



ISMMM

INSTITUTO SUPERIOR MINERO
METALURGICO DE MOA
DR. ANTONIO NUÑEZ JIMENEZ

Ingeniería Eléctrica
Facultad: Metalurgia
Electromecánica

Trabajo de Diploma

En opción al Título de
Ingeniero Eléctrico

Eficiencia Energética en los accionamientos
de transporte laterítico de la Empresa
Comandante Pedro Sotto Alba.

Autor: Alexey Abad Batista.

Tutores: M. Sc. Gabriel Hernández Ramírez.

Ing. Geolvis Galano Urtate.

Moa, Holguín
Julio del 2013
“Año 55 de la Revolución”



Declaración de Autoría

Declaro ser el único autor del presente Trabajo de Diploma y reconozco al Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa “Dr. Antonio Núñez Jiménez” y al Departamento de Eléctrica como portadores de los derechos patrimoniales del mismo, con carácter exclusivo.

Para que así conste firmamos la presente a los ____ días del mes de _____ del 2013.

Alexey Abad Batista

Firma Autor

M. Sc. Gabriel Hernández Ramírez.

Firma Tutor

Ing. Geolvis Galano Urtate.

Firma Tutor



Pensamiento

... El futuro tiene muchos nombres.

Para los débiles es lo inalcanzable.

Para los temerosos lo desconocido.

Para los valientes es la oportunidad ...

Victor Hugo.



Dedicatoria

Dedico este trabajo a todos los miembros de mi familia en especial a mis padres Marbelis Batista y Alexis Abad.

Sus brazos siempre se abren cuando necesito un abrazo,

Sus corazones saben comprender cuándo necesito un amigo,

Sus ojos sensibles se endurecen cuando necesito una lección,

Su fuerza y amor me han dirigido y me han dado todo

lo que necesito para transitar por la vida de la forma

correcta.



Agradecimientos

Primero que todo a Dios por ser el perfecto creador, darme el aliento de vida y permitir que mi madre me diera a luz.

Quiero agradecer a mis padres por todo el apoyo que me han dado y por la forma en que me han guiado hacia la realización de mis sueños.

A mi hermana Giselle por ser ejemplo en todos los días de mi vida.

A mi novia Adry por estar a mi lado en las buenas y en las malas y tener siempre las palabras adecuadas para animarme cuando más lo necesito.

A mis amigos Alexander, Daniel, Raúl, Tito, Maikel y Yoa por aceptarme como soy y apoyarme incondicionalmente.

A mis compañeros de aula por haber compartido estos 5 años comportándose como hombres en especial a Gianni, Barbara, Javier, Escobar, Luchi, Yordi, Dennis, Carlos y Omar.

A mis tutores Gabriel Hernández y Geobis Galano por brindarme su amistad sin ellos no hubiese sido posible la realización de este trabajo.

A todos los profesores que de una forma u otra aportaron sus conocimientos para mi formación como profesional.

A todos los trabajadores del Laboratorio Eléctrico de la Empresa Pedro Soto Alla por la atención prestada.

A todos Gracias



Resumen

En este trabajo se presentan una serie de propuestas para mejorar la eficiencia en los accionamientos de la bomba de transporte laterítico cuando operan con cargas variables, debido a la existencia de limitaciones que no garantizan la total eficiencia. Para ello se realizó una búsqueda bibliográfica de los temas relacionados con la eficiencia energética en los motores de inducción, exponiéndose los fundamentos teóricos de las herramientas utilizadas en la investigación. Además se efectuaron un conjunto de mediciones en el motor de inducción de la bomba 135-PU-6B, de la Planta de Lixiviación ubicada en Empresa Pedro Sotto Alba, para determinar el estado actual de la eficiencia del mismo.

Se detectaron los motivos que afectaban la eficiencia en el proceso productivo y se proponen como medidas para minimizarlos: la utilización de un controlador difuso y la instalación de filtros de armónicos. El controlador difuso propuesto se diseñó a través de simulaciones en el software Simulink/MATLAB[®] 7.1. El resultado de la presente investigación contribuyó a elevar la eficiencia del accionamiento, repercutiendo en el ahorro de energía.



Abstract

The present investigation introduces a group of proposals to improve the efficiency in the lateritic delivery pump's drive when it operates with variables loads, due to the presence of some limitations that affects its efficiency. A bibliographical search of the topics related with the energy efficiency in the induction motors was carried out; the theoretical foundations of the tools used in the investigation were exposed as well. Furthermore a group of measurements were taken in the induction motor of the bomb 135-PU-6B, at the "Pedro Sotto Alba" Factory's Leaching Plant, in order to establish its current efficiency status.

The main reasons that affect efficiency in the productive process were detected, proposing as principal measures to reduce them: the use of a fuzzy controller and the installation of harmonic filters. The proposed fuzzy controller was designed through simulations in the software Simulink/MATLAB® 7.1. The present investigation's outcome contributes to raise the working energy efficiency, influencing the energy saving.



Índice de contenido

Declaración de Autoría.....	II
Pensamiento.....	V
Dedicatoria.....	VI
Introducción	1
Problema de la investigación	2
Objetivo general.....	3
Proponer mejoras de la eficiencia en los accionamientos de bombas Wirth.....	3
Objetivos específicos.....	3
Hipótesis	3
Capítulo I: Fundamentación Teórica.....	4
1.1 Introducción	4
1.2 Estado del arte	4
1.2.2 Optimización de eficiencias de los motores desde sus diseños	8
1.2.3 Mejoramiento de la eficiencia desde esquemas de control.....	9
1.3 Teoría general del funcionamiento de VFD para accionamientos eléctricos.	11
1.3.1 Principio de funcionamiento del motor de inducción de jaula de ardilla y de los VFD. 11	
1.3.2 Características Generales de los Variadores de Velocidad Industriales.	14
Principios Básicos.....	15
Principio de Funcionamiento.	15
1.3.3 Funcionamiento del motor asíncrono alimentado por convertidores de frecuencia. ...	16
Método de control Voltaje / frecuencia (V/f).	17
1.3.4 Principio de funcionamiento de bombas de desplazamiento positivo	18
Bombas Recíprocas.....	19
Descripción de la Bomba de Pistón.....	20
Descripción de la Bomba de Diafragma.....	20
1.4 Conclusiones del capítulo	21
Capítulo II: Sistemas de accionamientos eléctricos de transporte laterítico con VFD.....	22
2.1 Introducción	22
2.2 Descripción del Proceso Tecnológico y eléctrico de la Planta de Lixiviación.	22
2.2.1 Planta de Lixiviación.....	22



2.3	Caracterización y análisis del accionamiento eléctrico de la bomba.	24
2.3.1	Protección del motor mediante Multilin SR-469.	24
2.4	Características de los variadores de velocidad YASKAWA F7.	26
2.4.1	Ventajas del uso de variadores de velocidad en accionamientos con bombas Wirth.	29
2.5	Características del accionamiento.	30
2.6	Descripción del monitoreo a través de PQM portátil.	31
2.6.1	Ajuste de analizadores de redes PQM.	31
2.7	Resultados de las mediciones realizadas.	33
2.8	Conclusiones	39
Capítulo III: Eficiencia de accionamientos con controlador difuso.		40
3.1	Introducción.	40
3.2	Controladores difusos asistido por SIMULINK / MATLAB® 7.1.	40
3.3	Propuestas para para mejorar la eficiencia en el accionamiento de la bomba.	45
3.3.1	Propuesta de Filtro de armónico para la disminución de THD.	45
	Filtro Propuesto: Filtro amortiguador de armónicos.	47
3.3.2	Propuesta de la aplicación del controlador difuso.	48
3.4	Valoración económica del trabajo.	50
3.4.1	Cálculo del aporte económico.	50
3.4.2	Cálculo del tiempo de amortización de la inversión.	53
3.5	Conclusiones	53
Conclusiones Generales.		54
Recomendaciones.		55
Bibliografía		56
Anexos		61



Introducción

Desde que el motor eléctrico hizo su aparición en el ámbito de la industria, el empleo de estos en la mayoría de las máquinas de una instalación industrial, permitió mejorar el rendimiento energético de la misma, así como flexibilizar las diferentes operaciones involucradas en un proceso. A pesar de que la utilización de los motores simplificó el uso de la energía en el ámbito industrial surgió la necesidad de seleccionar el motor de acuerdo con los rasgos específicos de la carga y adaptar sus características a los requerimientos particulares de ella dando origen a la técnica de los accionamientos

Un accionamiento es un conjunto interactuante, constituido por una carga, un motor impulsor, elementos de acoplamiento y el equipo de control, todo inmerso dentro del ámbito general que el sistema de suministro de energía. Un accionamiento que cambia eléctricamente la entrada eléctrica a un motor se debería llamar accionamiento eléctrico o mejor dicho un accionamiento electrónico de corriente alterna (C.A), el uso de estos accionamientos se ha incrementado ya que ofrecen la posibilidad de tener mejores procesos de control, arranques más suaves y mejor protección, con esta proliferación se han alcanzado reducciones de costos en forma importante.

En la actualidad los motores eléctricos son los mayores consumidores de electricidad en la industria y en el comercio. Casi la mitad de la energía eléctrica usada y cerca de las dos terceras partes de la utilizada en la industria es consumida por motores eléctricos. Como la mayoría de los sistemas trabajan por debajo de su capacidad nominal durante la mayor parte del tiempo, se han desarrollado métodos para reducir la salida de los motores a un nivel que coincida con lo que se le demanda. Los reguladores de tiro, válvulas de estrangulación y sistemas de recirculación que se usan tradicionalmente para este fin son muy ineficientes desde el punto de vista energético. Reduciendo la velocidad de la carga, por ejemplo, de una bomba o un ventilador, se obtendría el mismo objetivo de una manera más adecuada.

La industria cubana del níquel involucrada en un constante ascenso en sus producciones, cada vez aumenta más su consumo de energía, cuyos portadores deciden la rentabilidad de sus Empresas, que están entre las once más grandes consumidoras de energía eléctrica del país.



Para cumplir estos portadores a mediano y largo plazo, se necesita que paralelamente con el constante crecimiento de sus producciones se perfeccionen los parámetros y regímenes de trabajo de las instalaciones tecnológicas para explotar de forma más racional y eficiente las grandes reservas de recursos minerales existentes en los yacimientos niquelíferos en el municipio, lo que garantizará la existencia de un proceso productivo continuo y con mayor eficiencia.

Los variadores de velocidad toman un papel protagónico en la eficiencia de los motores usados en las industrias ya que su función principal es ofrecer diferentes velocidades de trabajo, esto permite ahorros energéticos y, por tanto, ahorro en costo de las máquinas accionadas por motores eléctricos que no trabajan a plena carga la mayor parte del tiempo.

Situación Problemática

La bomba Wirth 135-PU-6B ubicada en la planta de lixiviación de la Empresa “Pedro Sotto Alba” tiene como función aumentar la presión de la pulpa a lixiviar de 60 lb/pulg² de presión hasta 650 lb/pulg² y garantizar un bombeo estable de dicha pulpa precalentada hacia el calentador de cada tren.

Actualmente el accionamiento eléctrico conectado a la bomba está presentando problemas en la alimentación que recibe a la entrada, provocando caídas de tensión en el mismo, el accionamiento eléctrico no adapta el consumo de tensión al flujo de mineral procesado, como solución a este problema se tomó anteriormente la medida de instalar un variador de velocidad que permitiría elevar la eficiencia energética, lo cual no se logró en su totalidad, lo que afectó el rendimiento de esta bomba cuando varía su carga, esto trae como consecuencia considerables pérdidas desde el punto de vista energético.

Por estas deficiencias surgió la necesidad de encontrar el modo de mejorar el rendimiento de esta bomba.

Problema de la investigación

Los accionamientos de la bomba de transporte laterítico, no garantizan total eficiencia cuando operan con cargas variables.



Campo de acción

Eficiencia energética en la bomba Wirth 135-PU-6B de la planta de Lixiviación de la Empresa “Pedro Sotto Alba”.

Objetivo general

Proponer mejoras de la eficiencia en los accionamientos de bombas Wirth.

Objetivos específicos

1. Presentar el estado del arte del sistema de Accionamientos de bombas de transporte laterítico.
2. Obtener las características de explotación de los accionamientos.
3. Realizar la simulación de los accionamientos eléctricos considerando las condiciones industriales de explotación.

Hipótesis

Si se logra mejorar la eficiencia en los accionamientos de la bomba de transporte laterítico cuando operan con cargas variables se obtendrán ahorros de energía eléctrica.



Capítulo I: Fundamentación Teórica



- Introducción.
- Estado del arte.
- Teoría general del funcionamiento de variadores de velocidad para accionamientos eléctricos.
- Principio de funcionamiento de los Variadores de Velocidad.
- Funcionamiento del motor asincrónico alimentado por convertidores de frecuencia.
- Principio de funcionamientos de bombas de desplazamiento positivo.
- Conclusiones.

1.1 Introducción

Actualmente el uso de la electrónica de potencia en accionamientos eléctricos es muy frecuente, esto se debe a los avances de la técnica y el gran desarrollo industrial. El desarrollo de la electrónica de potencia nos ha permitido lograr tener un mejor control sobre los accionamientos eléctricos.

En este capítulo haremos referencia de forma breve a los accionamientos eléctricos con uso de variadores de velocidad. Como introducción daremos una teoría general del funcionamiento de los variadores de velocidad para los accionamientos eléctricos, así como su principio de funcionamiento, estructura general, las tareas que realizan por etapas y las principales características del motor de inducción.

También haremos referencia del funcionamiento de un motor asincrónico alimentado con variador de velocidad, el cual es el método de accionamiento eléctrico empleado en nuestro tema de estudio.

1.2 Estado del arte.

El sistema de accionamiento eléctrico puede ser estudiado en busca del mejor uso de la energía transferida desde la red de potencia trifásica en sus cuatro principales componentes:

Fuente de suministro de potencia trifásica: usualmente los análisis parten de un sistema trifásico estable simétrico, con tensiones y corrientes sinusoidales con determinado contenido de armónicos de hasta de un quinto orden. [Abrahamsen, 2000].



Subsistema: Controlador + Convertidor + Motor Eléctrico, cuyos estudios basan sus resultados en la simulación de modelos matemáticos linealizados, pero que en ocasiones presentan serias restricciones en el objeto del convertidor, funcionan bajo condiciones iniciales de trabajo limitadas en el objeto Motor, es por esto que el empleo de técnicas difusas facilitan el estudio con potencialidades de observar el comportamiento del sistema en base a la adecuada identificación del proceso.

Subsistema Mecánico: constituye la carga mecánica rotacional del accionamiento y está determinado por el enlace del árbol del motor con el mecanismo, que en este caso es la bomba desplazamiento positivo. En él existen posibilidades reales de estudio accediendo a las relaciones mecánicas del subsistema y su concatenación con la máquina eléctrica.

Subsistema Proceso: es en nuestro caso la instalación hidráulica de transporte de pulpa sin incluir la bomba de desplazamiento positivo que constituye la carga mecánica rotacional; y este subsistema proceso (tuberías, codos, accesorios, recipientes, hidromezclas, etc.) tiene una de las mayores reservas de oportunidades para obtener elevados rendimientos.

Una idea integral con la apreciación que se tiene en términos de rendimiento de un accionamiento de bombas desplazamiento positivos, se muestra en la figura 1.1, siendo este muy típico en cualquier instalación industrial.

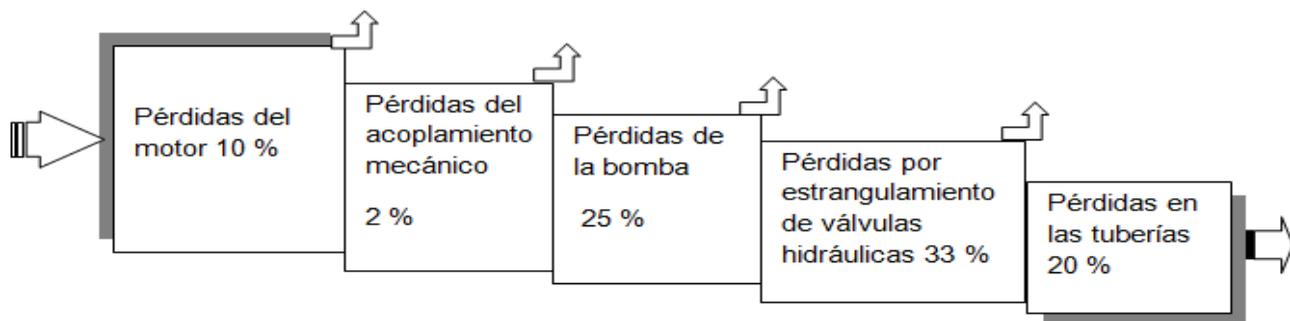


Figura 1.1 Diagrama de pérdidas en un sistema de accionamiento eléctrico de bombas desplazamiento positivo.

Como se conoce; los motores de inducción tienen una elevada eficiencia cuando operan con sus cargas y torques nominales [6]. Asimismo operando con cargas ligeras, las pérdidas del hierro se incrementan dramáticamente, reduciendo considerablemente la eficiencia [28]. Este hecho lo



explicamos más adelante, y nos parece bueno utilizarlo en nuestro estudio porque es una forma evidente de disminuir las pérdidas en el motor de inducción mediante el control del flujo magnético de acuerdo con la demanda de la carga mecánica en el árbol del motor.

Por otra parte, muchas de las aplicaciones de los motores de inducción corresponden a bombas, ventiladores y compresores; y en la mayoría de las cuales, los motores operan significativamente por debajo de sus valores nominales de carga; el voltaje aplicado al estator, crea un campo magnético rotatorio que induce corrientes en el rotor, generándose par en el eje; si no se requiere el par nominal, el máximo campo magnético tampoco se requerirá; la corriente que produce, el campo magnético adicional aumenta las pérdidas del acero, disminuyendo el rendimiento del motor. Uno de los aportes desde el punto de vista práctico, alcanzado por los investigadores anteriores, es la obtención experimental en los motores de inducción de la curva tensión/frecuencia (V/f) que permite aproximarse a los estados de carga del accionamiento.

Esta parte de la idea de que en muchos complejos industriales, los motores de inducción son controlados mediante convertidores de frecuencia con la técnica de control V/f , la cual se basa en el mantenimiento de una relación Volts-Hertz (V/f) apropiada para la demanda de par exigido por la carga; estos accionamientos tienen flexibilidad de configuración para adaptarse a las necesidades de la carga pudiendo el usuario especificar la curva V/f deseada. Sin embargo, la mayoría de las veces no se conocen los criterios prácticos de ajuste de la curva V/f , lo que no permite explotar al máximo las posibilidades del accionamiento. La mejora del rendimiento de los accionamientos para bombas se ha tratado con el uso de un accionamiento a velocidad variable por control del caudal de la bomba de desplazamiento positivo, a cambio de velocidad constante y válvula de estrangulación, lo cual muestra mejoras en el consumo de energía; la mejora se obtiene en el aumento del rendimiento de la bomba; para la mejora del rendimiento del motor en régimen estacionario varios autores han buscado los puntos de operación óptimos por diferentes técnicas; [D.S. Kirschen y otros, 1984] propusieron un método heurístico para variar el flujo en línea, buscando disminuir la potencia total de entrada para controles de tipo vectorial; [P. Famouri y otros, 1991] utilizan las ideas de Kirschen para obtener el deslizamiento óptimo para un control V/f ; [M.H. Park y S.K. Sul, 1984] obtienen, experimentalmente, los deslizamientos óptimos para diferentes puntos de operación en controles V/f ; otros autores han atacado el problema de manera analítica; [28] calculan el deslizamiento óptimo que minimiza las pérdidas por efecto Joule de la



máquina; [S.I. Seleme Jr. y C. Canudas de Wit, 1992] consideran adicionalmente la energía magnética almacenada en las inductancias; [García y otros, 1992] estimando adicionalmente las pérdidas en el núcleo. La mayoría de los algoritmos heurísticos fueron validados en bancos de prueba de laboratorio; estos algoritmos resultan relativamente complejos para su aplicación en un accionamiento industrial comercial con control V/f. A pesar de presentarse un resultado que permite calcular una curva óptima V/f que mejora el rendimiento del motor cuando éste acciona bombas de desplazamiento positivos o ventiladores, donde el par varía con el cuadrado de la velocidad [Ramírez, 1998]; y además se aplica la condición de flujo óptimo obtenida por [S.I. Seleme Jr. y C. Canudas de Wit (1992)], adaptado a bombas y ventiladores con resultados experimentales realizados en el Laboratorio de Accionamientos Eléctricos de la Universidad del Valle; no se tienen en cuenta, las fluctuaciones de carga mecánica debido a posibles vibraciones provocadas por la cavitación en la bomba desplazamiento positivo.

