quad (3.8)$$

Reactancia capacitiva. Determinado por la potencia reactiva requerida. Donde:

V_L = Tensión a frecuencia fundamental de línea; (kV)

Q_c = Potencia reactiva que se desea compensar; (kVAr)

Nota: nunca coincide con el valor total del sistema; (MVar; kVAr)

Tamaño del inductor:

$$X_L = \frac{X_c}{h_0^2} \quad (3.9)$$

Reactancia inductiva: Determinada por la reactancia capacitiva y la armónica que se desea atenuar.

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (3.10)$$

Frecuencia de Sintonía f_0 : Determinada por la frecuencia armónica que se desea atenuar.

Amplificación de voltaje a la frecuencia de sintonía:

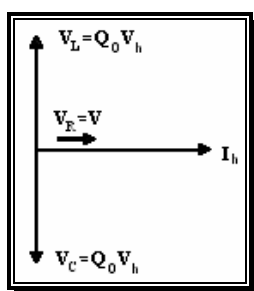


Figura 3.14: Amplificación de las tensiones a la frecuencia de sintonía de un filtro sintonizado simple.

Tensión fundamental en el condensador. A la frecuencia fundamental la tensión en el condensador se incrementa a través de sus terminales debido a la conexión en serie con el inductor.

$$V_{c1} = \frac{h_o^2}{h_o^2 - 1} V \quad (3.11)$$

Potencia reactiva de condensadores (frecuencia fundamental):

$$kVAR_c = \frac{V_{C1L-L}^2}{X_c} \quad (3.12)$$

Potencia reactiva del filtro (frecuencia fundamental):

La presencia del reactor cambia la potencia reactiva efectiva.

$$kVAR_{Filtro} = \frac{V_{C1L-L}^2}{X_c - X_L} - kVAR_c \frac{h_o^2}{h_o^2 - 1} \quad (3.13)$$

El problema de los filtros pasivos.

La figura 3.15, muestra el mecanismo de acción de un filtro pasivo, el que consiste en proveer un camino de baja impedancia para las corrientes armónicas. De este modo, la corriente por la fuente (I_s) es mucho más sinusoidal donde, (I_L) es la corriente de la carga no lineal.

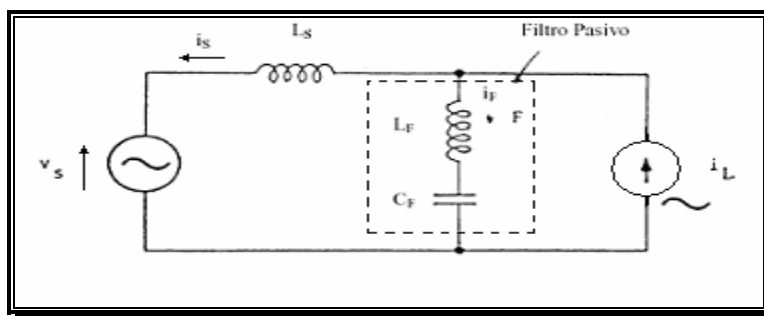


Figura 3.15. Principio de funcionamiento del filtro en paralelo pasivo



Resumiendo estos problemas que entre otros son:

- El comportamiento del filtro es afectado por la impedancia de la fuente, la que cambia al variar la topología de la red.
- El filtro en paralelo presenta una resonancia paralela con la red a la frecuencia
- Están sintonizados para una carga determinada, por lo que se desintonizan al agregar nuevas cargas, lo que obliga a reajustarlos.
- No responden a variaciones de la carga.
- Mal comportamiento.

No obstante estos problemas, los filtros pasivos tienen la ventaja de que son una tecnología madura, conocida y de costo razonable.

3.4.3 Cálculo del filtro en el diseño (Filtro sintonizado simple)

[\(Volver\)](#)

Valores de potencia activa, reactiva, aparente, tensión, corriente y factor de potencia promedio de las mediciones realizadas al accionamiento variador-motor y en la barra 4W-25.

Tabla 3.3: Valores promedios en el motor.

Valores promedios de las mediciones en el motor.	
Promedio de U_f =	282,03 V
Promedio de I_f =	58,21 A
Promedio de P_3 =	31,63 kW
Promedio de Q_3 =	29,03 kVAr
Promedio de S_3 =	42,93 kVA
Promedio de FP =	0,7367

Tabla 3.4: Valores promedios en los accionamientos.

Valores promedios en los accionamientos.	
Promedio de U_f =	259,27 V
Promedio de I_f =	220,39 A
promedio de P_3 =	139.54 kW
promedio de Q_3 =	90,73 kVAr
promedio de S_3 =	166,45 kVA
promedio de FP =	0,8383

Para el cálculo del banco de capacitores se utiliza la siguiente fórmula (3.14) para poder ajustar la parte inductiva después con los parámetros que intervienen para su selección.

Propuesta del banco de capacitores en el motor.

$$\begin{aligned}kVA_r &= p_a * (\tan \theta_s - \tan \theta_c) \\kVA_r &= 31,63 (\tan(\cos^{-1}(0,736)) - \tan(\cos^{-1}(0,92))) \\kVA_r &= 31,63 * (0,9198 - 0,4259) \\kVA_r &= 15,62 \text{ kVA}_r\end{aligned}\tag{3.14}$$

Para el cálculo del filtro se utilizó el software llamado FILMARQ con el cual se calculan todos los parámetros dando este el siguiente reporte de los datos a considerar del filtro.

Tabla 3.5: Cálculo del filtro generado por el programa FILMARQ para el 5^{to} armónico.

TECHINT	-----	CÁLCULO DE	EL FILTRO-----	
TEPGE			--prog.300-E-502-	-
			11-27-2009	
----- unidades		Fase A	Fase B	Fase C
tensión compuesta en	kV	0,44	0,4488	
sobre tensión permanente	p.u.	1,02		
frecuencia	Hz	60		
potencia neta filtro	MVar	0,015	0,007812	0,01562
orden de armónica	=	5		
armónica de corriente	A	13.5		
tensión fund. S/capacit.	kV	0,4583	0,4675	
potencia capacitiva	MVar	0,01562	8,1380E-03	1,6271E-02
reactancia capacitiva	Ω	13,4444	25,8133	12,9066
reactancia inductiva	Ω	0,5377	1.0325	0,5162
caída armónica	kV	0,0363	6.9696E-02	0,03484
tensión dimensionamiento	kV	0,3009	0,3343	0,2994
tensión máxima de dim.	kV	0,3062	0,3396	0,3047
corriente fundamental	A	19,6823	10,2512	20,5024
capacidad por fase	μF	197,2995	102,7602	205,5204
inductancia por fase	mH	1,4265	2,73888	1,36944
potencia capacitores	MVA	2.0924E-02	0,0225	4,4999E-02
número de capacitores	=	5	3	6
tamaño de capacitores	kVA =	7.5		
tensión total	kV	0,3062	0,44	0,44
tensión individual capac.	kV	0,44		
número en serie	=	1		
número de paralelos	=	2	1	2

Tabla 3.6: Cálculo del filtro generado por el programa FILMARQ para el 7^{mo} armónico.