La mayor parte de los trabajos en busca del mejoramiento de la eficiencia del motor de inducción basan sus razonamientos sobre el estudio de sus principales pérdidas, las cuales están usualmente comprendidas dentro de cinco componentes: las pérdidas del cobre del estator, las pérdidas del cobre del rotor, las pérdidas en el hierro, las pérdidas mecánicas y las pérdidas adicionales. El mejoramiento ha sido obtenido mediante el balance entre las pérdidas del cobre y el hierro de la máquina manteniendo constante el flujo. En esto se ha llegado a establecer una estrategia de control de pérdidas sobre la base de un analizador óptimo de energía que opera mediante el manejo escalar del accionamiento [Abrahamsen, 2000]. Parece más completo llevar a cabo este propósito con un enfoque vectorial del algoritmo, y que atienda de manera combinacional el modelo de pérdidas. Resultan meritorios los trabajos aportados por [56], en cuanto a detectar el grado de imprecisiones que contienen las diferentes normas (IEC, IEEE, NEMA, JEC) para establecer estándares de rendimientos. Ellos concluyen que para motores de una misma capacidad y tipo (ver la tabla 1.1), la diferencia puede llegar a ser de hasta de un 2 % de la potencia de entrada en la determinación de las pérdidas adicionales de la máquina, y el rendimiento con carga parcial es tan importante como a plena carga con respecto a la energía consumida.



Tabla 1.1 Rendimientos con carga nominal de cuatro motores del mismo diseño

Carga parcial	Motor A	Motor B	Motor C	Motor D	Promedio
(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)
50	91.95	92.07	91.75	91.77	91.88
75	92.98	92.86	92.53	93.00	92.84
100	93.75	93.39	93.11	93.84	93.53
125	93.88	93.22	93.19	93.62	93.48

En cuanto a los métodos y cálculo del rendimiento en los diferentes motores eléctricos [John S. Hsu y otros en 1998] ofrecen un detallado estudio en el que explican ocho formas diferentes de evaluar el rendimiento en estas máquinas, desde la inclusión de las pérdidas mediante el uso de un circuito equivalente, el método estadístico, el método de la medición de la corriente, del deslizamiento y hasta el método del torque en el entrehierro que permite conocer las asimetrías y contenidos de armónicos desde el sistema. Pero estos autores no tienen en cuenta las especificidades de carga del mecanismo industrial.

1.2.2 Optimización de eficiencias de los motores desde sus diseños.

Si observamos algunos estudios realizados en la eficiencia de los motores eléctricos atendiendo al costo desde su etapa de diseño y montaje, es significativo el hecho de que para entregar motores eléctricos preparados para operar con elevadas eficiencias, se necesita para incrementos desde un 92 % a un 95,5 % un costo productivo desde 1000 a 8000 USD, con gastos en inversiones de hasta 2,8 USD por cada kW [Appelbaum, Khan y Fuch, 1987], y entre más grandes son las máquinas mayor es su costo. Se establecen correlaciones en las que se incluyen $\eta_{max} = f(\text{costos (USD)})$, $\eta_{max} = f(\text{Cos } \varphi)$, $\eta_{max} = f(\Delta p)$, así como los efectos del cambio de voltaje en el rendimiento y el factor de potencia. Es decir, la mejor eficiencia puede venir desde la etapa de diseño, pero la máquina eléctrica una vez puesta en explotación va teniendo su propio



rendimiento determinado también por las condiciones operacionales asociadas al proceso productivo de las plantas.

1.2.3 Mejoramiento de la eficiencia desde esquemas de control.

El rendimiento de los accionamientos de motores eléctricos ha estado enmarcado en función del estudio de las pérdidas en relación con la potencia de entrada del sistema, la velocidad, el torque, el flujo en el entrehierro, la corriente del estator, el factor de potencia y el cálculo por diferentes métodos del rendimiento del motor, tal como lo reflejan las publicaciones de diferentes autores como. Hsu y otros, 1998] y [Slaets, Van Roy y Belmans, 2000].

Usualmente en los accionamientos eléctricos, los motores operan manteniendo el flujo en sus valores nominales o con radio de tensión / frecuencia (V/Hz) sostenidamente constante para las condiciones de cargas de diseño.

Ofreciendo un favorable trabajo con respuestas rápidas ante los transitorios del sistema. Pero cuando el accionamiento pasa a trabajar con cargas más bajas o ligeras, estas aproximaciones causan pérdidas en el núcleo o pérdidas en el hierro que pueden llegar a ser excesivas comparadas con las pérdidas en el cobre de la máquina, comportándose en condiciones de rendimientos mucho menores.

Varios esquemas de control de motores eléctricos a lazo abierto y cerrado son implementados basándose en:

- Control del deslizamiento del motor.
- Control de la tensión o corriente mediante una fuente inversora.
- Control combinado de tensión y frecuencia.
- Control vectorial.
- Control de la perturbación de la velocidad del rotor.

Por otra parte se ha avanzado en el estudio de la eficiencia de los accionamientos por la vía de efectuar la dirección del motor de inducción por variación del flujo magnético, en aras de un menor consumo de corriente del estator con poca distorsión, muy rápida respuesta del flujo y el torque a los cambios repentinos en los procesos transitorios. Este aspecto va ser utilizado en nuestro algoritmo de control, teniendo en cuenta las especificidades de cambios que ocasiona la carga



mecánica del proceso. Por otra parte, durante el trabajo de la máquina de inducción se aprecia como rasgo característico su comportamiento oscilatorio, aspecto motivado por las variaciones de voltajes desde la red, o por los efectos de la energía reactiva de intercambio entre el motor de inducción y la fuente o convertidor de frecuencia. Pero hasta la fecha no se reflejan en los modelos de pérdidas, las incidencias que ocasionan los cambios de magnitudes de los parámetros del mecanismo y que de forma casi cíclica exigen al motor, es decir, se separa o se excluye en los modelos la sección de carga mecánica rotacional del mecanismo de producción, que una vez puesto en marcha el accionamiento, es éste el que rige de forma permanente el comportamiento de todo el sistema. En tal sentido, los últimos estudios se han centrado en el grupo Convertidor – Motor de Inducción. [34], que aunque se han establecido límites en su manipulación, el problema de mantener elevados rendimientos en la transferencia de energía del accionamiento para diferentes niveles y regímenes todavía no está suficientemente resuelto como para estar satisfecho en bases a estos enfoques. Nuestro análisis sigue el comportamiento del accionamiento, a partir de la incidencia de las variables en la transferencia de potencia electromagnética en mecánica rotacional, observando los cambios u oscilaciones de la carga por causas de origen electromagnéticas y mecánicas.

El Motor de Inducción es capaz de reponerse a gran parte de estas oscilaciones, y si son de origen electromagnético y de aceptable intensidad casi siempre las absorbe y las comparte en pequeños transitorios con la red, y este aspecto está contemplado en la fase de diseño de la máquina; pero cuando éstas son más intensas y vienen desde el eje mecánico, por mucho estado inercial que tenga el sistema, al motor le resulta más difícil reponerse a los cambios, y es aquí donde aspiramos profundizar para ampliar la capacidad de respuesta del accionamiento en base a trabajar en zonas de mejores rendimientos.

Estos trabajos se enfocan a la determinación de las pérdidas en estado estático del motor de inducción, dentro de las cuales se sitúan restricciones. Todos ellos están enmarcados bajo las condiciones de una máquina de inducción ordinaria operando con frecuencias normalizadas (50 ó 60 Hz).

Las bombas trabajan con eficiencias más bajas que los motores de inducción, determinadas una parte por las limitaciones que le impone el diseñador y otra por las restricciones que le ofrece la



red hidráulica donde va a operar. Aunque de forma empírica se ponen coeficientes dentro de las expresiones analíticas que intervienen en el cálculo de las potencias y dimensiones de la bomba y sus instalaciones, todavía no es suficiente las especificidades que exigen los sistemas de transporte de hidromezclas, es por esto que adquiere importancia correlacionar todas aquellas variables que inciden de manera sensible en el comportamiento eficiente relacionado con la distribución de la energía que se transfiere desde el Motor hasta el mecanismo.

Todos estos estudios basan su análisis en minimizar las pérdidas de las máquinas de inducción para cargas de tipo ventilador, que con aproximación simulan las condiciones de explotación mecánicas, pero no alcanza tener en cuenta con exactitud los diferentes regímenes de trabajo que exigen los mecanismos de transporte.

1.3 Teoría general del funcionamiento de VFD para accionamientos eléctricos.

1.3.1 Principio de funcionamiento del motor de inducción de jaula de ardilla y de los VFD.

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

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

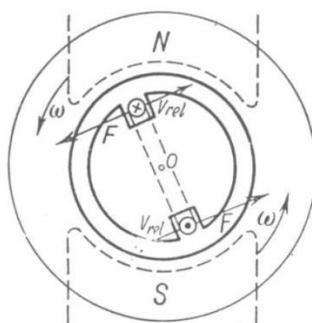


Fig. 1.2 Efecto de un campo giratorio sobre una espira en cortocircuito.

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

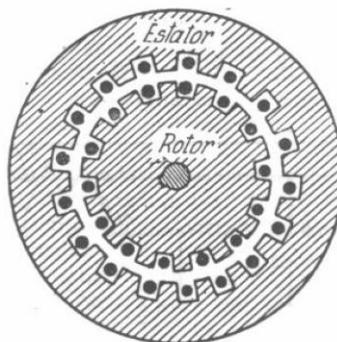


Fig 1.3 Sistema magnético de una máquina asíncrona.

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

Estator: En las ranuras ubicadas en el lado interior del estator se coloca un arrollamiento trifásico, constituido por 3 arrollamientos iguales (uno por cada fase) desplazado 120° entre sí (para un motor con un solo par de polos). Por lo visto en campos giratorios, los efectos simultáneos de las 3 corrientes de una red trifásica originan un campo constante que gira a velocidad síncrona (n_s).

Rotor: Si en el interior del estator colocamos una espira en cortocircuito (rotor) que pueda girar alrededor de un eje, se tiene que: al conectar el estator a la red se origina un campo giratorio que originará una FEM (Fuerza electro Motriz inducida, esta a su vez hace circular una corriente en la espira en cortocircuito (rotor), y por la acción del campo magnético creará cúpulas distribuidas a lo largo de la espira haciendo que ésta trate de seguir al campo giratorio.

Es obvio que la espira nunca podrá alcanzar al campo giratorio debido a la cupla resistente, que está compuesta en primer término por las pérdidas por rozamiento en los cojinetes, y en segundo término por la carga que mueve el eje del motor. Es decir, que siempre habrá una diferencia entre la velocidad " n_s " del campo giratorio y la del rotor " n " (o la del eje del motor).

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



$$N_{res} = n_s - n \quad (1.1)$$

Donde:

N_{res} : Velocidad relativa.

n : Velocidad del rotor.

n_s : Velocidad sincrónica.

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

$$S = \frac{n_s - n}{n_s} \quad (1.2)$$

Donde:

s : Deslizamiento

El deslizamiento es positivo cuando la máquina trabaja como motor y es negativo cuando esta máquina trabaja como generador.

Además:

$$n = n_s - n_s \times s \rightarrow n = n_s \times (1 - s) \quad (1.3)$$

Recordando que:

$$n_s = \frac{60 \times f}{p} \quad (1.4)$$

Donde:

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

p : es el número de pares de polos.



Luego, se tiene que:

$$n_s = \frac{60 \times f}{p} \times (1 - s) \tag{1.5}$$

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

Sobre ésta última, centraremos nuestra atención, ya que los variadores estáticos de frecuencia, tomando la tensión y la frecuencia de línea, varían su salida entre 0,01 Hz y 400 Hz o más dependiendo del uso y tipo de motor a emplear.

1.3.2 Características Generales de los Variadores de Velocidad Industriales.

Los variadores de velocidad permiten ajustar la potencia suministrada con la carga implicada en el proceso al variar velocidad, logrando optimizar el trabajo la mayor parte del tiempo. Los variadores de velocidad pueden convertirse en un instrumento de suma importancia a la hora de disminuir el consumo de energía. Estos dispositivos son recomendados específicamente para cargas variables, ya que permiten un mejor ajuste del motor y los subsistemas mecánicos.

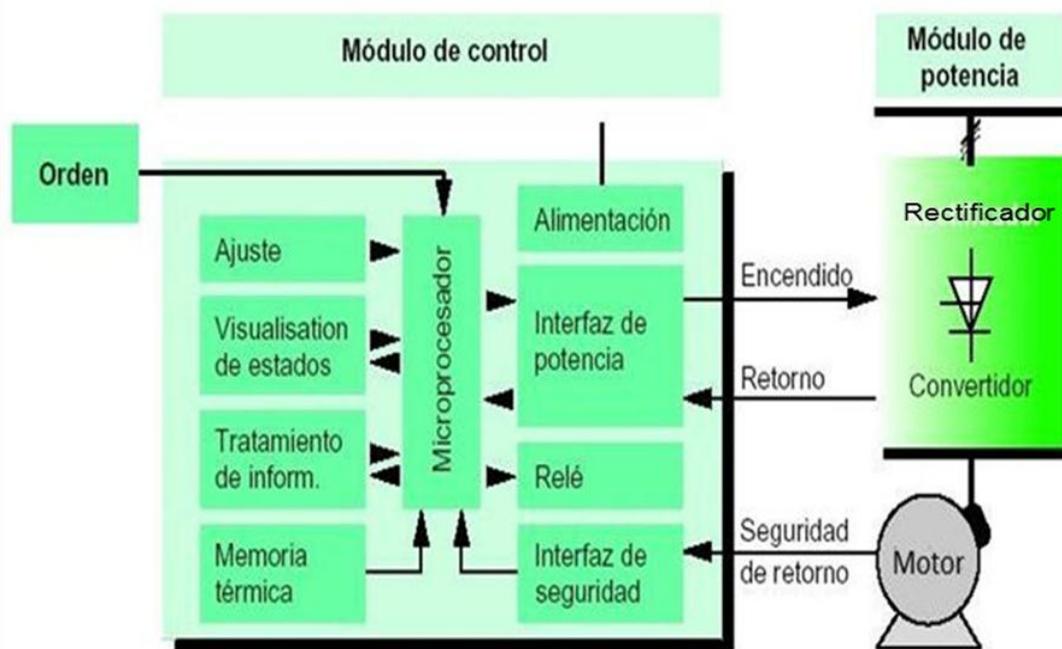


Fig. 1.4: Estructura General de un Variador de Velocidad.



Principios Básicos.

Un variador de frecuencia, VFD por sus siglas en inglés (Variable Frequency Drive), es un sistema para el control de la velocidad rotacional de un motor de corriente alterna, por medio del control de la frecuencia de alimentación suministrada al motor. Otra forma de cambiar la velocidad del motor sería cambiando el número de polos del motor, aunque esta técnica resulta ineficiente ya que habría que cambiar las características físicas del motor.

Principio de Funcionamiento.

En su concepto más básico, el variador de velocidad rectifica o transforma la corriente alterna (CA) de la alimentación en corriente directa (CD), para ello cuenta con un circuito de rectificadores trifásico formado por diodos, un contactor interno, unas resistencias y unos condensadores que permiten obtener una CD lo más plana posible (sin rizo). Posteriormente, la CD se transforma nuevamente en CA de la frecuencia deseada diferente o igual a los 60 ciclos por segundo estándar en la línea de alimentación; esta variación de la frecuencia es la que propiciará que el motor gire más rápido a más lento según se regule el control de velocidad.

Para lograr la conversión de CD (corriente Directa) a CA (Corriente Alterna), internamente en el inversor existen dos tarjetas electrónicas, una de control y otra de disparo o de potencia, que regulará la operación de un circuito de transistores de potencia IGBT por sus siglas en inglés (Insulated Gate Bipolar Transistor) quienes son los últimos encargados de formar la nueva corriente alterna de la salida hacia el motor mediante el sistema de Modulación por ancho de pulso PWM por sus siglas en inglés (Pulse Width Modulation).

El variador de velocidad, simultáneamente varía el voltaje de salida en función de la frecuencia de trabajo, manteniendo esta relación constante en todo su funcionamiento, por ejemplo, si se baja la frecuencia de salida también se baja el voltaje de salida y viceversa. Esto permite mantener la capacidad del torque o par del motor ya que la corriente permanecerá aproximadamente constante para una determinada carga mecánica. Todo lo anterior es hecho automáticamente en el interior del inversor de frecuencia sin intervención del operador.



1.3.3 Funcionamiento del motor asíncrono alimentado por convertidores de frecuencia.

Los inversores con circuito intermedio de tensión son los más usados en aplicaciones prácticas, siendo su campo predominante el de las pequeñas y medianas potencias. Un inversor se elige en función de parámetros tales como:

- Accionar a un solo motor o varios.
- Banda necesaria de regulación y su precisión.
- Consecuencias sobre la red eléctrica del convertidor adoptado.
- ¿Tiene sentido económico prever un retorno de energía? (Frenado regenerativo).
- Velocidad de respuesta para adaptarse a los cambios de consigna.

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

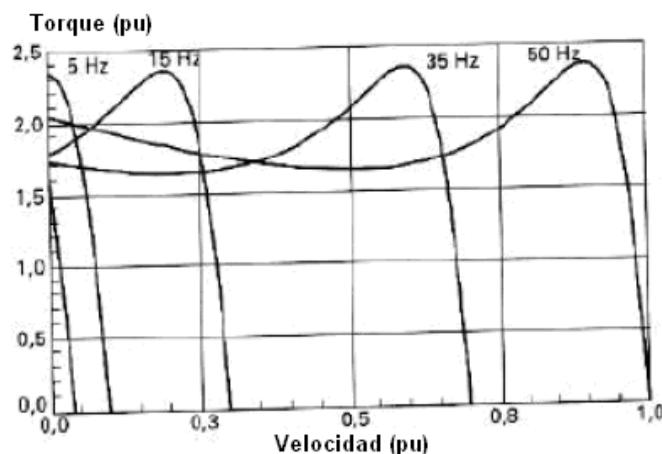


Fig. 1.5 Curvas de torque-velocidad de un motor asíncrono alimentado a flujo constante.

Una forma de lograr que el flujo sea constante de manera aproximada, es hacer que la tensión y la frecuencia varíen de forma proporcional. Sin embargo, esto es sólo aproximado, y a medida que las frecuencias van bajando los flujos disminuyen también, por lo que el torque para bajas frecuencias disminuye de forma importante.

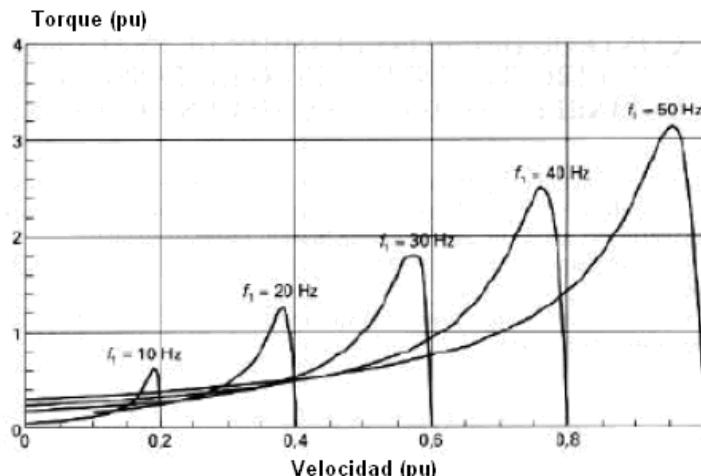


Fig. 1.6. Curvas de torque-velocidad en régimen permanente para un motor asíncrono alimentado con tensión y frecuencia variable.

Para lograr el funcionamiento con flujo constante es preciso que a bajas frecuencias la tensión sea más elevada que lo que dicta la ley sencilla de la proporcionalidad. Cuando la regulación necesaria para modificar la velocidad supera la frecuencia nominal (50 Hz), el flujo ha de disminuir, ya que la tensión no se eleva para no sobrepasar las posibilidades dieléctricas del bobinado del motor. En este caso las curvas de par para frecuencias elevadas decrecen, por lo que habrá que verificar que los menores pares disponibles cumplen los requisitos de la máquina accionada a alta velocidad.

En general en aquellos inversores con circuito intermedio de tensión, para el control del torque electromagnético del accionamiento se emplean los siguientes métodos:

1. Regular la tensión del estator en función de la frecuencia. (Control V/f).
2. Regulación mediante la descomposición vectorial de la intensidad del estator sobre unos ejes orientados con el flujo magnético. (Control vectorial).

Método de control Voltaje / frecuencia (V/f).

Con este método la tensión de alimentación evoluciona proporcionalmente a la frecuencia. Cuando V/f es constante el motor funciona de forma aproximada con flujo constante en los regímenes permanentes. Este tipo de control es más fácil de llevar a la práctica en un convertidor y se suele emplear cuando los requisitos de regulación son de baja velocidad.



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

En los convertidores con este tipo de control, una de las parametrizaciones más importantes es la selección o ajuste de la curva V/f . Algunos convertidores traen varias curvas ya ajustadas en su programación. Para seleccionar la curva adecuada se debe tener en cuenta las características de tensión y frecuencia del motor y la velocidad máxima a la que puede girar el rotor.

1.3.4 Principio de funcionamiento de bombas de desplazamiento positivo.

Estas bombas guían al fluido que se desplaza a lo largo de toda su trayectoria, el cual siempre está contenido entre el elemento impulsor, que puede ser un embolo, un diente de engranaje, un aspa, un tornillo, etc., y la carcasa o el cilindro. “El movimiento del desplazamiento positivo” consiste en el movimiento de un fluido causado por la disminución del volumen de una cámara. Por consiguiente, en una máquina de desplazamiento positivo, el elemento que origina el intercambio de energía no tiene necesariamente movimiento alternativo (émbolo), sino que puede tener movimiento rotatorio (rotor).