TECHINT	-----	CÁLCULO DE	EL FILTRO-----	
TEPGE			--prog.300-E-502-	-
			11-27-2009	
----- unidades		Fase A	Fase B	Fase C
tensión compuesta en	kV	0,44	0,4488	
sobre tensión permanente	p.u.	1,02		
frecuencia	Hz	60		
potencia neta filtro	MVar	0,015	7,6562E-03	0,0153
orden de armónica	=	7		
armónica de corriente	A	6,11		
tensión fund. S/capacit.	kV	0,45	0,45	
potencia capacitiva	MVar	0,01531	7,8157E-03	1,5631E-02
reactancia capacitiva	Ω	13,1755	25,8133	12,9066
reactancia inductiva	Ω	0,2688	0,5268	0,2634
caída armónica	kV	1,1500E-02	2,2531E-02	1,1265E-02
tensión dimensionamiento	kV	0,2708	0,2818	0,2705
tensión máxima de dim.	kV	0,2764	0,2870	0,2757
corriente fundamental	A	19,6823	10,0462	20,0924
capacidad por fase	μF	201,3261	102,7602	205,5204
inductancia por fase	mH	0,7131	1,3973	0,6986
potencia capacitores	MVA	1,7346E-02	0,0225	4,4999E-02
número de capacitores	=	5	3	6
tamaño de capacitores	kVA =	7,5		
tensión total	kV	0,2760	0,44	0,44
tensión individual capac.	kV	0,44		
número en serie	=	1		
número de paralelos	=	2	1	2

3.4.4 Cálculo de la eficiencia en el accionamiento

[\(Volver\)](#)

La eficiencia del inversor sinusoidal de tensión VSI a PWM, puede ser calculada usando la expresión (3.15) dada por [28] siguiente:

$$\eta_{VSI} = \frac{P_{VSI} - P_{\Delta P}}{P_{VSI}} \quad (3.15)$$

Donde:

P_{VSI} – Es la potencia de la fuente inversora de tensión, [kW].

$P_{\Delta P}$ – Son las pérdidas de la potencia dentro de la fuente inversora de tensión, [kW].

La eficiencia del motor asincrónico puede ser determinada usando la conocida expresión dada en (3.16):

$$\eta_{MA} = \frac{P_s}{P_e} = \frac{P_{mec}}{P_e} = \frac{T_{carga} \cdot \omega_{MA}}{P_e} \quad (3.16)$$

Donde:

P_s – Es la potencia de salida en el árbol del motor asincrónico, [kW]

P_{mec} – Es la potencia mecánica en el árbol del motor asincrónico, [kW]

T_{carga} – Es el torque de carga o resistivo del motor eléctrico, [N.m]

ω_{MA} – Es la velocidad angular del motor asincrónico, [rad/s]

P_e – Es la potencia de entrada del motor asincrónico, [kW]

La eficiencia del motor se calcula también por la formula:

$$\eta = \frac{P_e - \Delta p}{P_e} \quad (3.17)$$

Y también usando despejes por la siguiente:

$$\eta = \frac{P_s}{P_e} = 1 - \frac{\Delta P}{P_e} \quad (3.18)$$

La eficiencia del accionamiento en su conjunto es:

$$\eta_{acc} = \eta_{motor} * \eta_{convertidor} \quad (3.19)$$

La potencia reactiva con condensadores se calcula por la diferencia de las potencia reactivas relacionados con el triangulo de potencia en la figura (2.7).

$$Q_{cc} = Q_{sc} - Q_{kVA_r} \quad (3.20)$$

$$Q_{cc} = 29,03 - 15,62$$

$$Q_{cc} = 13,41 \text{ kVA}_r$$

La potencia aparente se reduce a:

$$S = \sqrt{P_e^2 + Q_{cc}^2} \quad (3.21)$$

Por lo que la nueva potencia aparente será:

$$S = \sqrt{31,63^2 + 13,41^2}$$
$$S = 34,36 \text{ kVA}$$

Y por lo tanto el nuevo factor de potencia será:

$$\cos(\varphi) = \frac{P}{S} \quad (3.22)$$

Calculando:

$$\cos(\varphi) = \frac{31,63kW}{34,36kVA} = 0,9207$$

Método del circuito equivalente, tiene en cuenta el cálculo partiendo de las componentes del circuito eléctrico equivalente del motor de inducción, tomando los valores de las resistencias, reactancias e inductancias a una determinada temperatura de trabajo de la máquina.

$$\Delta p_{totales} = I^2 \cdot R_{eq} \quad (3.23)$$

$$Z_{eq} = \frac{X_m(X_s + X_r) + jX_m(R_s + \frac{R_r}{s})}{R_s + \frac{R_r}{s} + j(X_s + X_r + X_m)} \quad (3.24)$$

De esta fórmula se calcula la impedancia equivalente en el motor con los datos que se calculan por el programa (Param_Mon_Ind.p) dado en [19] y validado por [5], se muestra este resultado:

Tabla 3.7: Datos según software (Param_Mon_Ind.p).

Principales datos nominales del motor escogido						
Pn(W)	Un(V)	In(A)	n(rpm)	Cos(Fi)	ks	
40000,00	440,00	63,00	1180,00	0,88	2,00	
Parámetros del Circuito Equivalente en Ohm						
	Rs	Xs	Rr	Xr	Rm	Xm
Serie	0,0000	0,3297	0,0674	0,7693	15,609	177,65
Paralelo	0,0000	0,3297	0,0674	0,7693	2.037,61	179,02

Sustituyendo los valores anteriormente expuestos en la tabla y calculando se obtiene:

$$Z_{eq} = 3,85 \angle -3,1^\circ$$

$$Z_{eq} = R + j(X_L + X_C) \quad (3.25)$$

$$Z_{eq} = 3,85 + j - 0,209\Omega$$

Por lo que se toma la parte real de la Z_{eq} que pertenece a la parte resistiva del motor (R).

A continuación se llevara a cabo una metodología para el cálculo de las pérdidas en el accionamiento del motor sin condensador:

$$I_r = I_{med} * \sin(\varphi) \quad (3.26)$$

$$I_r = (58/1,73) * \sin(\cos^{-1}(0,73))$$
$$I = 22,91A$$

$$I = \sqrt{I_a^2 + I_r^2} \quad (3.27)$$

$$I = \sqrt{(58/1,73)^2 + 22,91^2}$$
$$I = 40,61A$$

$$\Delta p_{sc} = I^2 * R_{eq} \quad (3.28)$$

$$\Delta p_{sc} = 40,61^2 * 3,85$$
$$\Delta p_{sc} = 6362,12 \text{ W}$$

$$\eta = \frac{P_e - \Delta p}{P_e} \quad (3.29)$$

$$\eta = \frac{31631,69 - 6362,12}{31,63}$$
$$\eta = 0,7988 * 100 = 79,88\%$$



Pérdidas con condensador:

$$I_r = I_{med} * \sin(\varphi)$$

$$I = (58/1,73) * \sin(\cos^{-1}(0,911))$$

$$I = 13,14 \text{ A}$$

$$I = \sqrt{I_a^2 + I_r^2}$$

$$I = \sqrt{(58/1,73)^2 + 13,14^2}$$

$$I = 36,01 \text{ A}$$

$$\Delta p_{cc} = I^2 * R_{eq}$$

$$\Delta p_{cc} = 36,01^2 * 3,85$$

$$\Delta p_{cc} = 4994,98 \text{ W}$$

$$\eta = \frac{31631,69 - 4994,99}{31631,69}$$

$$\eta = 0,8420 * 100 = 84,2\%$$

$$\Delta p_{totales} = \Delta p_{sc} - \Delta p_{cc}$$

$$\Delta p_{totales} = 6362,19 - 4994,99$$

$$\Delta p_{totales} = 1367,13 \text{ W} \quad (3.30)$$

Por lo tanto la eficiencia del accionamiento en su conjunto sin el uso de condensadores puede ser calculada por la siguiente expresión:

$$\eta_{acc} = \eta_{motor} * \eta_{convertidor}$$

$$\eta_{acc} = 0,79 * 0,99$$

$$\eta_{acc} = 0,7821 * 100$$

$$\eta_{acc} = 78,21\%$$



Por lo tanto la eficiencia del accionamiento en su conjunto con el uso de condensadores puede ser calculada por la siguiente expresión:

$$\eta_{acc} = \eta_{motor} * \eta_{convertidor}$$

$$\eta_{acc} = 0,842 * 0,99$$

$$\eta_{acc} = 0,8336 * 100$$

$$\eta_{acc} = 83,36\%$$

El accionamiento mejora su eficiencia en:

$$\eta_{mejorada} = \eta_{cc} - \eta_{sc} \quad (3.31)$$

$$\eta_{mejorada} = 83,12\% - 78,21\%$$

$$\eta_{mejorada} = 5,14 \%$$

Una mejora significativa es de vital importancia puesto que solo así se mejora la calidad de onda tanto en el accionamiento como en el sistema.