Sin embargo, en las máquinas de desplazamiento positivo, tanto recíprocas como rotatorias, siempre hay una cámara que aumenta de volumen (succión) y disminuye volumen (impulsión), por esto a estas máquinas también se les denomina Volumétricas. Las bombas de desplazamiento positivo tienen la ventaja de que para poder trabajar no necesitan “cebarse”, es decir, no es necesario llenar previamente el tubo de succión y el cuerpo de la bomba.

Las bombas de desplazamiento positivo se pueden clasificar como se expresa en el siguiente esquema, cabe destacar que nuestro estudio se relaciona directamente con la Bomba Recíproca.

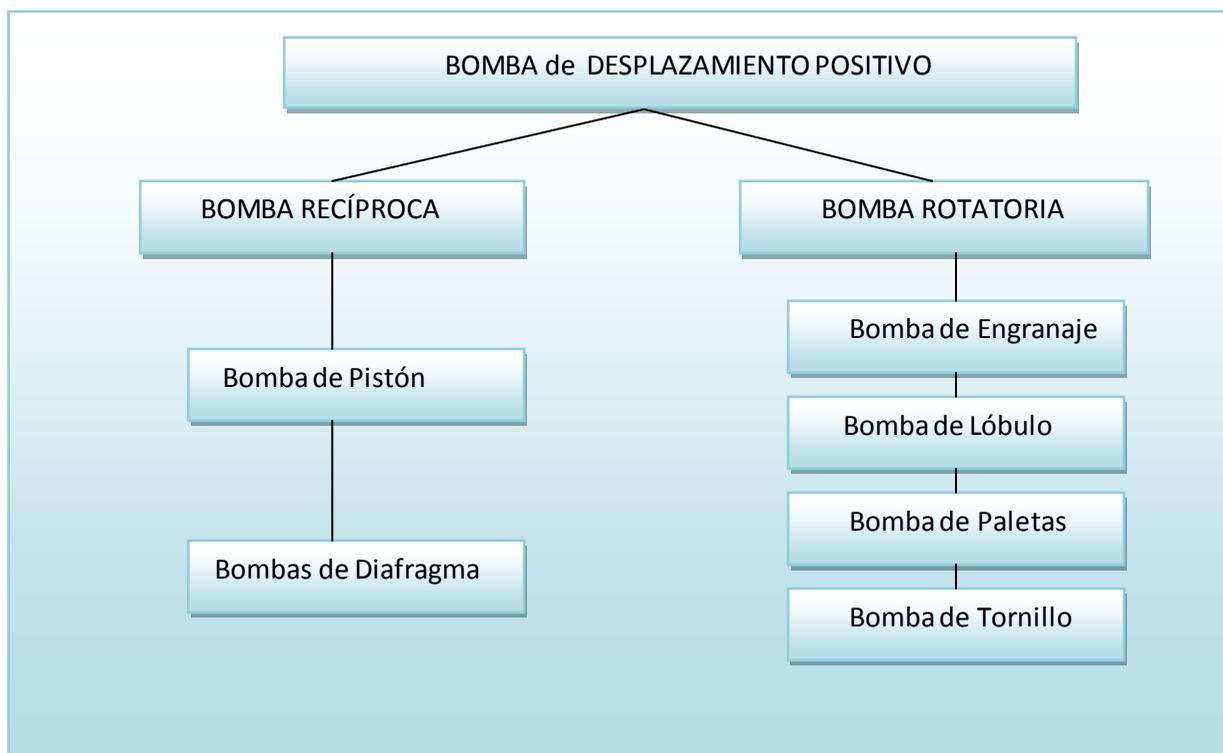


Fig. 1.7. Clasificación de las bombas de desplazamiento positivo.

Bombas Recíprocas.

El funcionamiento de una Bomba Recíproca depende del llenado y vaciado sucesivo de receptáculos de volumen fijo, para lo cual cierta cantidad de aceite es obligada a entrar al cuerpo de la bomba en donde queda encerrada momentáneamente, para después ser forzada a salir por la tubería de descarga.

Como el proceso de llenado y vaciado sucesivo de receptáculos de volumen fijo requiere fricción por resbalamiento entre las paredes estacionarias del receptáculo y las partes móviles, estas bombas no son apropiadas para manejar líquidos que contengan arenas o materias en suspensión.

Estas bombas son relativamente de baja velocidad de rotación, de tal manera que cuando tienen que ser movidas por motores eléctricos deben ser intercaladas transmisiones de engranes o poleas para reducir la velocidad entre el motor y la bomba.



Otra característica importante es la velocidad del fluido en los conductos tanto de entrada como de salida llegando a los parámetros de:

- Línea de ingreso 0,4 a 1,5 (m/s).
- Línea de descarga 2 a 5 (m/s).

Clasificación:

- Bombas de Pistón.
- Bombas de diafragma.

Descripción de la Bomba de Pistón.

Durante la carrera de descenso del pistón, se abre la válvula de admisión accionada por el vacío creado por el propio pistón, mientras la de descarga se aprieta contra su asiento, de esta forma se llena de líquido el espacio sobre él. Luego, cuando el pistón sube, el incremento de presión cierra la válvula de admisión y empuja la de escape, abriéndola, con lo que se produce la descarga. La repetición de este ciclo de trabajo produce un bombeo pulsante a presiones que pueden ser muy grandes, soporta temperaturas hasta 80°C.

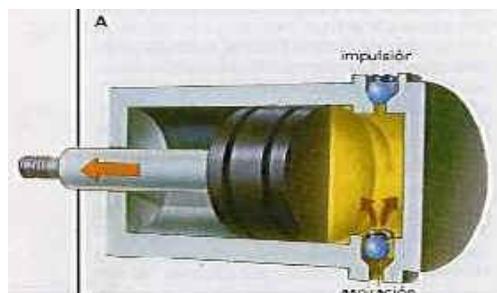


Fig. 1.8. Bomba de pistón.

Descripción de la Bomba de Diafragma.

El elemento de bombeo, colocado dentro de un cuerpo cerrado que se acciona desde el exterior por un mecanismo recíproca. Este movimiento recíproco hace aumentar y disminuir el volumen debajo del diafragma, 2 válvulas colocadas a la entrada y la salida fuerzan el líquido a circular en la dirección de bombeo. Como en las bombas de diafragma no hay piezas friccionantes, ellas



encuentran aplicación en el bombeo de líquidos contaminados con sólidos, tal como los lodos, pulpas, drenajes, soluciones ácidas y alcalinas.

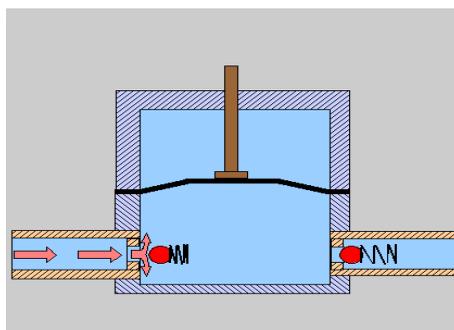


Fig. 1.9. Bomba de diafragma.

1.4 Conclusiones del capítulo.

En este capítulo se realizó un análisis general de los accionamientos con variadores de velocidad. Se da una descripción detallada de cada equipo que conforman el accionamiento eléctrico y cada una de sus principales características como son: principio de funcionamiento, parte por las que están compuestos, función que realizan, etc.

Toda esta teoría de los accionamientos con variadores de velocidad nos sirve de base para el análisis más detallado en los siguientes capítulos donde se hace un estudio más profundo del accionamiento de la bomba 135-PU-6B.



Capítulo II: Sistemas de accionamientos eléctricos de transporte laterítico con VFD.



- Introducción.
- Descripción del proceso tecnológico de la Planta de Lixiviación de la Empresa Cmte. Pedro Sotto Alba.
- Características de los variadores de velocidad YASKAWA F7.
- Ventajas del uso de variadores de velocidad en accionamientos con bombas desplazamiento positivos.
- Características del motor de inducción.
- Descripción del monitoreo a través de PQM portátil.
- Resultado de las mediciones realizadas.
- Gráficas de las mediciones realizadas.

2.1 Introducción

La determinación y selección del equipo de control depende de la forma de trabajo del accionamiento, este puede ser a velocidad constante o variable dependiendo de algún otro parámetro. Los variadores de velocidad surgen por la necesidad existente en ciertos accionamientos de variar la velocidad para hacer más eficiente su explotación. En el presente capítulo analizaremos el comportamiento del accionamiento y las causas de su bajo rendimiento.

2.2 Descripción del Proceso Tecnológico y eléctrico de la Planta de Lixiviación.

2.2.1 Planta de Lixiviación.

En esta planta comienza el proceso metalúrgico del mineral laterítico después de haber recibido el tratamiento físico en las plantas de Pulpa y Espesadores. Los accionamientos eléctricos con bombas de desplazamiento positivos para el transporte de pulpas lateríticas están presentes en diversas secciones del proceso tecnológico que sufre el mineral en las plantas de procesamiento de níquel cubano. Una de estas plantas es la de Lixiviación de la Empresa Mixta Moa Nickel SA. El objetivo de esta planta en dicha Empresa es disolver selectivamente el níquel y el cobalto del mineral. El ácido sulfúrico concentrado es usado como lixiviante. El circuito de lixiviación consiste de cinco trenes independientes, cada uno tiene cuatro reactores verticales tipo Pachuca conectados en serie. Las bombas de fondo de los espesadores envían la pulpa a los



precalentadores de contacto directo, donde la pulpa es calentada con vapor de baja presión hasta 80 °C. La pulpa precalentada fluye por gravedad a uno de los dos tanques de almacenaje. Desde los tanques de almacenaje la pulpa es bombeada con bombas de desplazamiento positivos a las bombas de desplazamiento, las cuales envían la pulpa a los calentadores por contacto directo, donde la pulpa es calentada a 246 °C, con vapor de alta presión (44atm). Este vapor es de una combinación de vapor de venteo de los reactores y vapor fresco suministrado de la planta eléctrica y la planta de ácido. La pulpa calentada pasa del calentado al primer reactor a (A), de cuatro conectados en serie, donde a la vez se alimenta el ácido sulfúrico concentrado. Cada reactor tiene un tubo central y es agitado por la inyección de vapor de alta presión. La pulpa pasa de un reactor al otro por tuberías de reboso. La pulpa de reboso del cuarto reactor (D), fluye a dos enfriadores de pulpa en paralelo donde la temperatura es reducida a 135 °C y cada uno de ellos descarga de los tanques despresurizadores a través de estranguladores de flujo. El vapor de baja presión usado en los precalentadores de pulpa es generado en estos enfriadores. La descarga de la pulpa en los tanques despresurizadores es por gravedad y entonces a través de un tanque de sello común al circuito de lavado contracorriente. El vapor de baja presión de los tanques despresurizadores es usado para precalentar la solución que entra a las autoclaves de precipitación. A continuación se muestra el diagrama de flujo tecnológico de la planta de lixiviación de La Empresa Moa Níquel SA.

Ver Anexo 4: Descripción del proceso tecnológico de la Empresa “Cmte. Pedro Soto Alba”.

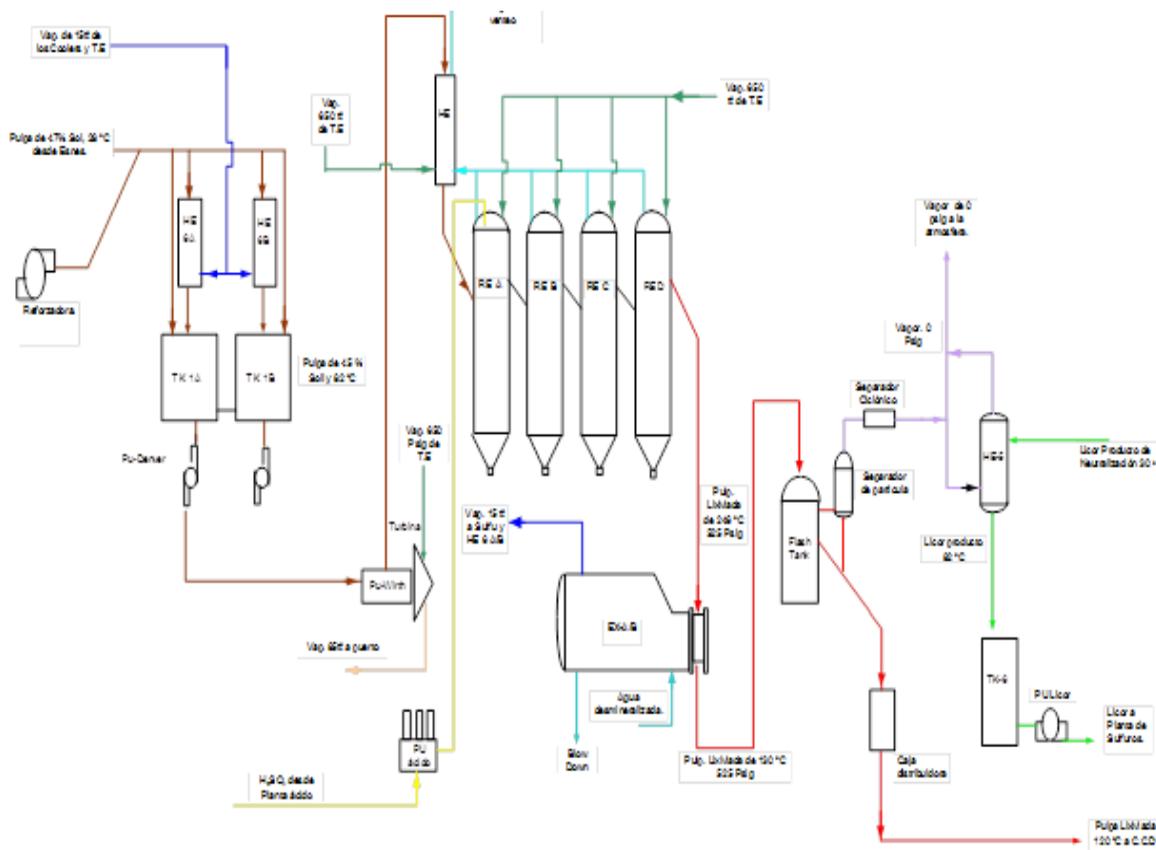


Fig. 2.1. Diagrama de flujo tecnológico de la planta de lixiviación.

2.3 Caracterización y análisis del accionamiento eléctrico de la bomba.

2.3.1 Protección del motor mediante Multilin SR-469.

El Multilin SR-469 para manejo de motores, está basado en un microprocesador, y ha sido diseñado para la protección de motores y equipos impulsados de mediana y alta capacidad. Está equipado con seis relés de salida para disparos, alarmas y bloques de arranque. La protección de motores, el diagnóstico de fallas, la medición de potencia y las funciones RTU están integradas en un paquete económico removible. El diagrama unifilar de la Figura 2.2 ilustra la funcionalidad del SR-469 utilizando los números de dispositivo de acuerdo con las normas ANSI (Instituto Nacional Americano de Normas).



El Multilin SR-469 brinda un sinnúmero de posibilidades, algunas de las cuales son descritas a continuación:

- Las cuatro entradas digitales asignables, pueden ser configuradas para diferentes funciones incluyendo tacómetro o disparo genérico y alarma con nombre programable.
- El modelo térmico incorpora polarización desbalanceada, realimentación por RTD y enfriamiento exponencial.
- Además de las quince curvas normales de sobrecarga, el SR-469 dispone de una curva – usuario - definida y una curva diseñada específicamente para el arranque con cargas de alta inercia, cuando el tiempo de aceleración excede el tiempo de obstrucción permitido.
- Una segunda curva de sobrecarga es proporcionada para motores de dos velocidades.
- Las fallas a tierra o fugas a tierra de hasta 0.25 A pueden ser detectadas utilizando el TC para tierra Multilin 50:0.025.
- También proporciona entradas de TC para protección diferencial de fase.
- Las doce entradas para RTD que se proporcionan pueden ser individualmente programadas en el campo para diferentes tipos de RTD.
- Las entradas de transformador de voltaje permiten numerosas características de protección basadas en las cantidades de voltaje y potencia.
- Las cuatro entradas analógicas de 4-20 mA pueden ser utilizadas para disparo y alarma, relacionadas a cualquier entrada de transductor tales como vibración, presión, flujo, etc.

Los diagnósticos de fallas son proporcionados a través de la recolección de datos de pre-disparo, del registrador de eventos, de la memoria de rastreo y de estadísticas. Antes de la emisión del disparo, el SR-469 tomará una instantánea de los parámetros medidos, los que serán almacenados con la causa del disparo. Estos datos previos al disparo pueden ser vistos utilizando la tecla [NEXT] antes de la reposición, o revisando los datos del último disparo en los valores actuales.



El sistema de registro del SR-469 puede almacenar hasta cuarenta eventos con hora y fecha, incluyendo datos previos al disparo. Cada vez que un disparo ocurre, el SR-469 almacenará en memoria ocho ciclos antes y ocho ciclos después del disparo, para todas las cantidades de AC tomadas. Los contadores de disparos registran el número de ocurrencias de cada tipo de disparo. Valores mínimos, máximos de RTD y entradas analógicas, también son registrados. Estas características permitirán que el operador determine con certeza y rapidez, la naturaleza del problema.

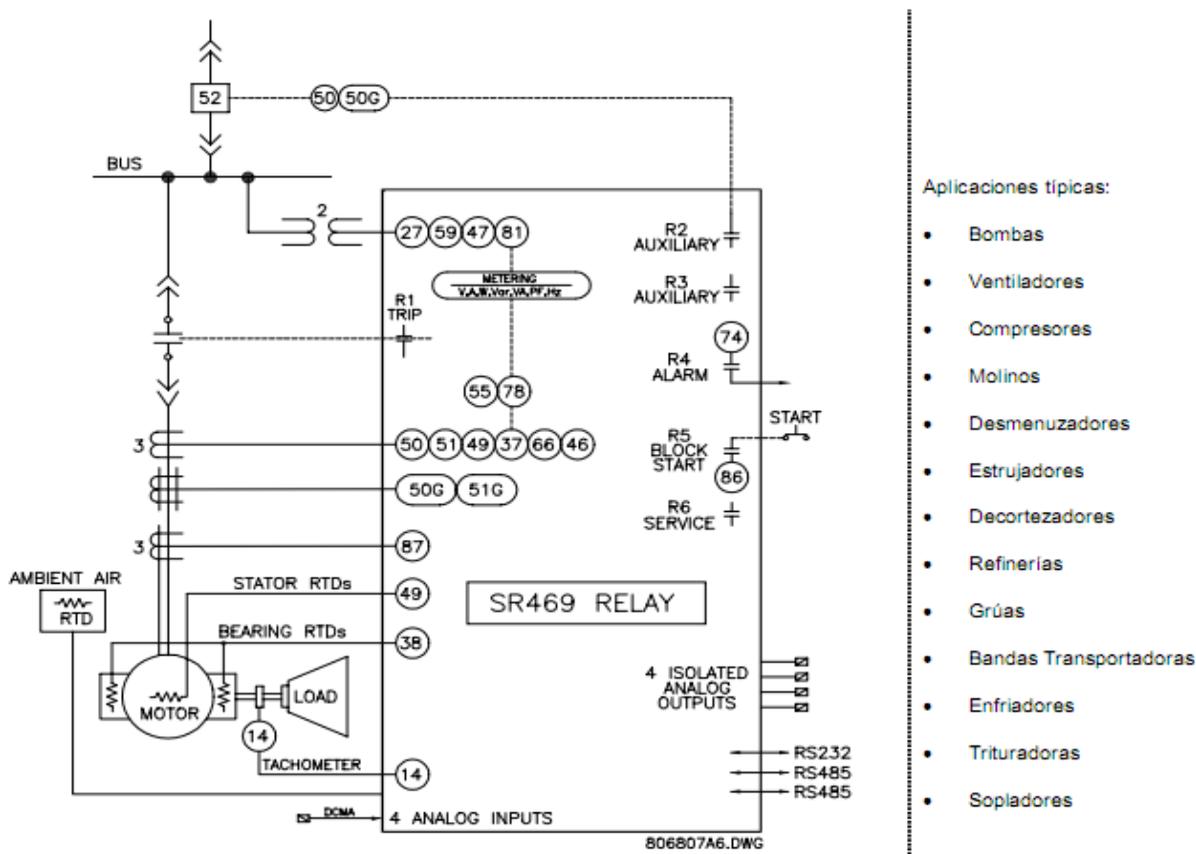


Fig. 2.2. Diagrama unifilar del SR-469.

2.4 Características de los variadores de velocidad YASKAWA F7.

El variador de velocidad YASKAWA F7 es un dispositivo operado por modulación de ancho de banda (PWM) para motores de inducción trifásicos. Este tipo de dispositivo también es conocido como variador de frecuencia ajustable, variador de velocidad ajustable, inversor, etc.



El variador de velocidad YASKAWA F7 está equipado de un teclado operador digital con funciones local / remoto, 7 idiomas opcionales, display de cristal líquido con 5 líneas de 16 caracteres por línea. Opcionalmente se puede utilizar el propio software del variador YASKAWA F7 que permite cargar y descargar su programación así como graficar y monitorear los parámetros del accionamiento desde una computadora.

En el caso en cuestión es el variador de velocidad YASKAWA F7 de 500 HP 480 Volts modelo 4300 donde sus especificaciones técnicas se muestran en la Fig. 2.3.