3.5 Conclusiones parciales del capítulo

[\(Volver\)](#)

En este capítulo con la realización de la parte experimental y la aplicación de la metodología se llegan a las siguientes conclusiones:

- Las mediciones realizadas en los circuitos de entrada de los variadores de velocidad en el centro de control de motores de 480 volts de la Planta de Lixiviación, corroboran la presencia de componentes de armónicos de la corriente del **5^{to}** y **7^{mo}** orden.
- La potencia reactiva fue compensada usando filtros pasivos y garantizan un THD menor a un 5% para la corriente.
- Las pérdidas de energía de los accionamientos debido a la presencia de armónicos con la utilización de variadores de velocidad están en el orden de un **5,14** %, lo cual disminuye su eficiencia.



Capítulo IV

Valoración económica del trabajo

- 4.1 Introducción
- 4.2 Evaluación de las pérdidas por el consumo de armónicos
- 4.3 Análisis económico de los resultados obtenidos
 - 4.3.1 Cálculo de los costos
 - 4.3.2 Cálculo de los parámetros económicos VAN y TIR
- 4.4 Conclusiones parciales del capítulo

4.1 Introducción

[\(Volver\)](#)

En este capítulo se evalúan las pérdidas en función de la instalación de filtros en los circuitos de potencia que alimentan los accionamientos eléctricos con variadores de velocidad en la Planta de Lixiviación, la eficiencia del accionamiento, tomando en cuenta varios aspectos de la red a la cual se le reducirán las mismas y se realiza la valoración económica de la propuesta del filtro.

4.2 Evaluación de las pérdidas por el consumo de armónicos

[\(Volver\)](#)

El mejoramiento de la eficiencia del motor eléctrico está determinada por la energía total ahorrada por el uso de los filtros que modifica el trabajo en el motor se puede estimar como:

$$E_{Miahorr} = N_b * \left(\frac{1}{\eta_{MI1}} - \frac{1}{\eta_{MI2}} \right) * h_{totales} \quad (4.1)$$

Donde:

$E_{Miahorr}$ – es la energía total ahorrada en el motor eléctrico, [kWh]

N_b – es la potencia del motor-bomba, [kW]

η_{MI1} – es la eficiencia del motor eléctrico sin el filtro, [%]

η_{MI2} – es la eficiencia del motor eléctrico con el filtro, [%]

$h_{totales}$ – horas totales de operación del accionamiento, [horas]



Sustituyendo los valores y para todo un año

$$E_{MIahorr} = 40 * \left(\frac{1}{78,81} - \frac{1}{83,12} \right) * 8760$$

$$E_{MIahorr} = 231,05 \text{ kW/año}$$

La tarifa eléctrica en la industria posee un costo en dependencia del horario de trabajo, el precio de la energía es de 105,215 CUC/MW/mes consumido, por lo que en términos económicos se determina por:

$$\Delta E_{MIahorr} = \Delta E_{MIahorr} * \text{costo de la energía} = \$ \quad (4.2)$$

$$\Delta E_{MIahorr} = 231,05 \text{ kW} / \text{año} * 0,105215 \text{ kW/mes/CUC} * 12 \text{ meses}$$

$$\Delta E_{MIahorr} = \$291,12 \text{ CUC}$$

Este ahorro por concepto de pérdidas en la barra de 16 motores nos da la cantidad en dinero que se pierde solo en esa sección de la planta.

Tabla 4.1: Totales ahorrados por concepto de armónicos.

Potencia	Cantidad	Energía unidad	Energía unidad	Energía de ahorro	Energía de ahorro
[kW]	[unidad]	[kW/h] al año	[\$ /año]	[kW/año] Total	[\$ /año] Total
40	4	231,05	291,12	924,2	1164,49
55	10	317,69	400,29	3176,9	4002,97
60	2	346,57	436,69	693,14	873,37
Total ahorrado		895,32	\$ 1128,11	4794,24	\$ 6040,84

Generalizando este método solo en la Planta de Lixiviación en todas las barras que posee y teniendo un total de 48 accionamientos con variadores de velocidad que poseen las mismas características o parecidas se ahorraría en la empresa un total aproximado de **\$289 920,00 CUC** al año.

4.3 Análisis económico de los resultados obtenidos

[\(Volver\)](#)

Para realizar un análisis económico de los resultados obtenidos en el epígrafe anterior se debe tener en cuenta los gastos incurridos por inversión, es decir por la compra del filtro en general, por el tiempo de montaje del filtro en relación con los ahorros adquiridos en un año por la instalación del filtro.

A continuación se analizarán por separados cada uno de los gastos que se realizaran para de esta manera determinar el tiempo de amortización o el tiempo de recuperación de la inversión.

4.3.1 Cálculo de los costos

[\(Volver\)](#)

El filtro está compuesto por dos elementos eléctricos conectados en serie que son:

1. Inductor.
2. Capacitor.

De los dos elementos son significativos:

$$C_{\text{filtro}} = C_L + C_C \quad (4.4)$$

Donde:

C_{filtro} : costo total del filtro

C_L : costo del inductor

C_C : costo del condensador

Por catálogo de **www.geelectrical.com** escojo el filtro: ([ver anexo II.](#))

Tabla 4.2: Precio de los componentes del filtro.

Propuesta del filtro con las siguientes características:					
	cantidad	Potencia	tensión	observaciones	Precio en CUC
	2	15 kVAr	480 V	Capacitor 65L808	\$ 247,00
	2	1,5 mH	480 V	Inductor 37G00801	\$ 200,00
Total	4				\$ 894

Por lo que el precio total del filtro es de **\$ 894 CUC**.

Costo de montaje del filtro se utilizará como mano de obra dado en [\[24\]](#), para tres trabajadores de la industria:

Técnico superior

Técnico medio

Obrero calificado

Estos trabajadores tienen un salario diario distinto que devengan por la labor que desempeñan cada uno de estos:

Técnico superior: 15 MN

Técnico medio: 13,33 MN

Obrero calificado: 11,66 MN

El tiempo de montaje del filtro, se estima que sea de 3 días, por lo que el salario de cada uno será:

Técnico superior: 45 MN

Técnico medio: 40 MN

Obrero calificado: 35 MN



$$C_{montaje} = C_{ts} + C_{tm} + C_{oc} \quad (4.5)$$

$$C_{montaje} = 45 + 40 + 35 = \$120MN$$

Donde:

$C_{montaje}$: Costo de montaje

C_{ts} : Salario del técnico superior

C_{tm} : Salario del técnico medio

C_{oc} : Salario del obrero calificado

Por lo que el costo de montaje de los filtros será de \$120 MN o 5 CUC.

Si sumamos el costo del montaje, con el costo de la compra de los filtros, dado en (4.4) y en (4.5) nos dará el costo total de la inversión.

$$C_{total} = C_{montaje} + C_{filtro} \quad (4.6)$$

$$C_{total} = 894 + 5$$

$$C_{total} = \$899CUC$$

El tiempo de recuperación de la inversión esta dado por la relación entre la inversión y el ahorro que se logra con la instalación del filtro,

Calculándolo para un solo motor.

$$T_{RI} = \frac{Inversión}{Ahorro} \quad (4.7)$$

$$T_{RI} = \frac{899}{291,08} = 3 \text{ años} + 33 \text{ días}$$

Este indicador cumple con las normas establecidas $TRI \leq 5 \text{ años}$.

Si se hace la misma inversión en todos los motores y calculando las pérdidas utilizando la misma metodología en estos, el tiempo de recuperación de la inversión es de 2 años, 4 meses y 26 días.

4.3.2 Cálculo de los parámetros económicos VAN y TIR

[\(Volver\)](#)

El análisis económico es la demostración final y decisiva a la hora de diseñar o modificar cualquier sistema industrial debido al costo de las inversiones. Entre los métodos que existen para comparar alternativas de inversión están:

- Método del Valor Actual Neto (VAN)
- Método del Valor del Futuro
- Método del Período de Reembolso
- Método de la Tasa Interna de Retorno (TIR)

Para este análisis se escogió el método del VAN y el TIR, a continuación definiremos todos los conceptos para la mejor comprensión de la valoración económica.

Para la utilización del VAN es necesario una tasa de actualización (k). Esta tasa debe reflejar el costo de oportunidad de capital que expresa la garantía del rendimiento mínimo. En otras palabras una tasa similar a la que se obtendrían con cualquier otra alternativa de inversión. Para el cálculo de esta tasa generalmente se utiliza la tasa de interés existente sobre préstamos a largo plazo en el mercado de capitales en la fábrica Cmdte. Ernesto Che Guevara la tasa de interés en de un 13%.

Se denomina valor actual neto, VAN a la diferencia entre las erogaciones de la inversión y la sumatoria de los valores actuales VA de los flujos que se obtendrían al cabo de n años con las tasas de interés k . Para el caso de que $k = \text{const.}$, se tiene:

$$VAN = -C_0 + C_1/(1+k)^1 + C_2/(1+k)^2 \dots C_n/(1+k)^n = \sum_{t=0}^n C_t/(1+k)^t \quad (4.8)$$

Donde: (C_0) es el saldo entre los ingresos y el gasto en los años

(k) es tasa de interés (para nuestro trabajo es de 13 %)

(n) : 1, 2,3 cada año del proyecto que se genera en ingresos en efectivo

A los efectos de selección del proyecto el criterio será siempre mayor o igual a cero para que el proyecto sea rentable y este lo es.

Sustituyendo en la ecuación (4.8)

$$VAN = \$680,04$$

Este cálculo fue hecho para 10 años de vida útil de los filtros instalados según [\[29\]](#).

La tasa interna de retorno (TIR) es aquella que el valor anual neto de un proyecto es cero, es decir que el valor actual neto del flujo de ingresos es igual al valor neto del flujo de egresos.

La TIR se calcula en esencia igual que el VAN, la única diferencia es que se estiman tasas de actualización a que el VAN es igual a cero en un proceso de actualizaciones sucesivas.

Para el cálculo se utiliza la misma fórmula que para los intereses, pero en lugar del valor del capital se coloca la TIR que en este caso es la incógnita. Es decir:

$$VAN = -C_0 + C_1 / (1 + TIR)^1 + C_2 / (1 + TIR)^2 \dots C_n / (1 + TIR)^n = \sum_{t=0}^n C_t / (1 + TIR)^n \quad (4.9)$$

Haciendo uso del software Excel por lo engorroso que resulta este cálculo nos da el valor de:

$$TIR = 19,69\%$$



4.4 Conclusiones parciales del capítulo

[\(Volver\)](#)

En este capítulo se llegó a las siguientes conclusiones:

- Los indicadores económicos principales TIR y el VAN para nuestro caso de estudio se cumplen según las normas establecidas para instalaciones electro energéticas. T_{RI} igual a 3 años y 33 días; y el VAN positivo de **\$ 680,04** y el TIR de **19,69%**
- El ahorro de energía por concepto de pérdidas dejadas de consumir por la influencia de los armónicos está en el orden de los **\$ 6040,84** CUC anuales.



Conclusiones generales

[\(Volver\)](#)

- Las mediciones realizadas en los circuitos de entrada de los variadores de velocidad de los accionamientos de bombas centrifugas en la Planta de Lixiviación, corroboran la presencia de componentes de armónicos de la corriente del **5^{to} y 7^{mo}** orden.
- Las pérdidas de energía de los accionamientos debido a la presencia de armónicos con la utilización de variadores de velocidad están en el orden de un **5,14 %**, lo cual disminuye su eficiencia.
- La potencia reactiva fue compensada usando filtros pasivos y garantizan un THD menor a un 5% para la corriente.
- El efecto económico que se alcanzaría por concepto de energía dejadas de consumir en forma de pérdidas por la presencia de los armónicos está en el orden de los \$ **6040,84** CUC anuales.



Recomendaciones

[\(Volver\)](#)

- Continuar el presente estudio sobre la base del diseño de un esquema de control automático del circuito de compensación de reactivos utilizando la información de este trabajo.
- Extender este estudio hacia otras plantas de la empresa, para la generalización de esta metodología.



Bibliografía

[\(Volver\)](#)

0. ABB, “Guía de los armónicos con accionamientos de corriente alterna”. Guía técnica número 6,1992.
1. Brood and D. W. Novotny, “Current control of VSI-PWM inverters,” IEEE Trans. Ind. Applicat., vol. IA-21, pp. 562–570, Mayo/Junio 1985.
2. Ivanov- Smolenski, A.V. “Máquinas Eléctricas”.
3. Boglietti A, Ferraris P., Lazzari M. and Pastorelli M. “Influence of the inverter characteristics on the iron losses in PWM inverter-fed induction motors”. IEEE Trans. On Industry Applications. Vol 26 No.5, 1990.
4. Chaparro Néstor y Villamizar Rodolfo “Sistemas de Distribución bajo Cargas No Lineales: Minimización de Pérdidas Mediante Filtros”
5. Costa Montiel A., Galán N., Ciumbulea G., López X. M. “Cálculo de los parámetros del motor de inducción a partir de datos de catálogo”. Edición 2005
6. Costa, Ángel: “Principios Fundamentales de Accionamiento Eléctrico”. Editorial Pueblo y Educación, 1989.
7. De la Barrera P, y otros. “Evaluación y modelado de las pérdidas en el hierro de motores de inducción”, XI Reunión de Trabajo en Procesamiento de la Información y Control RPIC-2005. Septiembre del 2005. Argentina. pp. 500-5005.
8. Fang Zheng Peng “Harmonic Sources and Filtering Approaches”, IEEE Industry Applications Magazine, July/August 2001, pp 18-25.
9. Famouri P, Cathey J. J., “Loss Minimization Control Induction Motor Drive,” IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 27, No. 1, January/February 1991.
10. Fitzgerald A., Kingsley Ch., Umans S., “Electric Machinery”. Editorial McGraw Hill. New York. 2000
11. GE. Multilink. Power Application Guide / General Electric, 22p