Model Number CIMR-F7U		4030	4037	4045	4055	4075	4090	4110	4132	4160	4185	4220 ^{TS}	4300 ^{TS}	
Ajustes de salida	Trabajo riguroso	Capacidad nominal de salida (kVA)	46.0	57.0	69.0	85.0	110.0	140.0	160.0	200.0	230.0	280.0	315.0	450.0
		Potencia (HP)	40	50	60	75	100	125/150	-	200	250	300	350	500
		In de salida (A)	69.0	75.0	91.0	112.0	150.0	180.0	216.0	260.0	304.0	370.0	414.0	590.0
		Capacidad de sobre carga (% In de salida para 60sec)	150										150 ^{TS}	150 ^{TS}
		Limite de corriente (% In de salida)	150										150 ^{TS}	150 ^{TS}
		Frecuencia Portadora	2kHz											
		Frecuencia maxima de salida	300.0Hz											
	Trabajo normal	Cap. nom. salida(kVA)	51.0	59.0	73.0	95.0	120.0	140.0	180.0	200.0	230.0	315.0	390.0	510.0
		Potencia (HP)	40/50	60	75	100	125	150	200	-	250	300/350	400/450	500+
		In de salida (A)	67.2	77.0	96.0	125.0	156.0	180.0	240.0	260.0	304.0	414.0	515.0	675.0
		Capacidad de sobre carga (% In de salida para 60sec)	107	117	114	108	115	120	108	120	120	107	118	120
		Limite de corriente (% In de salida)	120											
		Frecuencia Portadora	8	8	8	5	5	8	5	5	5	2	2	2
		Frecuencia maxima de salida	400.0Hz											
Voltage max salida	3-phase, 380, 400, 415, 440, 460 or 480Vac (Proportional to input voltage)													

Fig. 2.3 Especificaciones técnicas Variador de Velocidad YASKAWA F7 modelo 4300



De la figura anterior se pueden extraer los principales parámetros técnicos de trabajo del modelo 4300 para las condiciones de trabajo severo (Heavy Duty):

- Potencia : 500 HP
- Corriente nominal a la salida : 675 A
- Capacidad de sobrecarga : 150% por 45 segundos
- Límite de corriente : 150% de la corriente nominal de salida
- Máxima frecuencia de salida : 300 Hz

La configuración del circuito principal o diagrama en bloque del variador YASKAWA F7 modelo 4300 es representada en la Fig. 2.4.

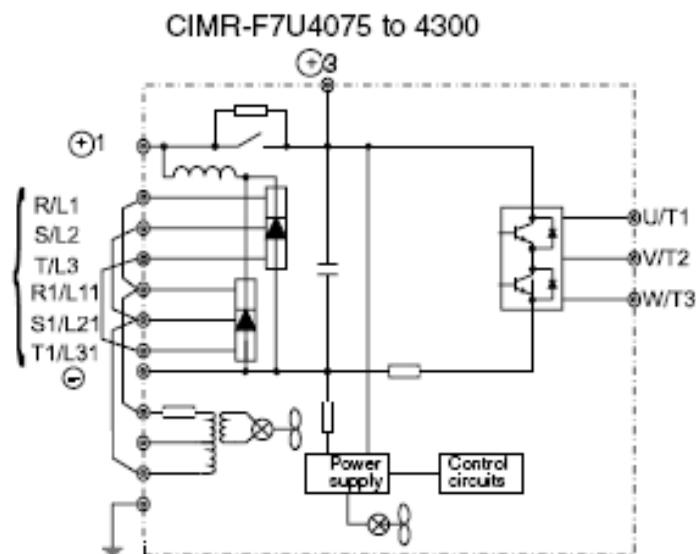


Fig. 2.4 Diagrama en bloques del Variador de velocidad YASKAWA F7 modelo 4300.

La figura anterior muestra dos puentes de diodos rectificadores conectados en paralelo. La etapa intermedia compuesta de una barra de corriente directa (CD) y un banco de capacitores, esta etapa intermedia es controlada por un interruptor y una resistencia de descarga. El inversor o etapa de ondulación está compuesta por transistores de potencia que son controlados por su respectivo circuito de control. Opcionalmente y dependiendo del modelo son instalados ventiladores para la refrigeración tanto del circuito de potencia como para los circuitos de control.



2.4.1 Ventajas del uso de variadores de velocidad en accionamientos con bombas Wirth.

1. Mejora de las condiciones mecánicas de funcionamiento.

Cuando se trabaja a baja velocidad, todos los inconvenientes mecánicos son más débiles:

- Par en el árbol disminuido.
- Empuje axial y radial menos fuertes.
- La reducción de la velocidad va acompañada de la reducción de los ruidos y vibraciones.
- El ahorro en mantenimiento puede ser importante si las instalaciones trabajan frecuentemente a la mitad o a las tres cuartas partes de su caudal máximo.

2. Mejora del arranque.

Reducción de las oscilaciones de presión en los conductos:

- El arranque de una bomba accionada por un motor a velocidad constante provoca una sacudida de par sobre la línea del árbol y el acoplamiento. Para un motor asíncrono, el par del motor durante el arranque es muy fuerte mientras que el par resistente de la bomba es muy débil. La sacudida del torque es soportada, especialmente, por el árbol de la bomba que se debe dimensionar teniendo en cuenta este fenómeno. Para los motores, sobre todo si son de alta potencia, ciertas normas limitan el número de arranques consecutivos y el número de arranques a la hora. Pero se han observado rupturas del árbol ocasionadas por la fatiga de las bombas. La velocidad variable evita las fatigas de la línea del árbol permitiendo realizar un aumento de la velocidad, según la ley deseada, mediante el control del par del motor.
- Si el conducto de aspiración es largo, el arranque progresivo permite limitar la depresión en dicho conducto y, por tanto, poder realizar una línea piezométrica mínima límite de forma que se evite:
 - ✓ La puesta en vacío del conducto o de alguno de sus puntos.
 - ✓ Una marcha en cavitación momentánea de la bomba que puede ser molesta aun siendo de corta duración.
- En lo referente al conducto de impulsión, puede ser necesario tener que actuar contra las sobrepresiones en el arranque, en las que el usuario impone un valor límite en función de la resistencia del conducto (conducto antiguo frágil; presión de servicio que se debe mantener



con un estrecho margen, sobre todo en los casos de impulsión a baja presión). En este caso, puede ser necesario añadir al inicio de la impulsión, o incluso en el conducto, una serie de dispositivos antiarriete, como válvulas de descarga, válvulas con apertura controlada, etc. La velocidad variable es también una solución sencilla y económica, ya que evita las variaciones bruscas de presión.

2.5 Características del accionamiento.

Tabla 2.1. Características del accionamiento.

Motor de Inducción	Bomba de desplazamiento positivo
Potencia: 257.4 kW	Flujo: 164.3 m ³ /h
Velocidad: 185.85 rad/s	Temperatura: 82 ⁰ C
Factor de Potencia: 89.5 (100% de la carga)	Peso: 1.367 kg/dm ³
Corriente: 389 A (100% de la carga)	Carga Hidráulica Total: 90 m
Frecuencia: 60 Hz	Eficiencia (%)
Número de polos: 4	Presión de Succión: 60 Lbs/pg ²
Tensión de línea: 4.16 kV	Presión de Descarga: 600-657 Lbs/pg ²
Rendimiento: 94.1(100% de la carga)	
Torque: 1403.27 N*m (100% de la carga)	



2.6 Descripción del monitoreo a través de PQM portátil.

Entre los componentes analizadores de redes se encuentran los PQM (Por sus siglas en inglés Power Quality Meter), está destinado al análisis y captura de variables eléctricas, en este caso se utilizó para las mediciones de las variables en la entrada del variador de velocidad, perteneciente al laboratorio eléctrico, la misma es de uso portátil y puede ser movida con facilidad. Esta presenta ganchos de medición (transformadores de corrientes), de 1000/5 A, y puntas para la medición de tensión, hasta los 600 V.



Fig. 2.4: PQM portátil usada en el monitoreo

2.6.1 Ajuste de analizadores de redes PQM.

En el ajuste de analizadores de redes PQM, la programación (Figura 2.5 y 2.6) se realizó internamente a través de una PC asistido por el software EnerVista, activándose una función para la medición constante en el tiempo de las variables a medir (Data log), que guarda las variables eléctricas asignadas.

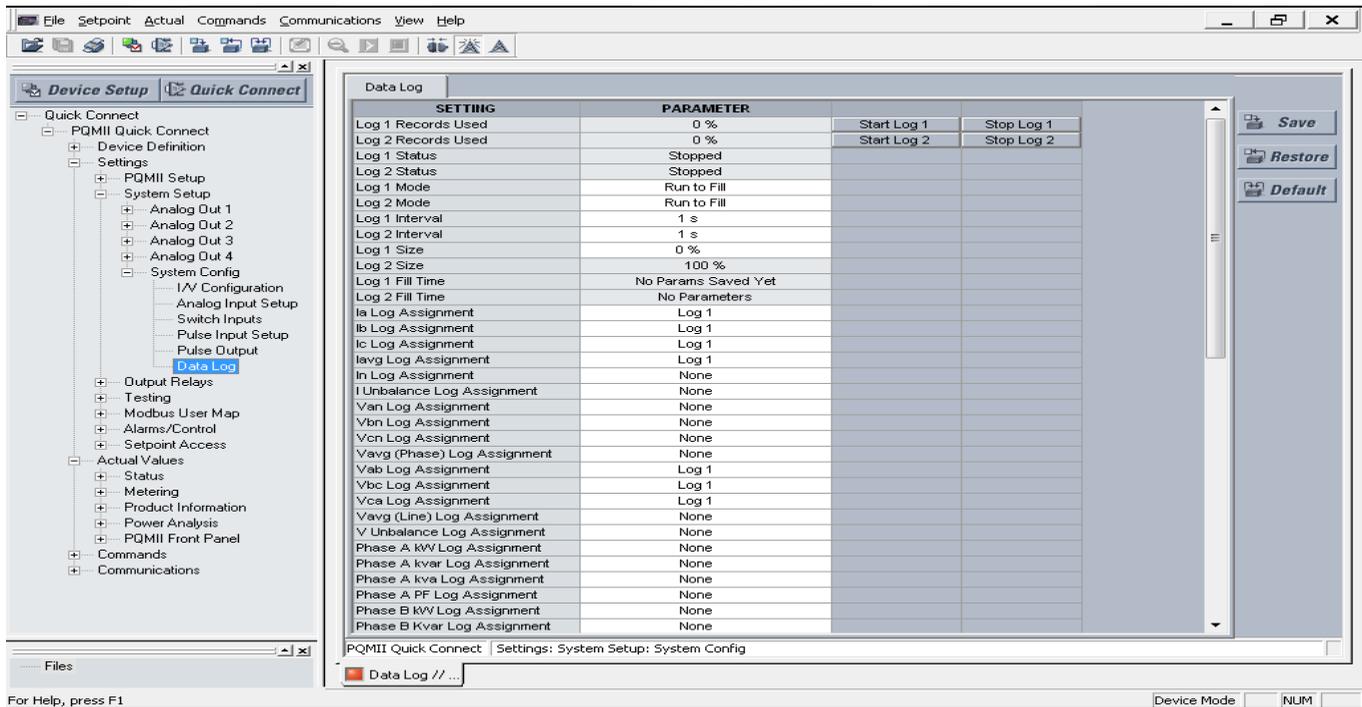


Fig. 2.5 Software de la PQM para la activación de los parámetros.

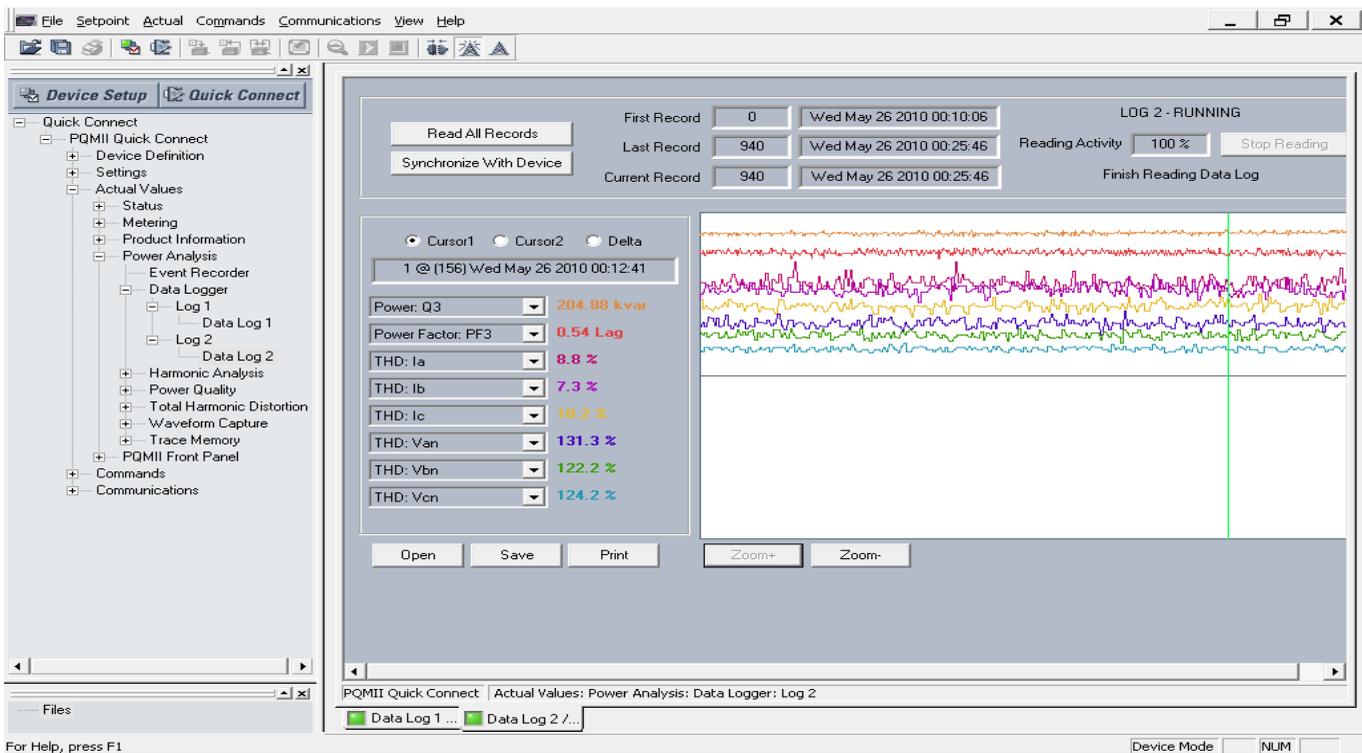


Fig. 2.6 Ejemplo de la forma de obtención de los gráficos.



2.7 Resultados de las mediciones realizadas.

En las siguientes tablas mostramos una selección de los resultados obtenidos luego de haber realizado las mediciones.

Tabla 2.2: Mediciones realizadas a la entrada del VFD.

Medición en la entrada del VFD, realizado con PQM																
la	lb	lc	Vab	Vbc	Vca	P	Q	S	FP	F	THD: la	THD: lb	THD: lc	THD: Van	THD: Vbn	THD: Vcn
(A)	(A)	(A)	(V)	(V)	(V)	(kW)	(kVAr)	(kVA)	(l)	(Hz)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)
118	120	116	472	474	471	85,17	46,92	97,2	0,87	59,91	40,8	69,3	55,6	8,6	8,9	7,6
85	93	89	472	473	471	62,24	39,74	73,8	0,84	60,14	50,4	57,4	55,1	9,3	8,8	9,1
91	98	94	470	473	470	66,13	41,12	77,9	0,85	59,85	53,9	44	60,9	9,5	9,7	7,9
103	114	106	472	474	472	76,29	45,98	89,1	0,86	59,89	47,9	48,1	56	15	7,8	9,4
105	107	107	472	471	471	75,66	43,88	87,5	0,86	59,94	50,8	54,3	45,8	7,9	10,2	7,1
113	120	116	471	472	469	84,18	45,83	95,8	0,88	59,91	51,5	46,6	47,5	14,6	7,8	8,7
109	112	108	469	473	471	78,13	45,09	90,2	0,87	60,03	58	52,1	70,9	8,4	10,3	7,7
94	96	96	470	471	471	66,81	41,32	78,6	0,85	60,07	52,9	48,9	65,3	6,2	10,1	8,5
100	102	100	471	471	469	71,16	42,87	83,1	0,86	60,07	53,3	51,7	52,5	7,6	11,1	8,4
105	108	108	471	472	470	75,86	45,07	88,2	0,86	60,06	50,8	58,7	58,9	12,1	9,2	9,2
104	108	108	470	470	471	76,08	43,76	87,8	0,87	60,08	46,7	45,5	50,5	8,3	9	9,5
94	99	98	471	471	469	68,61	41,39	80,1	0,86	60,11	60,6	57,1	64	9,6	6,9	9
116	118	119	469	470	470	85,25	45,46	96,6	0,88	60,07	50,8	50,6	44,1	7,9	9,8	10,7
106	115	111	469	469	469	77,87	45,66	90,3	0,86	60,1	56,1	43,5	78,7	10,3	11,1	7,5
103	109	105	468	475	470	74,44	44,86	86,9	0,86	60,04	56	71,4	54,9	12,2	9	9,2
118	120	116	472	474	471	85,17	46,92	97,2	0,87	59,91	40,8	69,3	55,6	8,6	8,9	7,6
85	93	89	472	473	471	62,24	39,74	73,8	0,84	60,14	50,4	57,4	55,1	9,3	8,8	9,1

Tabla 2.3: Mediciones realizadas en la salida del VFD.

Medición en la salida del VFD, realizado con Multilin SR-469											
la	lb	lc	Vab	Vbc	Vca	P	Q	S	FP	F	Flujo mineral
(A)	(A)	(A)	(V)	(V)	(V)	(kW)	(KVAr)	(KVA)	(l)	(Hz)	(gpm)
299	259	284	220	183	202	88	42,6	97,8	0,9	26,3	337,6
289	336	347	184	201	220	96	37,9	103,2	0,93	26,3	335,0
209	241	211	181	212	216	59	41,2	72,0	0,82	26,5	335,5
153	147	168	183	212	216	41	41,8	58,6	0,7	26,6	336,5
336	284	337	220	186	205	98	47,5	108,9	0,9	26,6	336,3
256	232	281	209	181	215	78	35,5	85,7	0,91	26,3	342,5
216	217	241	192	196	223	67	48,5	82,7	0,81	26,6	337,4
268	328	281	207	216	180	94	30,9	98,9	0,95	26,2	351,3
299	332	272	199	222	187	93	57,6	109,4	0,85	26,4	350,4
288	259	240	222	187	199	82	37,4	90,1	0,91	26,4	351,1
270	230	273	190	199	223	80	49,6	94,1	0,85	26,6	350,5
190	166	204	198	188	221	50	29,7	58,1	0,86	26,4	348,9
171	206	192	188	222	197	57	35,3	67,1	0,85	26,4	352,6
302	315	268	201	222	188	93	39,6	101,1	0,92	26,6	350,5
264	251	224	215	212	182	72	50,3	87,8	0,82	26,5	353,0
299	259	284	220	183	202	88	42,6	97,8	0,9	26,3	337,6
289	336	347	184	201	220	96	37,9	103,2	0,93	26,3	335,0
256	232	281	209	181	215	78	35,5	85,7	0,91	26,3	342,5
216	217	241	192	196	223	67	48,5	82,7	0,81	26,6	337,4
158	172	174	183	209	217	82	27,0	86,3	0,95	26,5	345,1
268	328	281	207	216	180	94	30,9	98,9	0,95	26,2	351,3
288	259	240	222	187	199	82	37,4	90,1	0,91	26,4	351,1
227	193	187	224	197	193	53	42,5	67,9	0,78	26,7	350,8
284	313	344	186	194	219	94	40,0	102,2	0,92	26,0	349,6



Se muestra en las tablas 2.2 y 2.3 el resumen de las mediciones de las principales variables eléctricas a la entrada y salida del VFD permitiendo evaluar el comportamiento de las mismas en diferentes horarios, el resto de las mediciones se puede observar en el anexo 1.

Tomando como base las mediciones mostradas anteriormente se realizaron los siguientes gráficos los cuales sirvieron de referencia para conocer el comportamiento de la eficiencia energética en el accionamiento.

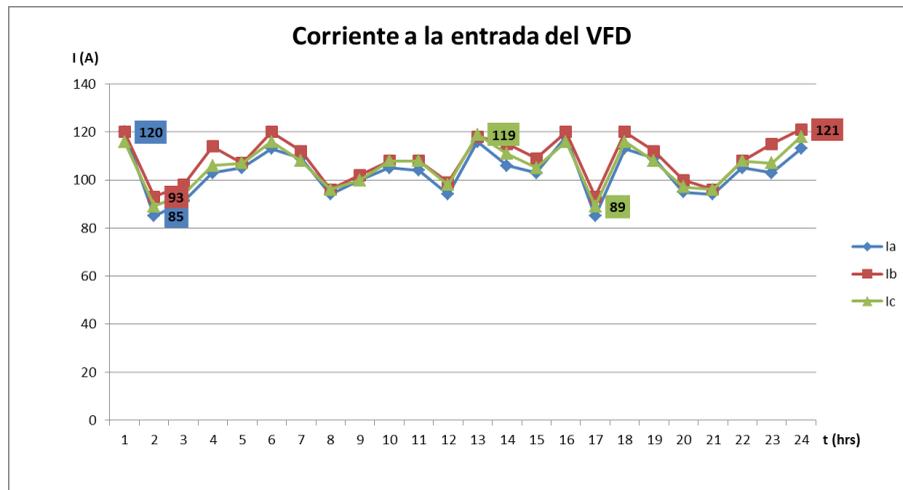


Fig. 2.7 Comportamiento de la corriente a la entrada del VFD.

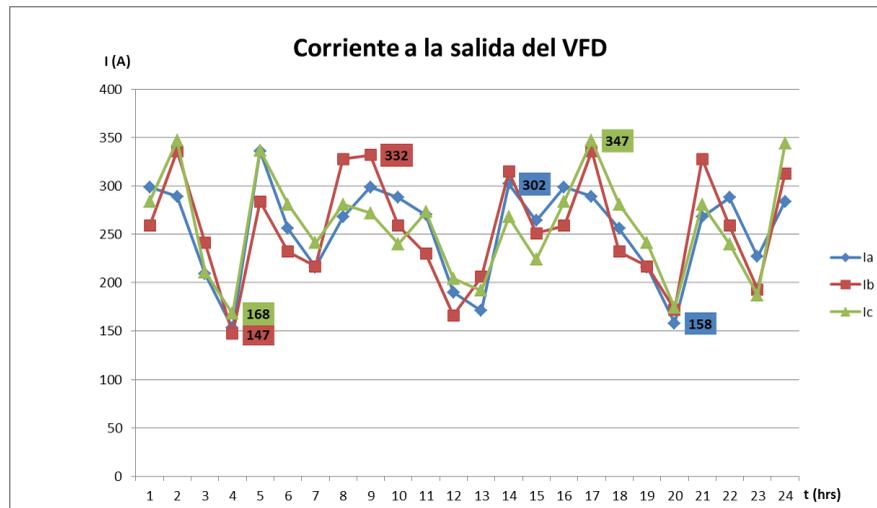


Fig. 2.8 Comportamiento de la corriente a la salida del VFD.

La fig 2.7 y 2.8 se muestra el comportamiento de la corriente en la tres fases, a la entrada y salida se puede observar que existe asimetría en la salida variando la corriente en las tres fases valores hasta 332 A.

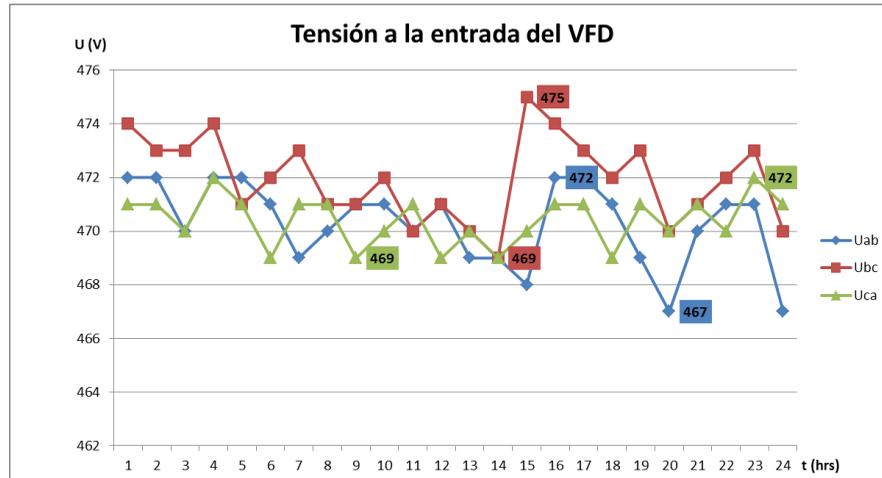


Fig. 2.9 Comportamiento de la tensión a la entrada del VFD.

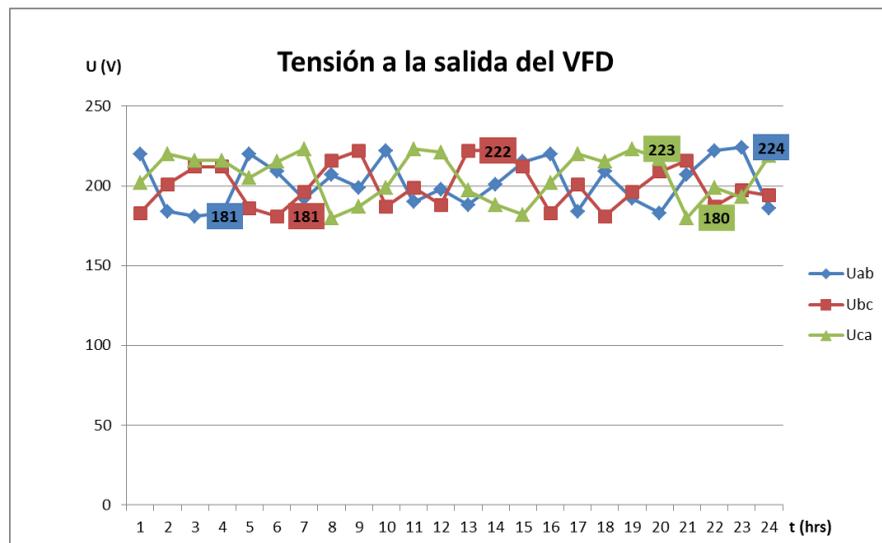


Fig. 2.10 Comportamiento de la tensión a la salida del VFD.

Se muestra en la figura 2.9 y 2.10 las variaciones de tensión en las tres fases a la entrada con valores de 475 V como máximo y mínimo de 467 V y en la salida entre 224 y 181 V.

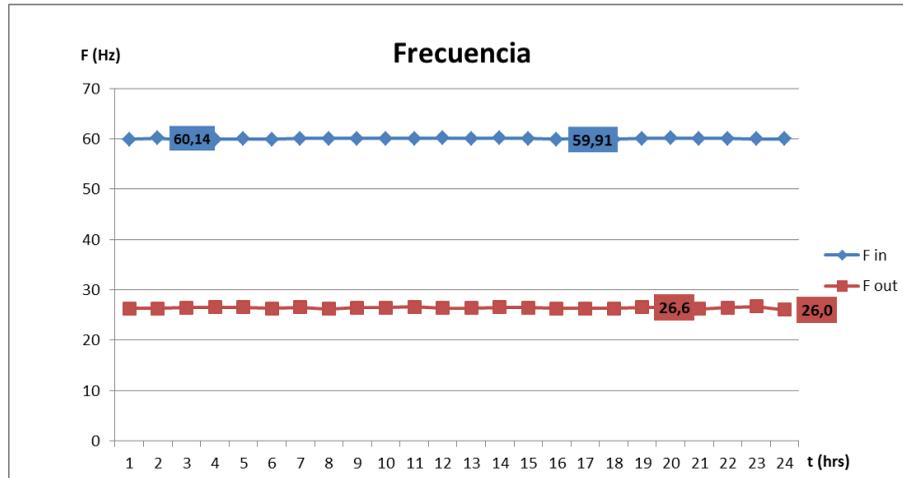


Fig. 2.11 Comportamiento de la frecuencia a la entrada y salida del VFD.

Se puede observar en la fig. 2.11, que el control de frecuencia se realiza a 26 Hz.

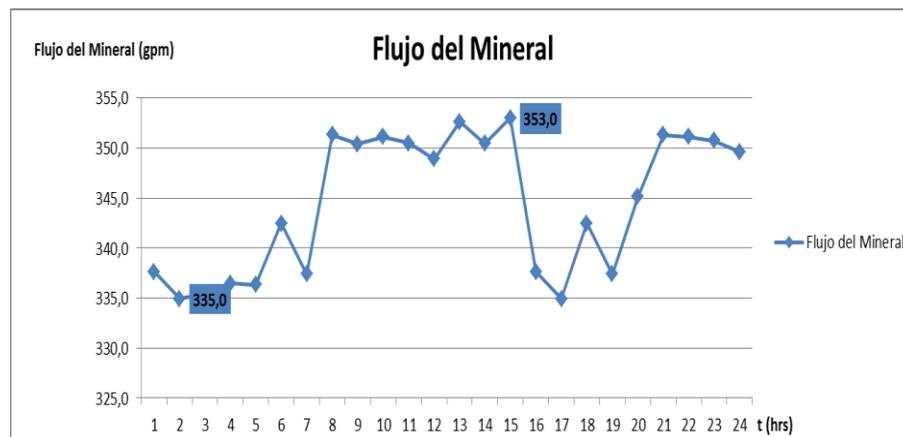


Fig. 2.12 Comportamiento del flujo del mineral.

En la fig. 2.12 se muestra el comportamiento del flujo del mineral, teniendo en cuenta las variables eléctricas existe correlación.

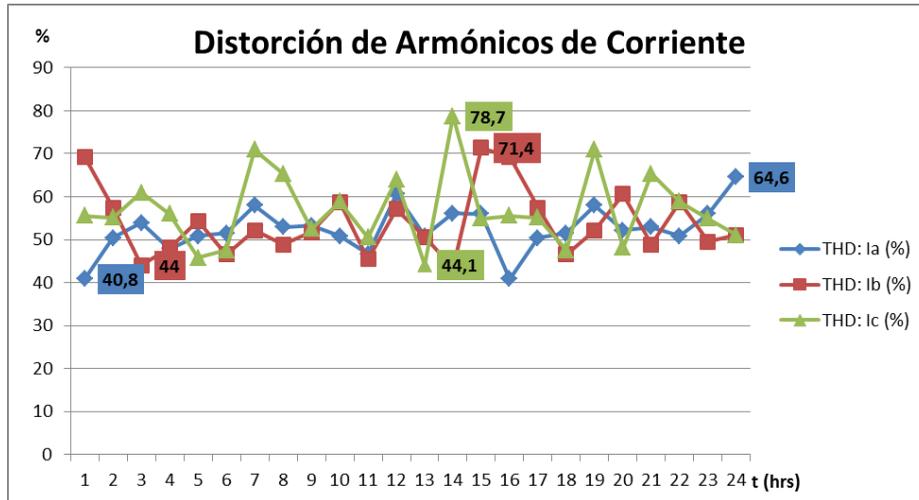


Fig. 2.13 Comportamiento de los armónicos de corriente.

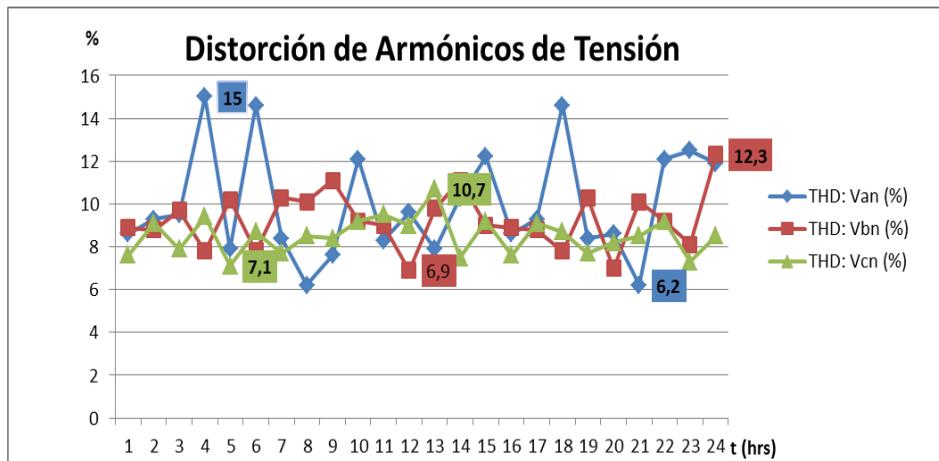


Fig. 2.14 Comportamiento de los armónicos de tensión.

En el análisis de los THD por sus siglas en inglés (Total Harmonic Distortion), fig. 2.13 y 2.14, se puede apreciar que existe un porcentaje elevado de los mismos, donde se pudo comprobar que el variador instalado no presenta filtro, ocasionando problemas de calidad de energía al sistema eléctrico.

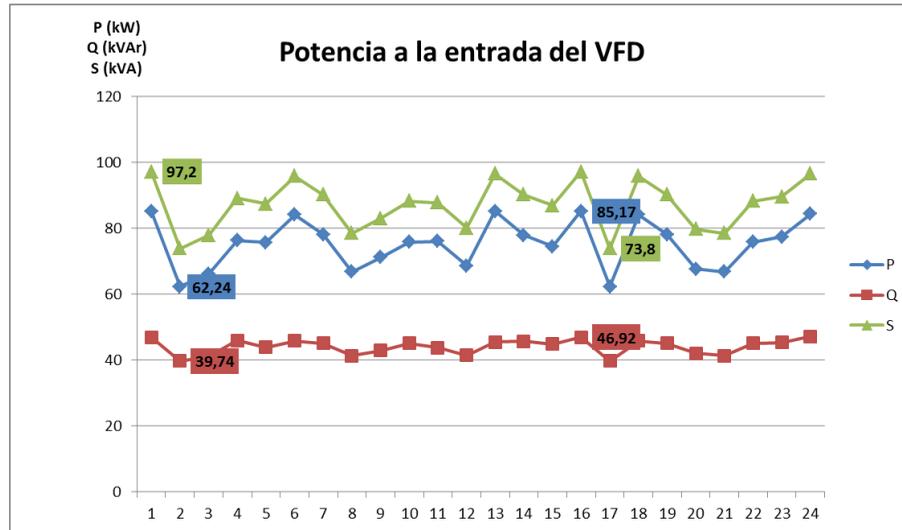


Fig. 2.15 Comportamiento de las potencias a la entrada del VFD.

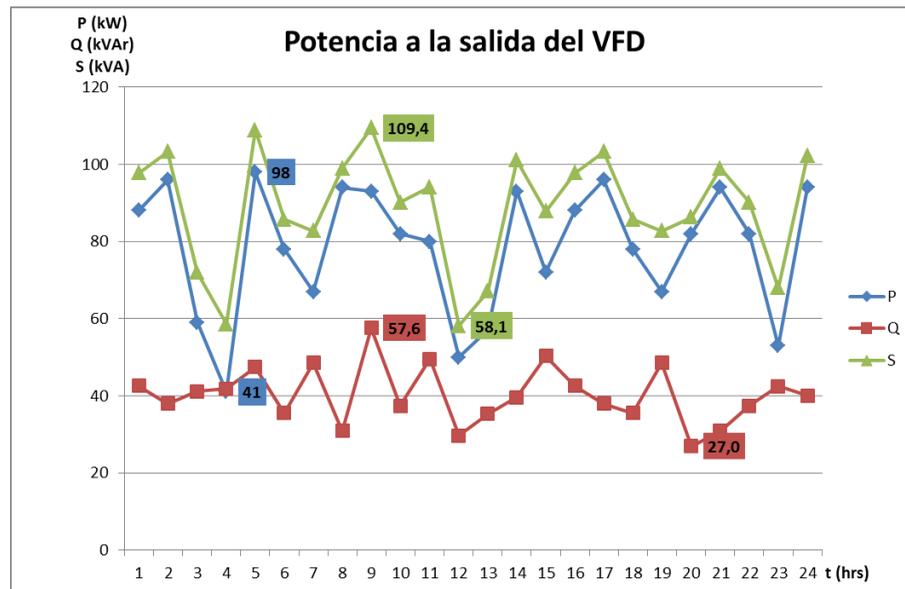


Fig. 2.16 Comportamiento de las potencias a la salida del VFD.

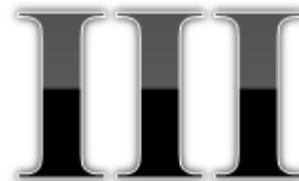
Es necesario resaltar de la representación de las potencias a la entrada y salida en la fig. 2.15 y 2.16 que el consumo oscila entre 110 y 98 kW y la potencia nominal del mismo es de 257.4 kW, el cual trabaja con un coeficiente de carga de un 50 %.



2.8 Conclusiones.

En este capítulo se realizó un análisis del comportamiento del accionamiento y las causas de su bajo rendimiento, además se describió el proceso tecnológico de la planta de Lixiviación de la Empresa Cmte. Pedro Sotto Alba y se mencionaron algunas de las características y ventajas de los variadores de velocidad YASKAWA F7 además se plasmaron los resultados de las mediciones realizadas lo cual permitió conocer el comportamiento de la eficiencia energética en el accionamiento.

Capítulo III: Eficiencia de accionamientos con controlador difuso.



- Introducción.
- Controladores difusos asistido por SIMULINK / MATLAB® 7.1.
- Propuestas para para mejorar la eficiencia en el accionamiento de la bomba.
- Valoración económica del trabajo.
- Conclusiones.

3.1 Introducción.

El método de análisis por la simulación de procesos o regímenes de trabajo de un objeto de control es una de las más grandes herramientas de la ingeniería moderna. A través de modelos, sea matemáticos o de otros tipos, se puede representar un proceso o un objeto de estudio mediante otro que es mucho más simple, económico y entendible. Se ha de desplazar el método de prototipos para muchos casos de análisis puesto que es más económico y en muchos casos también su diseño es menos complejo. Las simulaciones hechas en este caso son indispensables porque forman la base del análisis y de la comprobación de la teoría que se emplea en el control considerado.

3.2 Controladores difusos asistido por SIMULINK / MATLAB® 7.1.

Los accionamientos de velocidad variable en motores de inducción están siendo utilizados desde hace unos cuantos años, con el objetivo de ahorrar energía en mecanismos tales como bombas de desplazamiento positivo y ventiladores. Ahora bien, en mecanismos de este tipo, en los cuales el par mecánico de la carga varía con la velocidad, existe la posibilidad de un ahorro adicional de la energía consumida mediante un control separado de la tensión y la frecuencia aplicada al motor, minimizando sus pérdidas. La aplicación de este principio lleva aparejada la realización de algoritmos de optimización de la eficiencia que son difíciles de realizar por métodos convencionales, pues suelen perjudicar el comportamiento transitorio del accionamiento. Para resolver este problema se utiliza La Lógica Difusa con gran éxito. A continuación se muestran los esquemas utilizados en MATLAB para posibilitar las simulaciones de un motor asincrónico. Se realiza también el diseño de un regulador difuso de la velocidad el cual actualiza la consigna del regulador de un controlador PI enviándole la señal con velocidad necesaria para obtener una buena eficiencia en el motor y se



brinda un observador de eficiencia para el control del motor eléctrico sin sensor de velocidad solo midiendo la potencia de entrada y la corriente.

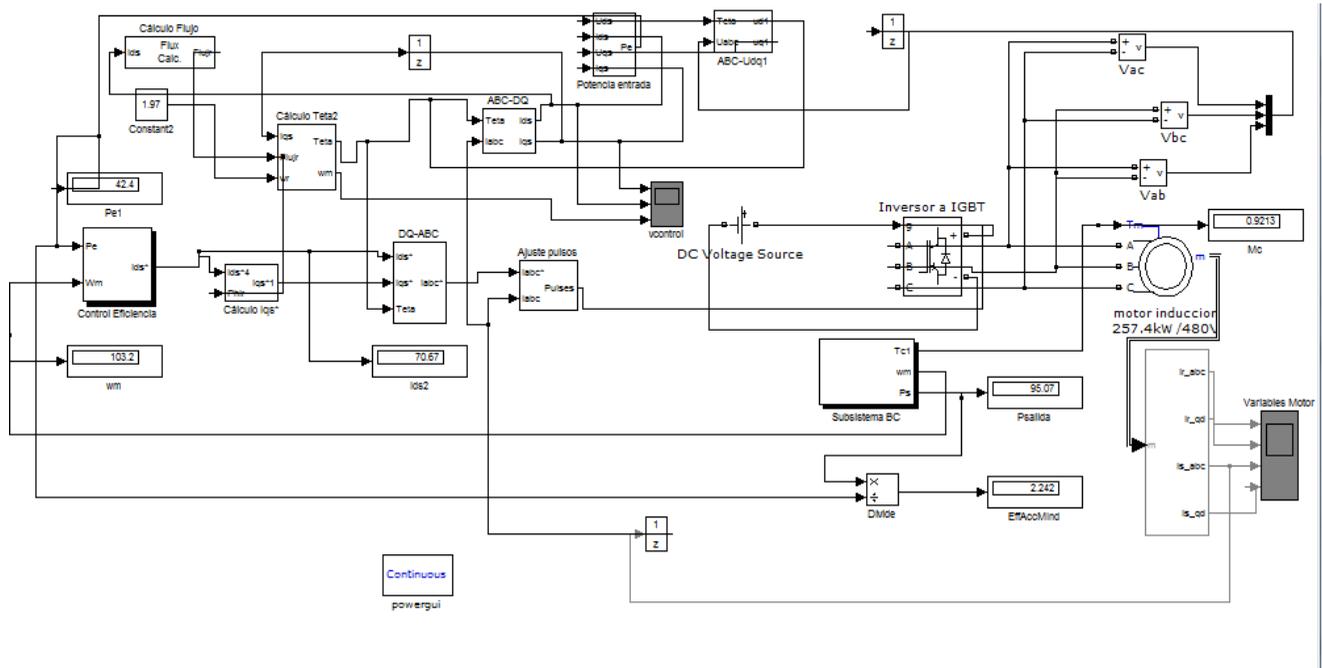


Fig. 3.1 Esquema del modelo usado para la simulación en el MATLAB.