12. Garcia G., Santiesteban A., Brignone D., "Iron losses influence on a field-oriented controller". 20th International Conference on Industrial Electronics, Control and Instrumentation, IECON-94, Bologna, Italy. pp. 633-638.
13. González Quintero. José Ángel "Compensación de potencia Reactiva en Sistemas Contaminados con Armónicos", Tesis en opción al título de Master en Ingeniería Eléctrica. Universidad Central de las Villas. Santa Clara. 1998.
14. H. Akagi, Y. Kanazawa, and A. Nabae, "Instantaneous reactive power compensators comprising switching devices without energy storage components," IEEE Trans. Ind. Applicant., vol. IA-20, pp. 625-630, May/Jun. 1984.
15. Hava, R. J. Kerkman, and T. A. Lipo, "A high performance generalized discontinuous PWM algorithm," IEEE Trans. Ind. Appl., vol. 34, pp. 1059-1071, Sep./Oct. 1998.
16. Kioskeridis, I.; Margaris, N. "Loss Minimization in Induction Motor Adjustable Speed Drives". Transacciones del IEEE sobre la Electrónica de Potencia, Febrero del 1996, 43(1).
17. Kostenko M., Piotrovski L., "Máquinas Eléctricas". Tomo II. Editorial Mir. Moscú 1976.
18. L. Malesani and P. Tomasin, "PWM current control techniques of voltage source converters - A survey," in Proc. IEEE Ind. Electron. Conf. (IECON'92), vol. 2, 1992, pp. 670-675.
19. Muhammad H. Rashid, "Electrónica de Potencia: Circuitos, Dispositivos y Aplicaciones". Tomo II pp. 547-555.
20. Mc Pherson, G.; Laramore, R.D. "An Introduction to Electrical Machines and Transformers". 2 ed. La Habana, 1988.
21. Mohan, Undeland, M. Madrigal, "Análisis Armónico en Sistemas Eléctricos", ITM-DIEEE-PGIIIE, Julio 1998. Robbins, "Power Electronics": Converters, Applications, Design". John Wiley and Sons.
22. Noriega S. Ernesto "Generalidades sobre los armónicos y su influencia en los sistemas de distribución de energía".



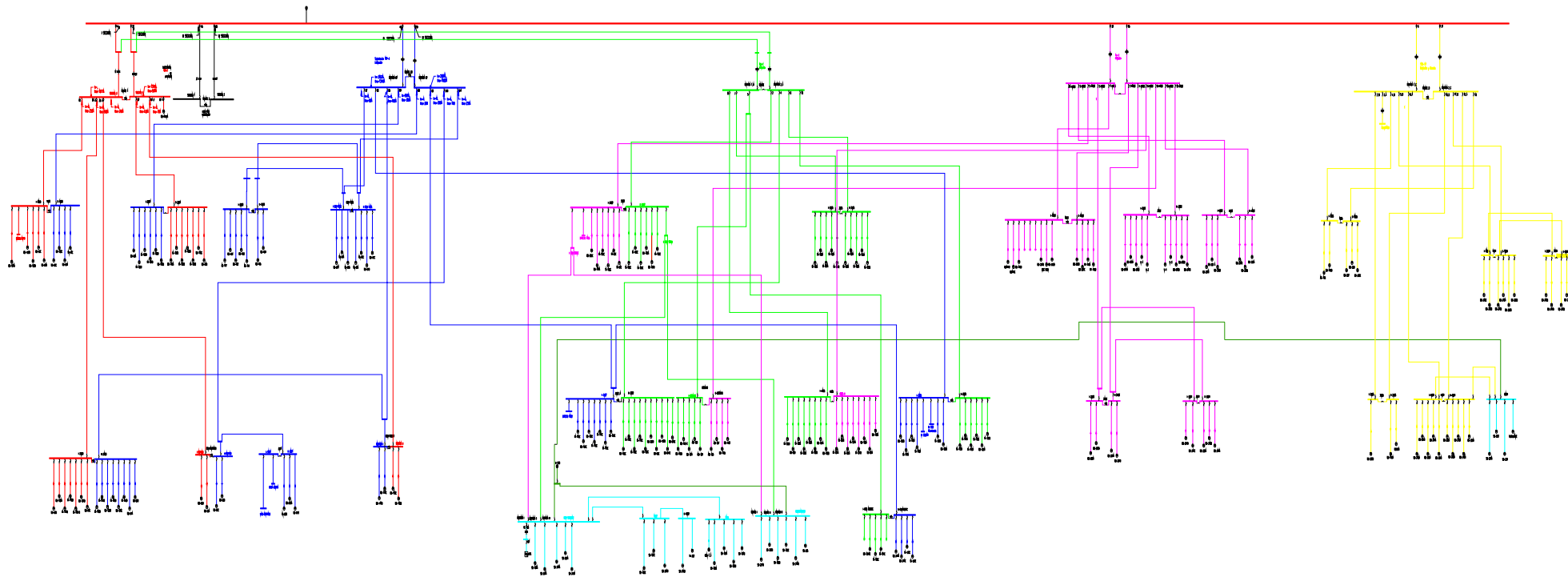
23. Olivares M. Katiel, "Evaluación del comportamiento de cargas no lineales y calidad de la energía en los SEI", 2004.
24. Parodi.Gretel. "Reducción de armónicos mediante filtrado activo en la Empresa Mecánica del Níquel", 2004.
25. Ramírez J. "Control óptimo U/f para motores de inducción. Revista Energía y Computación". Vol. IX. No. 2. Octubre 2000. pp 20 – 25.
26. Robicon. "Harmonic Control in Electric Power Systems", (IEEE Std. 519 1992), Technical Document.
27. Rojas Purón, L D; Guzmán del Río, D.; Morera, M. "Mejoramiento de eficiencia en accionamiento de bomba centrífuga por control de pérdidas usando lógica difusa". XI Reunión de Trabajo en Procesamiento de la Información y Control, septiembre del 2005.
28. Rojas Purón, L D. "Accionamiento eléctrico asincrónico para transporte eficiente de pulpa laterítica". Tesis doctoral. ISPJAE, 2006.
29. Rojas Purón, Luís Delfín. Dr.C "Accionamiento eléctrico asincrónico para transporte eficiente de pulpa lateritita", Moa, 2005.
30. Guzmán del Río D. Modelación, simulación y control del tanque de contacto y los enfriadores de licor en el proceso de lixiviación carbonato amoniacal. Tesis Doctoral. Diciembre del 2000. pp 133. 2000.
31. www.monografias.com/trabajos21/armonicos/armonicos.zip (En línea Diciembre, 2009)
32. www.geeectrical.com (En línea Diciembre, 2009)
33. <http://www.abb.com/es> "Normas para los límites de armónicos". Guía Técnica Numero 6 (En línea Diciembre, 2009)

Anexos

[\(Volver\)](#)

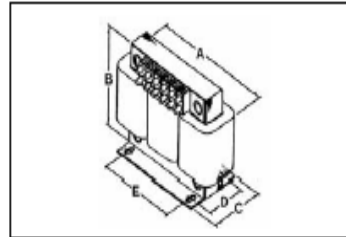
Anexo I

Esquema monolineal completo de la Planta de Lixiviación y Lavado actualizado.