Esquema de control de eficiencia en accionamiento de motor de inducción que acciona bomba de desplazamiento positivo, usando controlador difuso. Aquí es donde se realizan las mediciones de la corriente del estator, velocidad del rotor, torque electromagnético y la tensión, además se muestra en él la velocidad de referencia para el variador de velocidad y el torque de carga.

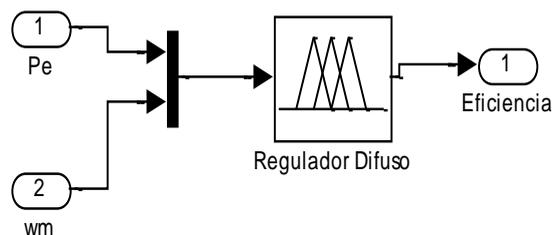


Fig. 3.2 Esquema del regulador difuso con arquitectura Mamdani

En la fig. 3.2 se muestra el regulador difuso empleado en la investigación, este cuenta con la potencia de entrada (P_e) y la velocidad angular (w_m) como variables de entrada y como variable de salida tiene eficiencia.

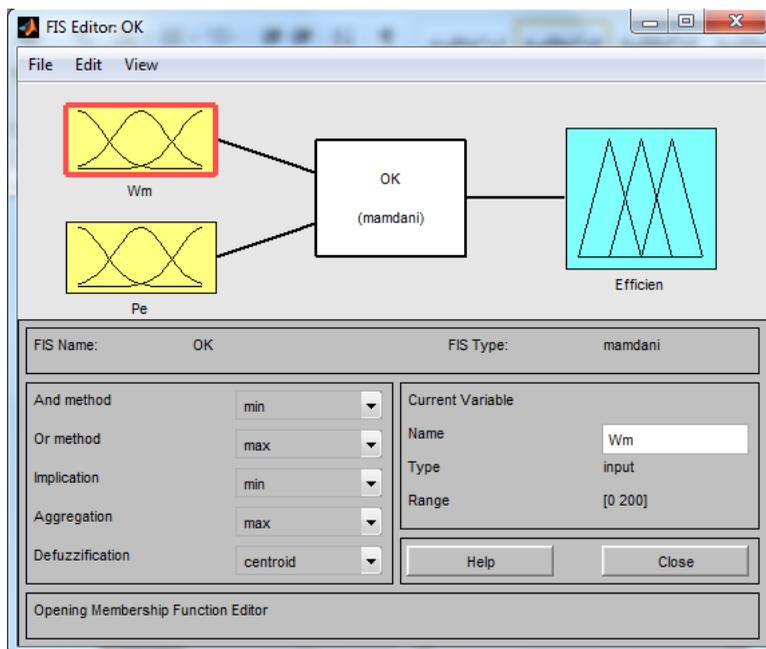


Fig. 3.3 Esquema del regulador difuso usando Lógica Difusa.

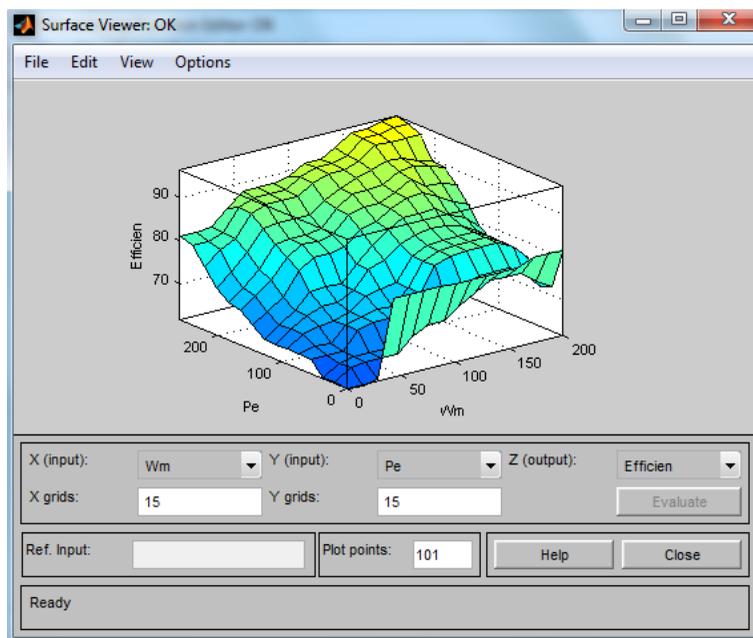


Fig. 3.4 Visualizador de superficie

Se muestra en la fig.3.4, el visualizador de superficie del regulador difuso donde podemos ver cómo se comporta la eficiencia, la potencia de entrada y la velocidad angular.

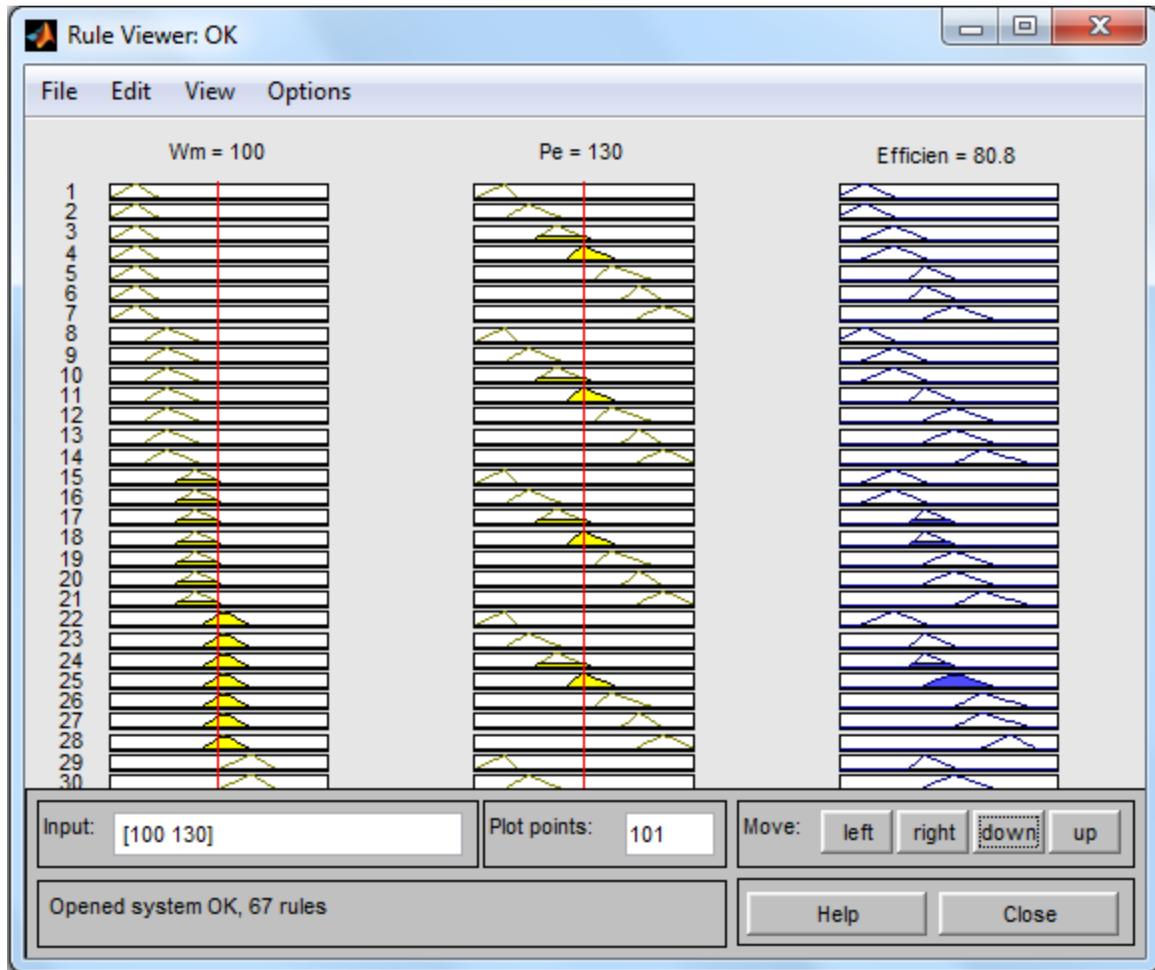


Fig. 3.5 Visualizador de reglas difusas obtenidas por el controlador.

En la fig. 3.5, se muestra cómo funcionan los ajustes difusos observándose como al aumentar la potencia de entrada o la corriente del estator aumenta la velocidad de rotor y viceversa.

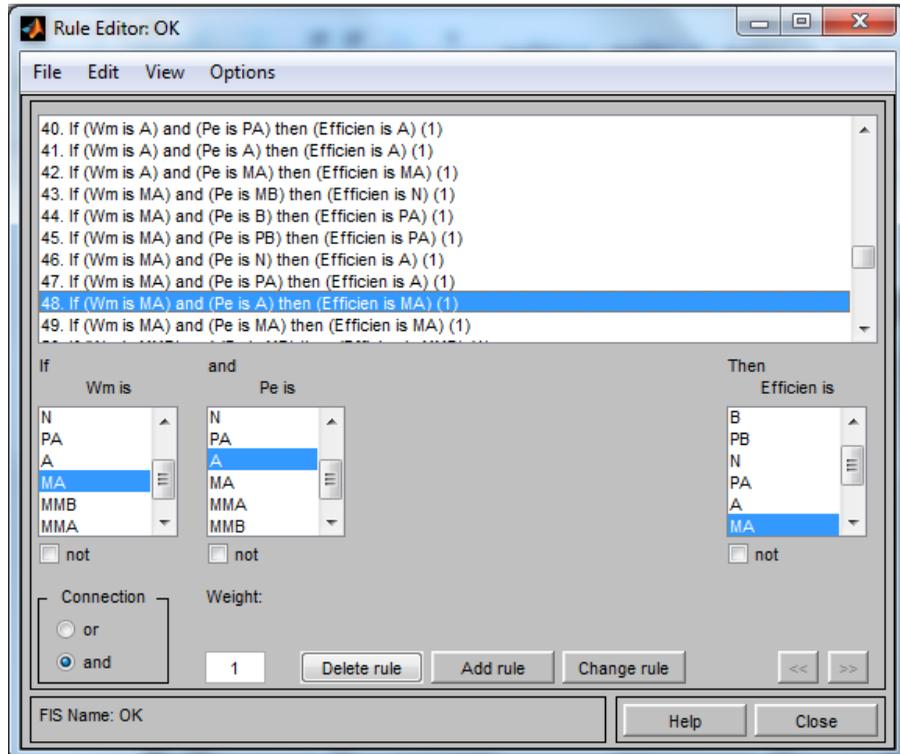


Fig. 3.6. Ajustes difusos.

En la fig. 3.6 se muestran las reglas establecidas para el control difuso del motor.

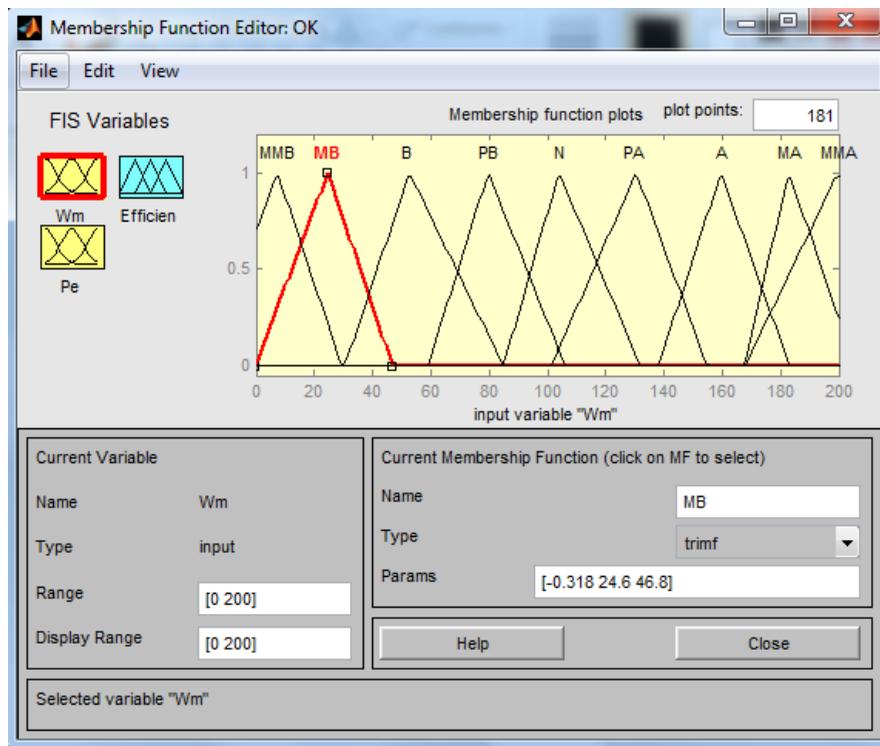


Fig. 3.7. Funciones de pertenencia para el control difuso.



3.3 Propuestas para para mejorar la eficiencia en el accionamiento de la bomba.

3.3.1 Propuesta de Filtro de armónico para la disminución de THD.

En las normas internacionales IEEE-519 las que aseguran la calidad de la energía el porcentaje de THD para la tensión es permisible hasta un 5 % para sistemas con $V \leq 69kV$, lo cual no se cumple en las mediciones realizadas, el % de THD para la tensión oscila desde un 7 % hasta un 12 % en los casos de THD: Van, THD: Vbn, THD: Vcn. Esto demuestra que aquí tenemos otro punto en el que podemos mejorar la eficiencia de este accionamiento.

Los Armónicos pueden tener efectos perjudiciales para los sistemas eléctricos, a continuación estaremos mostrando algunos de estos:

- Causan numerosos problemas de operación en los sistemas de protección. Entre ellos está la operación incorrecta de fusibles, interruptores (breakers) y equipos y sistemas digitales de protección.
- Calentamiento debido a pérdidas adicionales en máquinas y transformadores. Pérdidas adicionales en el estator (cobre y hierro) y principalmente en el rotor (devanado de amortiguamiento, y circuito magnético) de máquinas causadas por la diferencia considerable en velocidad entre el campo rotatorio inducido por los armónicos y el rotor.
- Calentamiento de cables y equipos. Esto provoca un incremento en la resistencia aparente del conductor con la frecuencia, debido al efecto pelicular, un aumento del valor eficaz de la corriente para una misma potencia activa consumida.
- Aumento de los costos de energía.
- Envejecimiento prematuro de los equipos.
- Pérdidas de producción.

Conociendo ya algunos de los efectos perjudiciales provocados por los armónicos podemos tratar de prevenir y/o corregir los efectos de estos con algunas de las siguientes medidas:

- 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 correcta configuración de equipos de rectificación, en lo que se refiere al número de pulsos, tipo de control (rectificadores), transformadores de alimentación al puente rectificador, etc., de manera que la deformación de la onda de intensidad absorbida no sea importante.
- La alimentación de la carga perturbadora con un transformador de uso exclusivo .por ejemplo, así se hace en el alumbrado de vías públicas con lámparas de descarga.
- La utilización de transformadores con devanados en triángulos en los equipos que forman parte de las redes eléctricas contribuyen a limitar la aparición de tensiones de armónicos homopolares. Ya que van a circular las corrientes de armónicos dentro de la delta.

Fórmula del Factor de distorsión Armónica total para Tensión:

$$THD_V = \frac{1}{V_1} \sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} V_n^2} \quad (3.1)$$

Fórmula del Factor de distorsión Armónica total para Corriente:

$$THD_I = \frac{1}{I_1} \sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} I_n^2} \quad (3.2)$$

Debido a que se encontraron valores muy altos en las mediciones que se tomaron de los armónicos, lo que indica las pérdidas considerables en eficiencias energéticas queremos proponer la instalación de filtros que permitan el filtrado adecuado de los armónicos de orden 5, 7 y 9, en los circuitos de potencia de los accionamientos con variadores de velocidad. A continuación se presentan algunos ejemplos de los filtros de armónicos a utilizar para dar solución al problema ocasionado por los armónicos.

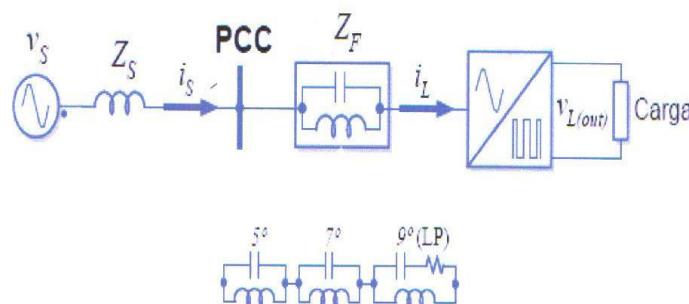


Fig. 3.8. Filtro pasivo serie.

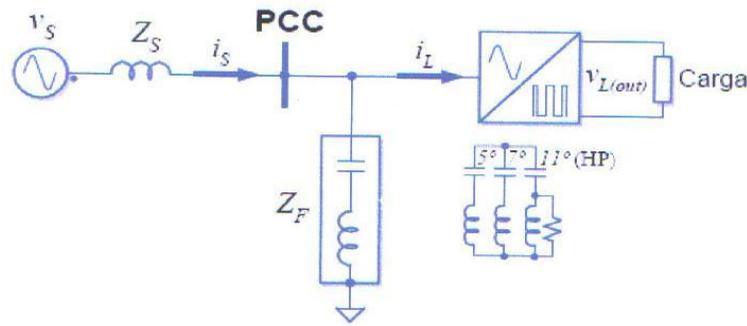


Fig. 3.9. Filtro pasivo paralelo.

Tabla 3.1: Ventajas y desventajas de los filtros pasivos.

Ventajas	Desventajas
<ul style="list-style-type: none"> ➤ Baratos. ➤ Fáciles de Implementar. ➤ Respuesta aproximada a la función ideal. ➤ Muy utilizados en aplicaciones de altas frecuencias y aplicaciones de potencia. 	<ul style="list-style-type: none"> ➤ La respuesta a la frecuencia puede tener variaciones importantes a la función ideal. ➤ La respuesta a la frecuencia está limitada al valor de los componentes pasivos. ➤ Elementos como inductancias son difíciles de conseguir y sus valores se incrementan en bajas frecuencias.

Filtro Propuesto: Filtro amortiguador de armónicos.

Este filtro está constituido por un shunt resonante sobre el que se conecta (en bornes de la inductancia) una resistencia de amortiguación R (fig. b). Puede ser comprado por un precio de 18 USD. Ver Anexo 2.

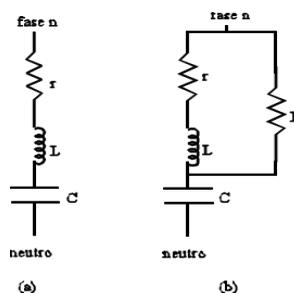


Fig. 3.10. Filtro amortiguador de armónicos.



Propiedades del Filtro amortiguador de armónicos:

- Amortiguar las anti resonancias.
- Reducir las tensiones armónicas.
- Amortiguar rápidamente el transitorio de puesta en funcionamiento del filtro.

Fórmulas para calcular el filtro:

$$\text{➤ } f_r = \frac{1 + Q * q}{2 * q \sqrt{(Q^2 - 1)L * C}} \quad (3.3)$$

$$\text{➤ } X_0 = \sqrt{\frac{L}{C}} \text{ Impedancia característica.} \quad (3.4)$$

$$\text{➤ } q = \frac{X_0}{r} \text{ Factor de calidad de la inductancia.} \quad (3.5)$$

$$\text{➤ } Q = \frac{X_0}{R} \text{ Factor de calidad del filtro.} \quad (3.6)$$



Fig. 3.11 Filtro propuesto por el fabricante del VFD Yaskawa F7 modelo 4300.

3.3.2 Propuesta de la aplicación del controlador difuso.

La Lógica Difusa es una técnica de Inteligencia Artificial, que desde un punto de vista práctico, es un método de razonamiento estadístico que permite especificar los problemas de control del mundo real en términos probabilísticos, sin necesidad de recurrir a modelos matemáticos y con un nivel de abstracción mucho más elevado. En contraste con la lógica convencional, que utiliza conceptos absolutos para referirse a una realidad, la lógica difusa la define en grados variables de pertenencias a los mismos, siguiendo patrones de razonamientos similares a los del pensamiento humano. La lógica difusa está basada en el idioma natural.



Existen cinco tipos de situaciones en las cuales la aplicación de técnicas de control difuso resulta ventajosa o necesaria:

1. Sistemas complejos que son difíciles de modelar por métodos convencionales.
2. Sistemas controlados por expertos humanos.
3. Sistemas con entradas y salidas, complejas y continuas.
4. Sistemas que utilizan la observación humana como entrada o como base de las reglas.
5. Sistemas que son confusos por naturaleza, como los encontrados en las ciencias sociales y del comportamiento.

Ventajas del uso de Lógica Difusa.

- Vence a las dificultades de la modelación matemática de sistemas altamente no-lineales.
- Responde más establemente a muestreos imprecisos de parámetros del control de retroalimentación, tales como la corriente y el voltaje del vínculo de corriente directa, y
- La matemática y el software hechos para la aplicación de la lógica difusa son simples a desarrollar y más flexibles para modificar.

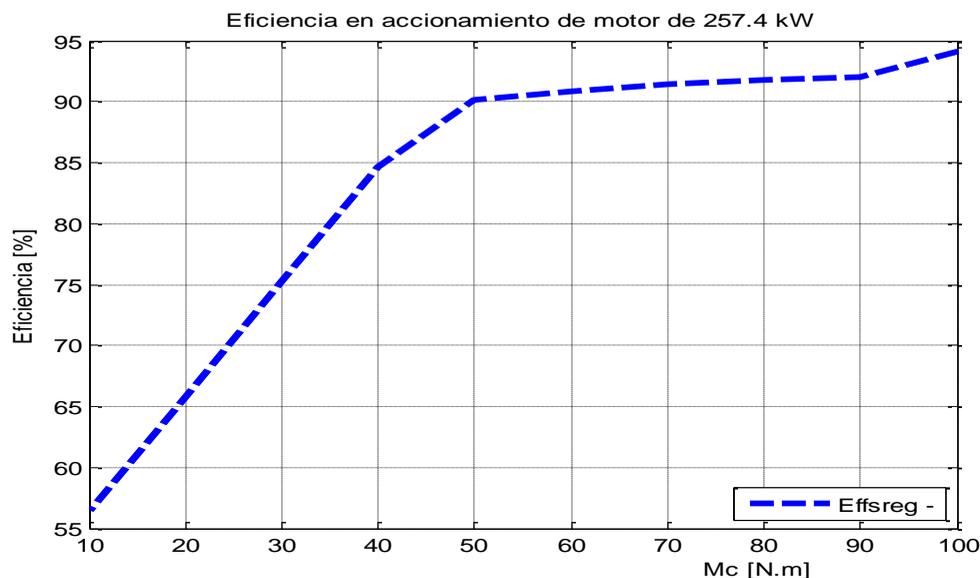


Fig. 3.12. Gráfico del comportamiento de la eficiencia sin regulador difuso.

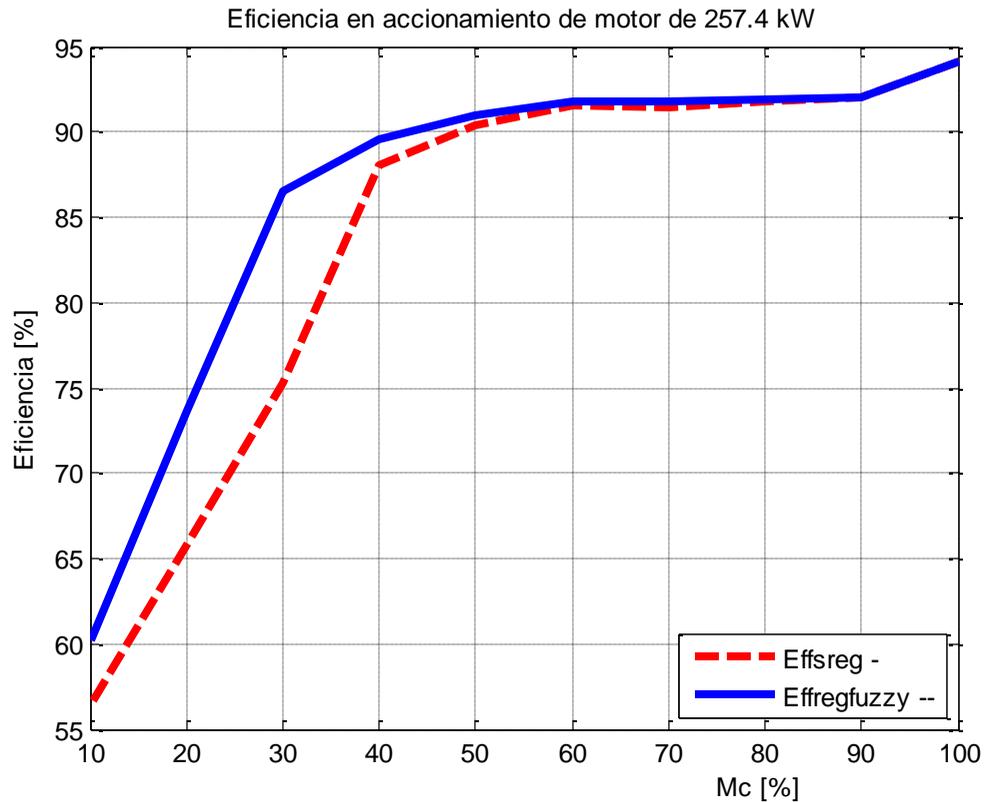


Fig. 3.13. Gráfico de las eficiencias obtenidas usando el regulador difuso y sin este en el accionamiento de bombas.

En la fig. 3.12 y 3.13 se representan el comportamiento del motor con y sin regulador difuso, permitiendo establecer una comparación de este y así demostrar una alta eficiencia con coeficiente de carga menores de un 50 %, lo que conlleva un ahorro de energía para la Empresa.

3.4 Valoración económica del trabajo.

3.4.1 Cálculo del aporte económico.

La producción de níquel por el proceso CARON constituye uno de los métodos de mayor consumo energético en la industria nacional.

Actualmente una tonelada de níquel obtenida por este proceso consume más de 10 MWh de energía eléctrica y constituye más del 20 % del costo de producción, y esto se refleja en el nivel de vida de la población. Es por esto que la eficiencia en el uso de la energía eléctrica tiene un gran impacto económico.



En las plantas minero metalúrgicas como la de Moa, se precisa que los mayores consumidores de energía eléctrica lo representan los accionamientos eléctricos de: producción de aire comprimido, las bombas de transporte laterítico, las instalaciones de molienda y secado y los ventiladores.

En esencia la instalación del esquema de control difuso con los variadores de velocidad, y demás investigaciones avaladas como el presente estudio del proceso para mejorar eficiencia en el accionamiento, permite la disminución de las pérdidas de energía y aumenta el tiempo de vida útil o empleo de la bomba.

También podemos decir que con el aumento de las pérdidas no sólo disminuye el rendimiento sino también empeora el factor de potencia del motor eléctrico.

El cálculo económico está dado por el significativo ahorro de energía cuando utilizamos el controlador difuso y el incremento del tiempo de vida útil de la instalación.

La energía ahorrada para las nuevas condiciones de trabajo del motor eléctrico y la bomba de desplazamiento positivo se puede estimar con las siguientes expresiones (3.7) y (3.8).

La mejora de la eficiencia del motor eléctrico determinada por el ahorro total de la energía por el uso del controlador difuso que modifica el trabajo en el motor se puede estimar como (3.7):

$$E_{MIahorro} = N_b \cdot \left(\frac{1}{\eta_{MI1}} - \frac{1}{\eta_{MI2}} \right) \cdot h_{totales} \quad (3.7)$$

Donde:

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

N_b – es la potencia de la bomba, [kW].

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

η_{MI2} - es la eficiencia del motor eléctrico con el controlador, [%].

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

El mejoramiento de la eficiencia de la bomba determinada por el ahorro de energía en ella, se determina como (3.8):

$$E_{bahooro} = N_{b1} \left(1 - \frac{\eta_{b1}}{\eta_{b2}} \right) \cdot h_{totales} \quad (3.8)$$

Donde:

η_{b1} – es la eficiencia de la bomba sin el controlador, [%].

η_{b2} – es la eficiencia de la bomba con el controlador, [%].

En la tabla 3.2 se brindan los datos sobre el ahorro que representa el uso del controlador difuso en varios accionamientos de bombas de transporte laterítico con potencias típicas en la planta de lixiviación de la Empresa Cmte. Pedro Soto Alba.

Tabla 3.2 Ahorro de energía anual con el uso del algoritmo de control difuso en accionamientos de motores con bombas en la planta de Lixiviación de la Empresa Cmte. Pedro Soto Alba de Moa.

Mc [%]	η_{M1} [%]	η_{M2} [%]	$\Delta E_{ahorrada}$ diario del motor [kWh]	Costo de $\Delta E_{ahorrada}$ anual total (CUC)
100	94.1	94.1	0	0
90	92	92	0	0
80	91.8	91.9	6,72	515,82
70	91.4	91.8	26,91	2`065,59
60	91.6	91.8	13,45	1`032,41
50	90.4	91	40,73	3`126,41
40	88	89.6	110,31	8`467,34
30	75.3	86.5	799,8	61`392,24
20	65.87	73.6	648,81	49`802,33
10	56.46	60.2	383,79	29`459,52
promedio	83,69	86,25	203,05	15`586,01

Considerando que en la planta existen tres accionamientos de este tipo el ahorro por este concepto es de 46`758,03 CUC.



3.4.2 Cálculo del tiempo de amortización de la inversión.

Se tiene que
$$T_{\text{amortización}} = \frac{\text{Inversión}}{\text{Energía Ahorrada}} \quad (3.9)$$

Donde:

T_{amortización}: es el tiempo de recuperación de la inversión.

Inversión: es lo que se invierte en la compra del producto.

Energía ahorrada: es la energía que se ahorra con el producto que se propone comprar en (CUC).

Existen unos chips difusos los cuales están en el orden de los 11 750 CUC y para estos el tiempo de recuperación de la inversión es de 9 meses, pero lo interesante de esto es que se pueden utilizar los microcontroladores de los Controladores lógicos programables, PLC por sus siglas en inglés (Programmable Logic Controller). En ellos se programan los algoritmos difusos, estando en el orden de los 4000 CUC, teniendo un tiempo de recuperación de la inversión de solamente 3 meses

3.5 Conclusiones.

En este capítulo se realizó la simulación de controladores difusos asistido por SIMULINK / MATLAB® 7.1 para comparar el rendimiento del motor con el controlador difuso y sin este, además se realizaron varias propuestas para mejorar la eficiencia en el accionamiento de la bomba entre las cuales están el uso del filtro amortiguador de armónicos y la aplicación del controlador difuso. Se realizó la valoración económica del trabajo para comprobar la factibilidad de la aplicación de las propuestas.



Conclusiones Generales

La realización de propuestas para mejorar la eficiencia en los accionamientos de bombas Wirth deviene en favorables resultados que pueden concluirse de la siguiente forma:

1. Se logró presentar el estado del arte del sistema de accionamientos de bombas de transporte laterítico, esto permitió tener conocimiento del principio de funcionamiento de los variadores de velocidad y de la teoría general del funcionamiento de estos para accionamientos eléctricos.
2. Se determinaron las características de explotación de los accionamientos, lo que facilitó la realización de un conjunto de mediciones, que sirvieron de referencia para conocer el comportamiento de la eficiencia energética en el accionamiento.
3. Se realizó la simulación de los accionamientos eléctricos considerando las condiciones industriales de explotación, sugiriendo como propuesta la aplicación de Lógica Difusa en el motor de inducción.
4. Se propuso el uso de filtros de armónicos, además se realizó la valoración económica de los resultados obtenidos con la aplicación de las propuestas, logando así mejorar la eficiencia en los accionamientos de la bomba de transporte laterítico cuando operan con cargas variables por lo que se obtienen ahorros de energía eléctrica.
5. Con la aplicación del controlador difuso se obtiene un ahorro promedio de energía de 15 586,01 CUC anuales, por concepto de reducción de pérdidas en el sistema de accionamiento eléctrico.



Recomendaciones

1. Se recomienda la implementación final del diseño propuesto en hardware con microcontroladores de los PLC que permita la programación del controlador difuso propuesto para el accionamiento de las bombas de transporte laterítico.
2. La utilización del software simulador del accionamiento eléctrico para bombas de desplazamiento positivo, como herramienta supervisora del proceso de transporte de pulpa laterítica.



Bibliografía

1. Abad, H. B. B., Varjani, A. Y. y Asghar, T.: “Using Fuzzy Controller in Induction Motor Speed Control with Constant Flux”, *Procedimientos de la Academia Mundial de Ciencia, Ingeniería y Tecnología*, vol. 5, abril del 2005, ISSN 1307 – 6884.
2. Aparicio, J. L.: “CRITERIOS de Diseño de Convertidores Estáticos para Accionamientos Regulados en Corriente Alterna con Motores de Inducción”. Tesis Doctoral, Universidad de Oviedo, 1987.
3. Babuska, R., Verbruggen, H. B. y Hellendoorn, H.: “Promising Fuzzy Modelling and Control Methodologies for Industrial Applications”, Universidad de Tecnología de Delft, Holanda.
4. Blanusa, B., Matic, P. y Vukosavic, S. N.: “An improved search based algorithm for efficiency optimization in the induction motor drives”, Universidad de Banja Luka, Yugoslavia, 2002.
5. Böcker, J. y Mathapati, S.: “State of the Art of Induction Motor Control”, Universidad de Paderborn, Alemania.
6. Bodson J. Digital control improves variable speed drives. *EPE Journal*. Vol. 2. No. 4. December 1992. pp 243 –248
7. Bose, B. K.: “Expert System, Fuzzy Logic, and Neural Network Applications in Power Electronics and Motion Control”, Conferencia del IEEE, vol. 82, no. 8, agosto del 1994.
8. Bose, B. K.: “Modern Power Electronics and AC Drives”, Prentice Hall PTR, 2002.
9. Briz del Blanco, F.: “Control Vectorial del Motor de Inducción con Identificación y Adaptación a los Parámetros de la Carga”, Tesis Doctoral, Universidad de Oviedo, 1995
10. Burns, R. S.: “Advanced Control Engineering”, Butterworth – Heinemann, ISBN 0 7506 5110 8, 2001.
11. Casadei, D., Profumo, F., Serra, G. y Tani, A.: “FOC and DTC: Two Viable Schemes for Induction Motors Torque Control”, *Transacciones del IEEE sobre la Electrónica de Potencia*, vol. 17, no. 5, septiembre del 2002.
12. Clement Johnson, Propuesta de Sistema de Suministro Para La Instalación de Bombeo de Pulpa Laterita a escala Semi-industria en el ISMM. Tesis en Opción al Título de Ingeniero Eléctrico. Junio 2007
13. Conceptos de la lógica difusa, su aplicación a los mapas auto-organizados



14. Costa Montiel, A. y Vilaragut Llanes, M.: “Modelos Matemáticos y Simulación del Motor de Inducción Trifásico”, CIPEL - ISPJAE, La Habana, Cuba, Febrero 2005.
15. Díaz, H., Borjas, R. y Sagárdia, A.: “Diseño y ensayo de un controlador difuso para un motor de inducción trifásico”, Revista Facultad de Ingeniería, U.T.A. (Chile), vol. 4, 1997.
16. Domingo Mery, Controladores Lógicos Programables, Pontificia Universidad Católica de Chile Facultad de Ingeniería, Noviembre 1994
17. Emadi, A.: “Energy-Efficient Electric Motors”, 3rd Edition, CRC, ISBN / ASIN: 0824757351, 2004.
18. Erickson, C. J.: “Motor Design Features for Adjustable Frequency Drives”, IEEE Transactions on Industry Applications, Vol.24, No.2, March/April, 1988
19. Filippich, M.: “Digital Control of a Three Phase Induction Motor”, Tesis de grado de Ingeniero Eléctrico, Universidad de Queensland, Australia, Octubre 2002.
20. Henderson, D. S.: “Variable Speed Electric Drives – Characteristics and Applications”, Universidad Napier, Reino Unido.
21. Ivanov - Smolensky, A.V.: “Máquinas Eléctricas”, Editorial Mir, Moscú
22. Kaburlasos, V. G.: “Novel Fuzzy System Modelling for Automatic Control Applications”, 4^{ta} Conferencia Internacional sobre Tecnología y Automatización, Thessaloniki, Greece, October 2002.
23. Karris, S. T.: “Introduction to Simulink with Engineering Applications”, ISBN 978-0-9744239-8-2, Orchard Publications, 2006.
24. Kioskeridis, I. y Margaris, N.: “Loss Minimization in Induction Motor Adjustable Speed Drives”, Transacciones del IEEE sobre la Electrónica de Potencia, vol. 43, no. 1, febrero del 1996.
25. Kioskeridis, I. y Margaris, N.: “Loss Minimization in Scalar-Controlled Induction Motor Drives with Search Controllers”, Transacciones del IEEE sobre la Electrónica de Potencia, vol. 11, no. 2, marzo del 1996.
26. Kostenko, M.P.; Piotrovsky, L.: “Máquinas Eléctricas”, Editorial Mir, Moscú
27. Kumar, S., Singh, B. y Chatterjee, J. K.: “Fuzzy Logic Based Speed Controller for Vector Controlled Cage Induction Motor”, Instituto de Tecnología de la India, Nueva Delhi, India.
28. Kusko A., Galler D., Control means for minimization of losses in ac and dc motor drives. IEEE Transactions on Industry Applications, Vol 19, No. 4. pp 561 – 570. July – august-1983.



29. Luis D. Rojas, Mario Morera, Ángel Columbié, Identificación de accionamiento de motor de inducción con bomba centrífuga usando lógica difusa. Trabajos Teórico Experimentales. *Energética* Vol. XXV, No. 3/2004.
30. Math Works Inc.: "MATLAB Fuzzy Logic Toolbox User's Guide". Math Works Inc. 1998.
31. McPherson, G. y Laramore, R. D.: "An Introduction to Electrical Machines and Transformers", 2da edición, La Habana, 1988.
32. Modelación accionamiento de motor de inducción en base al radio de potencia. SIE-2001. Santa Clara. 2001. ISBN 0327-0793.
33. Mohan, N., Undeland, T.M y Robbins, W. P.: "Power Electronics: Converter Applications and Design", Tomo I, "Motor Drive Applications", Tomo II, 2da edición, John Wiley & Sons, Nueva York, 2002.
34. Moreno Eguilaz, J. M., Cipolla Ficarra, M., da Costa Branco, P. J. y Peracaula, J.: "Fuzzy logic based improvements in efficiency optimization of induction motor drives", Universidad Politécnica de Catalunya, Barcelona, España.
35. Mudi, R. K. y Pal, N. R.: "A Robust Self-Tuning Scheme for PI- and PD-Type Fuzzy Controllers", Transacciones del IEEE sobre la Lógica Fuzzy, vol. 7, no. 1, febrero del 1999.
36. Oros, R. C., Forte, G. O. y Canali, L.: "Scalar Speed Control of a d-q Induction Motor Model Using Fuzzy Logic Controller", Universidad Tecnológica Nacional, Cordoba, Argentina, 2004.
37. Penda Negonga, sistema informativo de accionamiento de hidrotransporte basado en el PLC de Siemens, 2008.
38. PLCs Omron Sequincr Barquisimeto.
39. Power Electronic Applications. Converters and design. N. Mohan, W. Robbing and T. Undeland. 2004. Prentice Hall, New York.
40. Programming a PLC.(PDF)
41. Rashid, M. H.: "Power Electronics Handbook", Academic Press, ISBN 0 12 581650 2, 2001.
42. Reznik, L.: "Fuzzy Controllers", Newnes Publishers, ISBN 0 7506 3429 4, 1993.
43. Rojas Purón, L. D.: "Accionamiento eléctrico asincrónico para transporte eficiente de pulpa laterfítica", Tesis doctoral, ISPJAE, La Habana, Cuba, 2006.
44. Rojas Purón, L.D., Guzmán del Rio, D. y 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.



45. Romero Rueda, I.: “Conferencias de Máquinas Eléctricas III: Conferencia #5: Momentos de rotación y potencias del motor de inducción”, Dpto. Ing. Eléctrica, ISMM, Moa, Cuba, 2002.
46. Sánchez Parra, M. y Bahamaca Fernández, L. J.: “Realización de controladores lógicos difusos para el control de procesos en tiempo real: Especificación y Diseño”, IIE – UCI, México.
47. Siemens, STEP 2000 Basics of PLCs, 2000
48. SIMATICS7-200, Automatas Programables y Accesorios para Profibus, Octubre, 2003
49. Sousa, G. C. D., Bose, B. K. y Cleland, J. G.: “Fuzzy Logic Based On-Line Efficiency Optimization of an Indirect Vector Controlled Induction Motor Drive”, Transacciones del IEEE sobre la Electrónica Industrial, vol. 42, no. 2, abril del 1995.
50. Spiegel, R. J., Turner, M. W. y McCormick, V. E.: “Fuzzy – Logic – Based Controllers for Efficiency Optimization of Inverter – Fed Induction Motor Drives”, Agencia de Protección del Medioambiente, EE.UU, Mayo 1999.
51. Ta, C. M. y Hori, Y.: “Convergence Improvement of Efficiency-Optimization Control of Induction Motor Drives”, Transacciones del IEEE sobre Aplicaciones Industriales, vol. 37, no. 6, noviembre / diciembre del 2001.
52. Takagi. T., Sugeno. M.: “Application of fuzzy algorithms for control of simple dynamic plant”, IEEE Proceedings, vol. 12, Diciembre 1974, pp 1585-1588.
53. Telemecanique, Manual electrotécnico, Junio 1999
54. Turner, M. W., McCormick, V. E. y Cleland, J. G.: “Efficiency Optimization Control of AC Induction Motors: Initial Laboratory Results”, Agencia de Protección del Medioambiente, EE.UU, Mayo 1999.
55. Vaez – Zadeh, S. y Hendi, F.: “A continuous efficiency optimization controller for induction motor drives”, Energy Conversion and Management vol. 46 (2005) 701–713.
56. Van Roy, Slaets y Belmans, Induction motor efficiency: a number with many meanings, 2000.



Sitios de Internet.