Line/Load Reactors

3-Phase Reactors: Line/Load Specifications Table



600 Volts, 50/60 Hz (Open Type)

Open Type Product Number	List Price, Open Type GO-52	Fundamental Amps	Max. Amps	Inductance	Watts Loss	A mm/in.	B mm/in.	C mm/in.	D mm/in.	E mm/in.	Open Type Wgt. Kg/Lbs.	NEMA 1 Enclosure Style	List Price, NEMA GO-52
37G00201	\$188.00	2	3	12.0mh	7.5	112/4.4	102/4.0	74/2.8	50/2.0	36/1.44	1.8/4	CAB-8	\$308.00
37G00202	\$198.00	2	3	20.0mh	11.3	112/4.4	102/4.0	74/2.9	50/2.0	36/1.44	1.8/4	CAB-8	\$318.00
37G00203	\$226.00	2	3	32.0mh	16	112/4.4	102/4.0	74/2.9	50/2.0	36/1.44	1.8/4	CAB-8	\$346.00
37G00204	\$164.00	2	3	6.0mh	10.7	112/4.4	102/4.0	69/2.7	44/1.73	36/1.44	1.4/3	CAB-8	\$294.00
37G00401	\$190.00	4	6	3.0mh	14.5	112/4.4	102/4.0	74/2.9	50/2.0	36/1.44	1.8/4	CAB-8	\$310.00
37G00402	\$196.00	4	6	6.5mh	20	112/4.4	102/4.0	74/2.9	50/2.0	36/1.44	2.3/4	CAB-8	\$316.00
37G00403	\$204.00	4	6	9.0mh	20	112/4.4	102/4.0	79/3.1	54/2.1	36/1.44	1.8/5	CAB-8	\$324.00
37G00404	\$234.00	4	6	12.0mh	21	112/4.4	102/4.0	91/3.6	66/2.6	36/1.44	2.7/6	CAB-8	\$354.00
37G00801	\$200.00	8	12	1.5mh	19.5	152/6.0	122/4.8	79/3.1	54/2.1	50/2.0	3.1/7	CAB-8	\$320.00
37G00802	\$224.00	8	12	3.0mh	29	152/6.0	122/4.8	79/3.1	54/2.1	50/2.0	3.2/8	CAB-8	\$344.00
37G00803	\$306.00	8	12	5.0mh	25.3	152/6.0	122/4.8	86/3.4	63/2.5	50/2.0	5.0/11	CAB-8	\$426.00
37G00804	\$314.00	8	12	7.5mh	28	152/6.0	122/4.8	86/3.4	63/2.5	50/2.0	5.9/13	CAB-8	\$434.00
37G01201	\$236.00	12	18	1.25mh	26	152/6.0	122/4.8	79/3.1	54/2.1	50/2.0	4.0/9	CAB-8	\$356.00
37G01202	\$250.00	12	18	2.5mh	31	152/6.0	122/4.8	79/3.1	54/2.1	50/2.0	4.5/10	CAB-8	\$370.00
37G01203	\$360.00	12	18	4.2mh	41	152/6.0	122/4.8	94/3.7	70/2.75	50/2.0	8.1/18	CAB-8	\$480.00
37G01801	\$308.00	18	27	0.8mh	36	152/6.0	122/4.8	79/3.1	54/2.1	50/2.0	4.0/9	CAB-8	\$428.00
37G01802	\$316.00	18	27	1.5mh	43	152/6.0	122/4.8	86/3.4	53/2.5	50/2.0	5.4/12	CAB-8	\$436.00
37G01803	\$418.00	18	27	2.5mh	43	183/7.2	145/5.7	97/3.8	66/2.6	76/3.0	7.3/16	CAB-13	\$614.00
37G02501	\$322.00	25	37.5	0.5mh	48	183/7.2	142/5.6	86/3.4	60/2.3	76/3.0	5.0/11	CAB-13	\$518.00
37G02502	\$364.00	25	37.5	1.2mh	52	183/7.2	142/5.6	86/3.4	60/2.3	76/3.0	6.3/14	CAB-13	\$560.00
37G02503	\$430.00	25	37.5	0.8mh	61	183/7.2	145/5.7	97/3.8	66/2.6	76/3.0	8.1/18	CAB-13	\$626.00
37G03501	\$364.00	35	52.5	0.4mh	49	183/7.2	142/5.6	97/3.8	66/2.6	76/3.0	6.3/14	CAB-13	\$560.00
37G03502	\$382.00	35	52.5	0.8mh	54	183/7.2	145/5.7	97/3.8	66/2.6	76/3.0	7.3/16	CAB-13	\$578.00
37G03503	\$570.00	35	52.5	1.2mh	54	229/9.0	178/7.0	122/4.8	80/3.2	76/3.0	14/30	CAB-13	\$766.00
37G04501	\$480.00	45	67.5	0.3mh	54	229/9.0	178/7.0	122/4.8	80/3.2	76/3.0	10/23	CAB-13	\$676.00
37G04502	\$504.00	45	67.5	0.7mh	62	229/9.0	178/7.0	122/4.8	80/3.2	76/3.0	13/28	CAB-13	\$700.00
37G04503	\$668.00	45	67.5	1.2mh	65	229/9.0	178/7.0	136/5.3	93/3.6	76/3.0	18/39	CAB-13	\$864.00
37G05501	\$508.00	55	82.5	0.26mh	64	229/9.0	178/7.0	122/4.8	80/3.2	76/3.0	11/24	CAB-13	\$704.00
37G05502	\$532.00	55	82.5	0.50mh	67	229/9.0	178/7.0	122/4.8	80/3.2	76/3.0	12/27	CAB-13	\$728.00
37G05503	\$676.00	55	82.5	0.85mh	71	229/9.0	178/7.0	142/5.6	99/3.9	76/3.0	18/41	CAB-13	\$872.00
37G08001	\$590.00	80	120	0.20mh	82	274/10.8	208/8.2	142/5.6	88/3.5	92/3.6	19/43	CAB-13	\$786.00
37G08002	\$624.00	80	120	0.40mh	86	274/10.8	211/8.3	142/5.6	88/3.5	92/3.6	23/51	CAB-13	\$820.00
37G08003	\$932.00	80	120	0.70mh	96	274/10.8	213/8.4	160/6.3	117/4.6	82/3.6	25/55	CAB-13	\$1128.00

*To order a reactor mounted in NEMA 1 enclosure simply change the second to last digit of the product number from "0" to "1".

Fixed Low Voltage Power Factor Correction Capacitors

Enclosed Indoor Dustproof NEMA 12

and Outdoor Weatherproof NEMA 3

Single Phase or 3 - Phase

1.0-500 kVAR, 60 Hertz

240, 480, 600 Volts

1.0-100 kVAR, 480 Volts

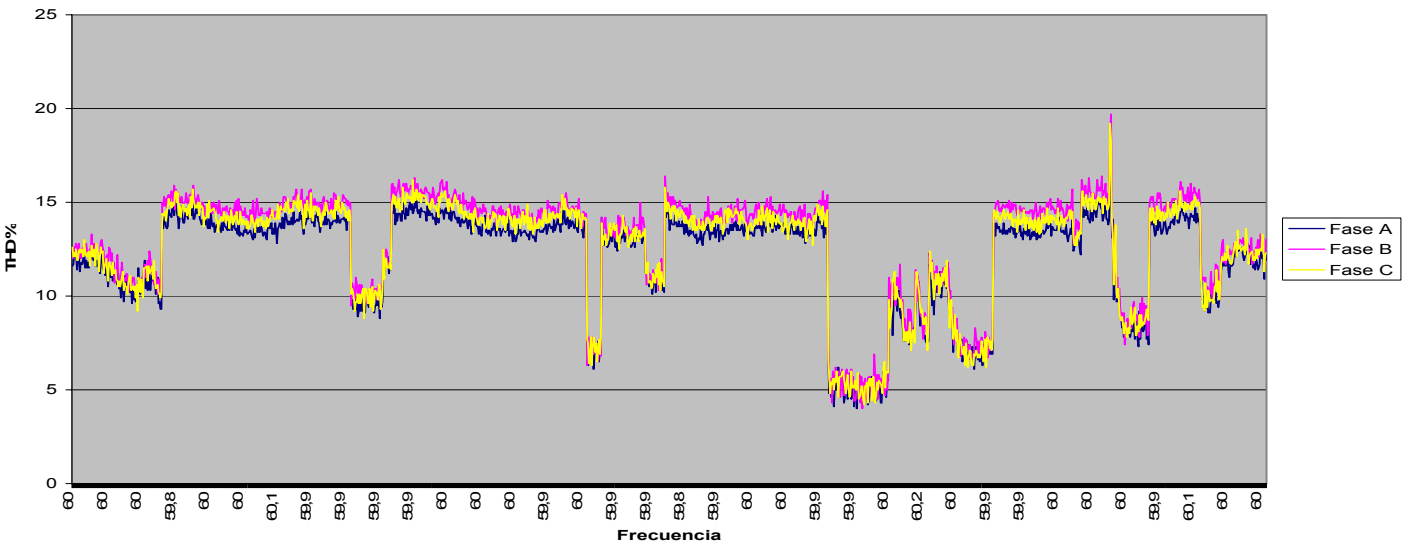
GO-410

kVAR	Basic Product No.	Suffix	480 Volt, 3-phase Delta						480 Volt, 1-phase						Fig No. (See pg. 19-23)	Approx. Weight	
			No Fuses [†]		3 Fuses [†]		3 Fuses, 3 Lights [†]		No Fuses		Fuses		Fuses & Lights			Lbs	Kg
			List Price	Suffix	List Price	Suffix	List Price	Suffix	List Price	Suffix	List Price	Suffix	List Price	Suffix			
1.0	65L800	TA1	\$161.00	TC1	\$181.00	TE1	\$211.00	TR1	\$161.00	TS1	\$181.00	TT1	\$211.00	1	9	4.1	
1.5	65L801	TA1	\$161.00	TC1	\$181.00	TE1	\$211.00	TR1	\$161.00	TS1	\$181.00	TT1	\$211.00	1	9	4.1	
2.0	65L802	TA1	\$161.00	TC1	\$181.00	TE1	\$211.00	TR1	\$161.00	TS1	\$181.00	TT1	\$211.00	1	9	4.1	
2.5	65L803	TA1	\$161.00	TC1	\$181.00	TE1	\$211.00	TR1	\$161.00	TS1	\$181.00	TT1	\$211.00	1	9	4.1	
3.0	65L804	TA1	\$161.00	TC1	\$181.00	TE1	\$211.00	TR1	\$161.00	TS1	\$181.00	TT1	\$211.00	1	9	4.1	
4.0	65L805	TA1	\$161.00	TC1	\$181.00	TE1	\$211.00	TR1	\$161.00	TS1	\$181.00	TT1	\$211.00	1	9	4.1	
5.0	65L806	TA1	\$161.00	TC1	\$181.00	TE1	\$211.00	TR1	\$161.00	TS1	\$181.00	TT1	\$211.00	1	9	4.1	
6.0	65L807	TA1	\$161.00	TC1	\$181.00	TE1	\$211.00	TR1	\$161.00	TS1	\$181.00	TT1	\$211.00	1	9	4.1	
7.5	65L808	TA1	\$174.00	TC1	\$194.00	TE1	\$224.00	TR1	\$174.00	TS1	\$194.00	TT1	\$224.00	1	10	4.5	
10.0	65L809	TA1	\$181.00	TC1	\$201.00	TE1	\$231.00	TR1	\$181.00	TS1	\$201.00	TT1	\$231.00	1	10	4.5	
12.5	65L810	TA1	\$218.00	TC1	\$238.00	TE1	\$268.00	TR1	\$218.00	TS1	\$238.00	TT1	\$268.00	1	10	4.5	
15.0	65L811	TA1	\$247.00	TC1	\$291.00	TE1	\$321.00	TR1	\$247.00	TS1	\$267.00	TT1	\$287.00	1	13	5.9	
17.5	65L812	TA1	\$269.00	TC1	\$313.00	TE1	\$343.00	TR1	\$269.00	TS1	\$289.00	TT1	\$309.00	1	13	5.9	
20.0	65L813	TA1	\$287.00	TC1	\$331.00	TE1	\$361.00	TR1	\$287.00	TS1	\$307.00	TT1	\$327.00	1	13	5.9	
22.5	65L814	TA1	\$309.00	TC1	\$353.00	TE1	\$383.00	TR1	\$309.00	TS1	\$329.00	TT1	\$349.00	1	13	5.9	
25.0	65L815	TA1	\$320.00	TC1	\$364.00	TE1	\$394.00	TR1	\$320.00	TS1	\$340.00	TT1	\$360.00	1	13	5.9	
27.5	65L816	TA1	\$342.00	TC1	\$386.00	TE1	\$416.00	TR1	\$342.00	TS1	\$362.00	TT1	\$382.00	2	19	8.6	
30.0	65L817	TA1	\$357.00	TC1	\$401.00	TE1	\$431.00	TR1	\$357.00	TS1	\$377.00	TT1	\$397.00	2	19	8.6	
32.5	65L818	TA1	\$379.00	TC1	\$423.00	TE1	\$453.00	TR1	\$379.00	TS1	\$399.00	TT1	\$419.00	2	19	8.6	
35.0	65L819	TA1	\$397.00	TC1	\$441.00	TE1	\$471.00	TR1	\$397.00	TS1	\$417.00	TT1	\$437.00	2	19	8.6	
37.5	65L820	TA1	\$419.00	TC1	\$463.00	TE1	\$493.00	TR1	\$419.00	TS1	\$439.00	TT1	\$459.00	2	19	8.6	
40.0	65L821	TA1	\$441.00	TC1	\$485.00	TE1	\$515.00	TR1	\$441.00	TS1	\$461.00	TT1	\$481.00	2	22	10.0	
42.5	65L822	TA1	\$467.00	TC1	\$511.00	TE1	\$541.00	TR1	\$467.00	TS1	\$487.00	TT1	\$507.00	2	22	10.0	
45.0	65L823	TA1	\$489.00	TC1	\$533.00	TE1	\$563.00	TR1	\$489.00	TS1	\$509.00	TT1	\$529.00	2	22	10.0	
47.5	65L824	TA1	\$496.00	TC1	\$540.00	TE1	\$570.00	TR1	\$496.00	TS1	\$516.00	TT1	\$536.00	2	22	10.0	
50.0	65L825	TA1	\$503.00	TC1	\$547.00	TE1	\$577.00	TR1	\$503.00	TS1	\$523.00	TT1	\$543.00	2	22	10.0	
55.0	65L826	TA1	\$536.00	TC1	\$580.00	TE1	\$610.00	TR1	\$536.00	TS1	\$556.00	TT1	\$576.00	3	32	14.5	
60.0	65L827	TA1	\$565.00	TC1	\$609.00	TE1	\$639.00	TR1	\$565.00	TS1	\$585.00	TT1	\$605.00	3	32	14.5	
65.0	65L828	TA1	\$610.00	TC1	\$654.00	TE1	\$684.00	TR1	\$610.00	TS1	\$630.00	TT1	\$650.00	3	32	14.5	
70.0	65L829	TA1	\$657.00	TC1	\$701.00	TE1	\$731.00	TR1	\$657.00	TS1	\$677.00	TT1	\$697.00	3	33	15.0	
75.0	65L830	TA1	\$705.00	TC1	\$749.00	TE1	\$779.00	TR1	\$705.00	TS1	\$725.00	TT1	\$745.00	3	33	15.0	
80.0	65L831	TA1	\$752.00	TC1	\$796.00	TE1	\$826.00	TR1	\$752.00	TS1	\$772.00	TT1	\$792.00	3	38	17.2	
85.0	65L832	TA1	\$804.00	TC1	\$848.00	TE1	\$878.00	TR1	\$804.00	TS1	\$824.00	TT1	\$844.00	3	38	17.2	
90.0	65L833	TA1	\$840.00	TC1	\$884.00	TE1	\$914.00	TR1	\$840.00	TS1	\$860.00	TT1	\$880.00	3	38	17.2	
95.0	65L834	TA1	\$886.00	TC1	\$930.00	TE1	\$960.00	TR1	\$886.00	TS1	\$906.00	TT1	\$926.00	3	38	17.2	
100.0	65L835	TA1	\$932.00	TC1	\$976.00	TE1	\$1006.00	TR1	\$932.00	TS1	\$952.00	TT1	\$972.00	3	38	17.2	

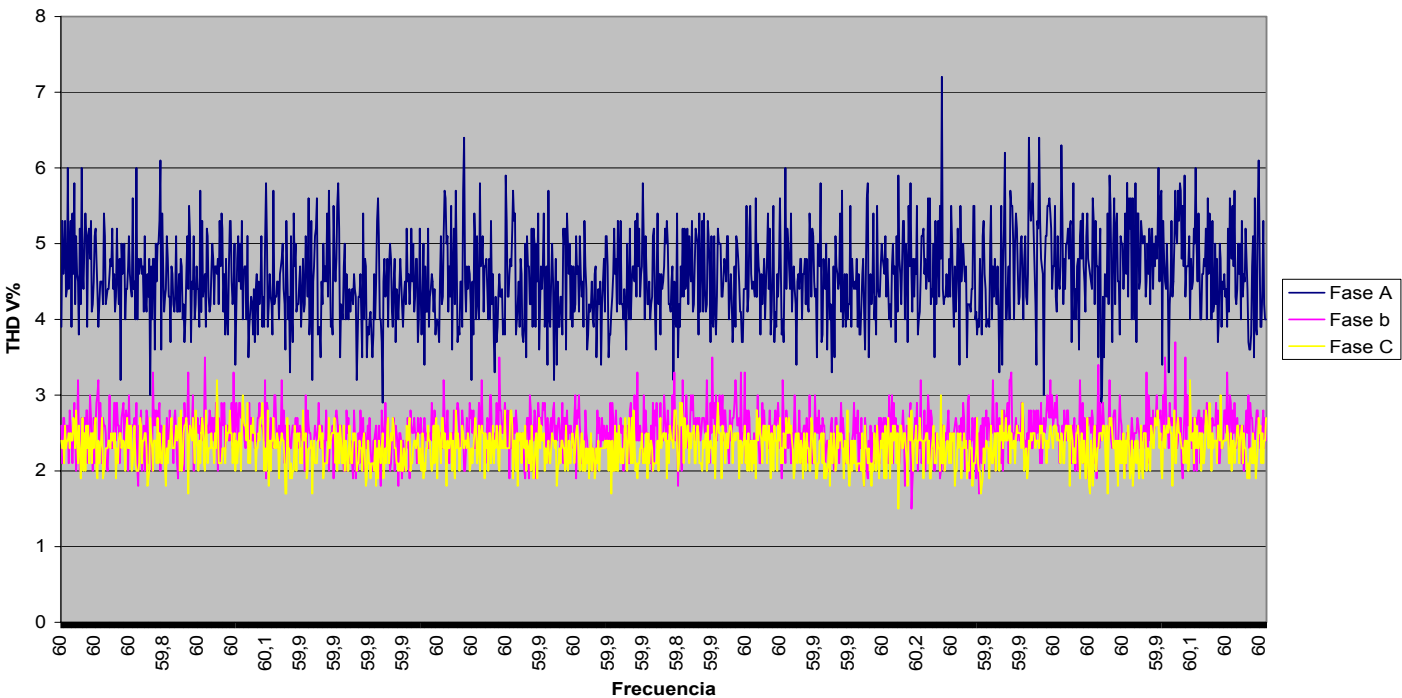
CAPACITORS, ARRESTERS
AND HARMONIC FILTERS

19

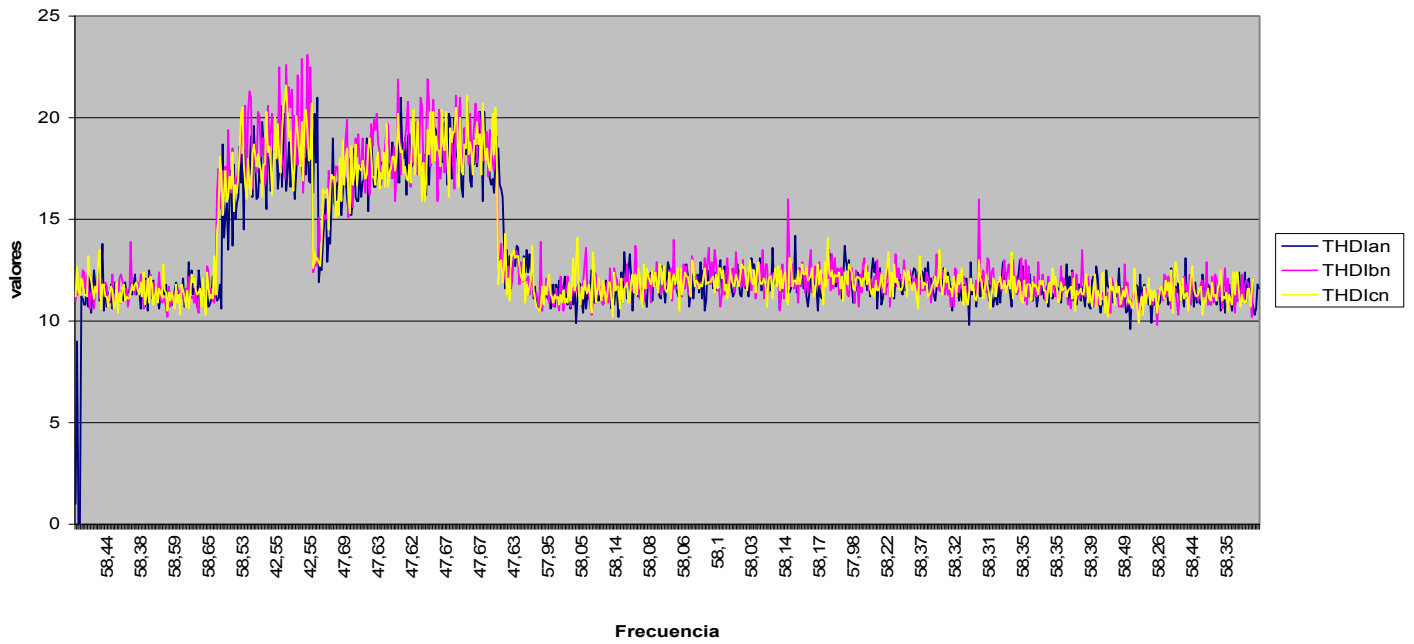
THD de corriente en la barra el día 20 de septiembre del 2009



THD de tensión en la barra el día 20 de septiembre del 2009



THDde corriente en el motor el día 10 de septiembre del 2009



THD de tensión en el motor el día 10 de septiembre del 2009.