1. [http// Edición 19* Revista Energía](#)
2. <http://bombascentrifugas.info-tecnica.org/>
3. <http://bombascentrifugas.info-tecnica.org/>
4. [http://es.wikipedia.org/wiki/Bomba_\(hidráulica\)](http://es.wikipedia.org/wiki/Bomba_(hidráulica))
5. <http://support.automationdirect.com/technotes.html>
6. <http://www.automatas.org>
7. <http://www.easydeltav.com/>
8. <http://www.icdindustrial.com/>
9. <http://www.infolinks.com/>
10. <http://www.plcs.net>
11. <http://www.siemens.com>
12. <http://www.yaskawa.com>



Anexos

Anexo 1: Mediciones realizadas en la entrada y salida del VFD.

Medición en la entrada del VFD, realizado con PQM															Medición en la salida del VFD, realizado con Multiin SR-469												
la	lb	lc	Vab	Vbc	Vca	P	Q	PF	F	THD: la	THD: lb	THD: lc	THD: Van	THD: Vbn	THD: Vcn	la	lb	lc	Vab	Vbc	Vca	P	Q	S	FP	F	Flujo mineral
(A)	(A)	(A)	(V)	(V)	(V)	(kW)	(kvar)	()	(Hz)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(A)	(A)	(A)	(V)	(V)	(V)	(kW)	(KVA)	(KVA)	()	(Hz)	(gpm)
118	120	116	472	474	471	85,17	46,92	0,87	59,91	40,8	69,3	55,6	8,6	8,9	7,6	299	259	284	220	183	202	88	42,6203	97,8	0,9	26,3	337,6
109	113	110	472	473	471	79,04	45,48	0,87	59,91	62,1	46,9	53,2	9	11,4	8,4	312	283	348	186	200	218	100	56,6726	114,9	0,87	26,3	337,6
107	109	104	476	476	472	76,36	44,6	0,86	59,96	61,3	49,5	49,4	7,8	8,9	8,7	240	240	283	182	213	214	78	52,4163	94,0	0,83	26,5	337,9
115	123	120	472	473	471	86,63	46,84	0,88	60,02	44,2	49,6	45,2	8,4	7,7	8,2	270	222	228	224	191	195	68	42,1426	80,0	0,85	26,5	337,8
105	113	108	473	472	471	77,82	44,07	0,87	60,02	57,9	42,3	75,2	9,5	9,1	7	177	142	153	219	184	210	52	33,5887	61,9	0,84	26,7	337,0
102	109	104	472	473	472	74,78	44,51	0,86	60,09	49,6	56,8	62,8	11	9,3	7,7	289	312	347	182	210	219	104	44,3038	113,0	0,92	26,6	337,4
85	93	89	472	473	471	62,24	39,74	0,84	60,14	50,4	57,4	55,1	9,3	8,8	9,1	289	336	347	184	201	220	96	37,9416	103,2	0,93	26,3	335,0
106	114	112	470	471	470	78,87	45,26	0,87	60,02	49,9	54,7	43,1	12,1	7,7	7,2	243	281	260	201	218	185	81	43,7192	92,0	0,88	26,3	335,3
91	98	94	470	473	470	66,13	41,12	0,85	59,85	53,9	44	60,9	9,5	9,7	7,9	209	241	211	181	212	216	59	41,1823	72,0	0,82	26,5	335,5
103	114	106	472	474	472	76,29	45,98	0,86	59,89	47,9	48,1	56	15	7,8	9,4	153	147	168	183	212	216	41	41,8284	58,6	0,7	26,6	336,5
98	105	104	471	470	472	72,55	43,4	0,86	59,92	57,4	51,6	50	11,7	11,9	8,4	276	328	324	183	224	207	99	47,9479	110,0	0,9	26,7	335,7
105	107	107	472	471	471	75,66	43,88	0,86	59,94	50,8	54,3	45,8	7,9	10,2	7,1	336	284	337	220	186	205	98	47,4636	108,9	0,9	26,6	336,3
113	120	116	471	472	469	84,18	45,83	0,88	59,91	51,5	46,6	47,5	14,6	7,8	8,7	256	232	281	209	181	215	78	35,5378	85,7	0,91	26,3	342,5
109	112	108	469	473	471	78,13	45,09	0,87	60,03	58	52,1	70,9	8,4	10,3	7,7	216	217	241	192	196	223	67	48,5072	82,7	0,81	26,6	337,4
95	100	97	467	470	470	67,68	42,07	0,85	60,1	52,2	60,6	48,1	8,6	7	8,2	158	172	174	183	209	217	82	26,9521	86,3	0,95	26,5	345,1
94	96	96	470	471	471	66,81	41,32	0,85	60,07	52,9	48,9	65,3	6,2	10,1	8,5	268	328	281	207	216	180	94	30,8963	98,9	0,95	26,2	351,3
100	102	100	471	471	469	71,16	42,87	0,86	60,07	53,3	51,7	52,5	7,6	11,1	8,4	299	332	272	199	222	187	93	57,6362	109,4	0,85	26,4	350,4
105	108	108	471	472	470	75,86	45,07	0,86	60,06	50,8	58,7	58,9	12,1	9,2	9,2	288	259	240	222	187	199	82	37,3603	90,1	0,91	26,4	351,1
103	115	107	471	473	472	77,36	45,26	0,86	60,01	56	49,5	54,9	12,5	8,1	7,3	227	193	187	224	197	193	53	42,5209	67,9	0,78	26,7	350,8
111	119	114	471	474	473	82,74	45,74	0,88	59,95	50,2	43,8	58,9	9,4	9,1	6,3	163	142	145	196	191	222	37	36,6978	52,1	0,71	26,5	349,1
105	110	106	470	470	470	76,01	44,59	0,86	59,93	60	46,8	61	10,5	10,4	7,1	291	280	316	204	184	220	99	32,5397	104,2	0,95	26,4	348,4
113	121	118	467	470	471	84,34	47,16	0,87	59,94	64,6	51,1	51	11,9	12,3	8,5	284	313	344	186	194	219	94	40,0438	102,2	0,92	26,0	349,6
99	104	102	473	473	473	72,42	42,77	0,86	59,95	65,8	48,2	64,7	7	9,6	8,6	230	270	267	182	213	212	79	38,2614	87,8	0,9	26,4	349,0
100	105	103	471	472	468	72,77	43,34	0,86	59,94	58,8	42,6	54,3	9,5	8,7	6,4	204	238	196	215	215	183	63	34,0038	71,6	0,88	26,7	349,1
100	104	101	469	471	468	71,85	43,05	0,86	60,02	58,4	53,9	63,6	7,6	7,9	7,3	273	264	225	186	221	197	78	44,2046	89,7	0,87	26,3	349,4
110	115	113	470	472	471	80,52	45,57	0,87	60,07	56,9	55	51,4	12,9	7,9	7,4	320	280	281	218	181	206	93	39,6178	101,1	0,92	26,3	349,3
91	98	93	472	470	473	65,61	42,16	0,84	60,06	58	52,1	47,3	8,9	7,2	9,4	326	283	302	217	211	181	92	52,1388	105,7	0,87	26,5	348,1
104	108	108	470	470	471	76,08	43,76	0,87	60,08	46,7	45,5	50,5	8,3	9	9,5	270	230	273	190	199	223	80	49,5795	94,1	0,85	26,6	350,5
94	99	98	471	471	469	68,61	41,39	0,86	60,11	60,6	57,1	64	9,6	6,9	9	190	166	204	198	188	221	50	29,6683	58,1	0,86	26,4	348,9
116	118	119	469	470	470	85,25	45,46	0,88	60,07	50,8	50,6	44,1	7,9	9,8	10,7	171	206	192	188	222	197	57	35,3254	67,1	0,85	26,4	352,6
108	114	110	468	469	465	78,62	44,97	0,87	60,09	52	48,8	56	11,4	9,1	6,8	289	355	313	182	220	205	94	45,5263	104,4	0,9	26,4	348,5
106	115	111	469	469	469	77,87	45,66	0,86	60,1	56,1	43,5	78,7	10,3	11,1	7,5	302	315	268	201	222	188	93	39,6178	101,1	0,92	26,6	350,5
103	109	105	468	475	470	74,44	44,86	0,86	60,04	56	71,4	54,9	12,2	9	9,2	264	251	224	215	212	182	72	50,2563	87,8	0,82	26,5	353,0
109	117	112	471	470	469	80,64	46,09	0,87	59,95	58,8	48,7	53,9	8,3	7,3	8,4	214	193	179	223	195	192	57	32,3034	65,5	0,87	26,5	348,4
91	93	92	470	468	469	63,75	40,45	0,84	59,91	49,6	45,3	56	11,2	9,3	9,9	262	216	238	219	183	204	68	34,8374	76,4	0,89	26,3	348,0
118	120	116	472	474	471	85,17	46,92	0,87	59,91	40,8	69,3	55,6	8,6	8,9	7,6	299	259	284	220	183	202	88	42,6203	97,8	0,9	26,3	337,6
109	113	110	472	473	471	79,04	45,48	0,87	59,91	62,1	46,9	53,2	9	11,4	8,4	312	283	348	186	200	218	100	56,6726	114,9	0,87	26,3	337,6
107	109	104	476	476	472	76,36	44,6	0,86	59,96	61,3	49,5	49,4	7,8	8,9	8,7	240	240	283	182	213	214	78	52,4163	94,0	0,83	26,5	337,9
115	123	120	472	473	471	86,63	46,84	0,88	60,02	44,2	49,6	45,2	8,4	7,7	8,2	270	222	228	224	191	195	68	42,1426	80,0	0,85	26,5	337,8



Medición en la entrada del VFD, realizado con PQM														Medición en la salida del VFD, realizado con Multilin SR-469													
la	lb	lc	Vab	Vbc	Vca	P	Q	PF	F	THD: la	THD: lb	THD: lc	THD: Van	THD: Vbn	THD: Vcn	la	lb	lc	Vab	Vbc	Vca	P	Q	S	FP	F	Flujo mineral
(A)	(A)	(A)	(V)	(V)	(V)	(kW)	(kvar)	(l)	(Hz)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(A)	(A)	(A)	(V)	(V)	(V)	(kW)	(KVAr)	(KVA)	(l)	(Hz)	(gpm)
105	113	108	473	472	471	77,82	44,07	0,87	60,02	57,9	42,3	75,2	9,5	9,1	7	177	142	153	219	184	210	52	33,5887	61,9	0,84	26,7	337,0
102	109	104	472	473	472	74,78	44,51	0,86	60,09	49,6	56,8	62,8	11	9,3	7,7	289	312	347	182	210	219	104	44,3038	113,0	0,92	26,6	337,4
85	93	89	472	473	471	62,24	39,74	0,84	60,14	50,4	57,4	55,1	9,3	8,8	9,1	289	336	347	184	201	220	96	37,9416	103,2	0,93	26,3	335,0
106	114	112	470	471	470	78,87	45,26	0,87	60,02	49,9	54,7	43,1	12,1	7,7	7,2	243	281	260	201	218	185	81	43,7192	92,0	0,88	26,3	335,3
91	98	94	470	473	470	66,13	41,12	0,85	59,85	53,9	44	60,9	9,5	9,7	7,9	209	241	211	181	212	216	59	41,1823	72,0	0,82	26,5	335,5
103	114	106	472	474	472	76,29	45,98	0,86	59,89	47,9	48,1	56	15	7,8	9,4	153	147	168	183	212	216	41	41,8284	58,6	0,7	26,6	336,5
98	105	104	471	470	472	72,55	43,4	0,86	59,92	57,4	51,6	50	11,7	11,9	8,4	276	328	324	183	224	207	99	47,9479	110,0	0,9	26,7	335,7
105	107	107	472	471	471	75,66	43,88	0,86	59,94	50,8	54,3	45,8	7,9	10,2	7,1	336	284	337	220	186	205	98	47,4636	108,9	0,9	26,6	336,3
113	120	116	471	472	469	84,18	45,83	0,88	59,91	51,5	46,6	47,5	14,6	7,8	8,7	256	232	281	209	181	215	78	35,5378	85,7	0,91	26,3	342,5
109	112	108	469	473	471	78,13	45,09	0,87	60,03	58	52,1	70,9	8,4	10,3	7,7	216	217	241	192	196	223	67	48,5072	82,7	0,81	26,6	337,4
95	100	97	467	470	470	67,68	42,07	0,85	60,1	52,2	60,6	48,1	8,6	7	8,2	158	172	174	183	209	217	82	26,9521	86,3	0,95	26,5	345,1
94	96	96	470	471	471	66,81	41,32	0,85	60,07	52,9	48,9	65,3	6,2	10,1	8,5	268	328	281	207	216	180	94	30,8963	98,9	0,95	26,2	351,3
100	102	100	471	471	469	71,16	42,87	0,86	60,07	53,3	51,7	52,5	7,6	11,1	8,4	299	332	272	199	222	187	93	57,6362	109,4	0,85	26,4	350,4
105	108	108	471	472	470	75,86	45,07	0,86	60,06	50,8	58,7	58,9	12,1	9,2	9,2	288	259	240	222	187	199	82	37,3603	90,1	0,91	26,4	351,1
103	115	107	471	473	472	77,36	45,26	0,86	60,01	56	49,5	54,9	12,5	8,1	7,3	227	193	187	224	197	193	53	42,5209	67,9	0,78	26,7	350,8
111	119	114	471	474	473	82,74	45,74	0,88	59,95	50,2	43,8	58,9	9,4	9,1	6,3	163	142	145	196	191	222	37	36,6978	52,1	0,71	26,5	349,1
105	110	106	470	470	470	76,01	44,59	0,86	59,93	60	46,8	61	10,5	10,4	7,1	291	280	316	204	184	220	99	32,5397	104,2	0,95	26,4	348,4
113	121	118	467	470	471	84,34	47,16	0,87	59,94	64,6	51,1	51	11,9	12,3	8,5	284	313	344	186	194	219	94	40,0438	102,2	0,92	26,0	349,6
99	104	102	473	473	473	72,42	42,77	0,86	59,95	65,8	48,2	64,7	7	9,6	8,6	230	270	267	182	213	212	79	38,2614	87,8	0,9	26,4	349,0
100	105	103	471	472	468	72,77	43,34	0,86	59,94	58,8	42,6	54,3	9,5	8,7	6,4	204	238	196	215	215	183	63	34,0038	71,6	0,88	26,7	349,1
100	104	101	469	471	468	71,85	43,05	0,86	60,02	58,4	53,9	63,6	7,6	7,9	7,3	273	264	225	186	221	197	78	44,2046	89,7	0,87	26,3	349,4
110	115	113	470	472	471	80,52	45,57	0,87	60,07	56,9	55	51,4	12,9	7,9	7,4	320	280	281	218	181	206	93	39,6178	101,1	0,92	26,3	349,3
91	98	93	472	470	473	65,61	42,16	0,84	60,06	58	52,1	47,3	8,9	7,2	9,4	326	283	302	217	211	181	92	52,1388	105,7	0,87	26,5	348,1
104	108	108	470	470	471	76,08	43,76	0,87	60,08	46,7	45,5	50,5	8,3	9	9,5	270	230	273	190	199	223	80	49,5795	94,1	0,85	26,6	350,5
94	99	98	471	471	469	68,61	41,39	0,86	60,11	60,6	57,1	64	9,6	6,9	9	190	166	204	198	188	221	50	29,6683	58,1	0,86	26,4	348,9
116	118	119	469	470	470	85,25	45,46	0,88	60,07	50,8	50,6	44,1	7,9	9,8	10,7	171	206	192	188	222	197	57	35,3254	67,1	0,85	26,4	352,6
108	114	110	468	469	465	78,62	44,97	0,87	60,09	52	48,8	56	11,4	9,1	6,8	289	355	313	182	220	205	94	45,5263	104,4	0,9	26,4	348,5
106	115	111	469	469	469	77,87	45,66	0,86	60,1	56,1	43,5	78,7	10,3	11,1	7,5	302	315	268	201	222	188	93	39,6178	101,1	0,92	26,6	350,5
103	109	105	468	475	470	74,44	44,86	0,86	60,04	56	71,4	54,9	12,2	9	9,2	264	251	224	215	212	182	72	50,2563	87,8	0,82	26,5	353,0
109	117	112	471	470	469	80,64	46,09	0,87	59,95	58,8	48,7	53,9	8,3	7,3	8,4	214	193	179	223	195	192	57	32,3034	65,5	0,87	26,5	348,4
91	93	92	470	468	469	63,75	40,45	0,84	59,91	49,6	45,3	56	11,2	9,3	9,9	262	216	238	219	183	204	68	34,8374	76,4	0,89	26,3	348,0
105	110	106	470	470	470	76,01	44,59	0,86	59,93	60	46,8	61	10,5	10,4	7,1	291	280	316	204	184	220	99	32,5397	104,2	0,95	26,4	348,4
113	121	118	467	470	471	84,34	47,16	0,87	59,94	64,6	51,1	51	11,9	12,3	8,5	284	313	344	186	194	219	94	40,0438	102,2	0,92	26,0	349,6
99	104	102	473	473	473	72,42	42,77	0,86	59,95	65,8	48,2	64,7	7	9,6	8,6	230	270	267	182	213	212	79	38,2614	87,8	0,9	26,4	349,0
100	105	103	471	472	468	72,77	43,34	0,86	59,94	58,8	42,6	54,3	9,5	8,7	6,4	204	238	196	215	215	183	63	34,0038	71,6	0,88	26,7	349,1
100	104	101	469	471	468	71,85	43,05	0,86	60,02	58,4	53,9	63,6	7,6	7,9	7,3	273	264	225	186	221	197	78	44,2046	89,7	0,87	26,3	349,4
110	115	113	470	472	471	80,52	45,57	0,87	60,07	56,9	55	51,4	12,9	7,9	7,4	320	280	281	218	181	206	93	39,6178	101,1	0,92	26,3	349,3
91	98	93	472	470	473	65,61	42,16	0,84	60,06	58	52,1	47,3	8,9	7,2	9,4	326	283	302	217	211	181	92	52,1388	105,7	0,87	26,5	348,1
104	108	108	470	470	471	76,08	43,76	0,87	60,08	46,7	45,5	50,5	8,3	9	9,5	270	230	273	190	199	223	80	49,5795	94,1	0,85	26,6	350,5
94	99	98	471	471	469	68,61	41,39	0,86	60,11	60,6	57,1	64	9,6	6,9	9	190	166	204	198	188	221	50	29,6683	58,1	0,86	26,4	348,9
116	118	119	469	470	470	85,25	45,46	0,88	60,07	50,8	50,6	44,1	7,9	9,8	10,7	171	206	192	188	222	197	57	35,3254	67,1	0,85	26,4	352,6
108	114	110	468	469	465	78,62	44,97	0,87	60,09	52	48,8	56	11,4	9,1	6,8	289	355	313	182	220	205	94	45,5263	104,4	0,9	26,4	348,5
106	115	111	469	469	469	77,87	45,66	0,86	60,1	56,1	43,5	78,7	10,3	11,1	7,5	302	315	268	201	222	188	93	39,6178	101,1	0,92	26,6	350,5
103	109	105	468	475	470	74,44	44,86	0,86	60,04	56	71,4	54,9	12,2	9	9,2	264	251	224	215	212	182	72	50,2563	87,8	0,82	26,5	353,0
109	117	112	471	470	469	80,64	46,09	0,87	59,95	58,8	48,7	53,9	8,3	7,3	8,4	214	193	179	223	195	192	57	32,3034	65,5	0,87	26,5	348,4
91	93	92	470	468	469	63,75	40,45	0,84	59,91	49,6	45,3	56	11,2	9,3	9,9	262	216	238	219	183	204	68	34,8374	76,4	0,89	26,3	348,0
118	120	116	472	474	471	85,17	46,92	0,87	59,91	40,8	69,3	55,6	8,6	8,9	7,6	299	259	284	220	183	202	88	42,6203	97,8	0,9	26,3	337,6
109	113	110	472	473	471	79,04	45,48	0,87	59,91	62,1	46,9	53,2	9	11,4	8,4	312	283	348	186	200	218	100	56,6726	114,9	0,87	26,3	337,6
107	109																										



Medición en la entrada del VFD, realizado con PQM															Medición en la salida del VFD, realizado con MultiIn SR-469												
la	lb	lc	Vab	Vbc	Vca	P	Q	PF	F	THD: la	THD: lb	THD: lc	THD: Van	THD: Vbn	THD: Vcn	la	lb	lc	Vab	Vbc	Vca	P	Q	S	FP	F	Flujo mineral
(A)	(A)	(A)	(V)	(V)	(V)	(kW)	(kvar)	()	(Hz)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(A)	(A)	(A)	(V)	(V)	(V)	(kW)	(kVAr)	(KVA)	()	(Hz)	(gpm)
105	113	108	473	472	471	77,82	44,07	0,87	60,02	57,9	42,3	75,2	9,5	9,1	7	177	142	153	219	184	210	52	33,5887	61,9	0,84	26,7	337,0
102	109	104	472	473	472	74,78	44,51	0,86	60,09	49,6	56,8	62,8	11	9,3	7,7	289	312	347	182	210	219	104	44,3038	113,0	0,92	26,6	337,4
85	93	89	472	473	471	62,24	39,74	0,84	60,14	50,4	57,4	55,1	9,3	8,8	9,1	289	336	347	184	201	220	96	37,9416	103,2	0,93	26,3	335,0
106	114	112	470	471	470	78,87	45,26	0,87	60,02	49,9	54,7	43,1	12,1	7,7	7,2	243	281	260	201	218	185	81	43,7192	92,0	0,88	26,3	335,3
91	98	94	470	473	470	66,13	41,12	0,85	59,85	53,9	44	60,9	9,5	9,7	7,9	209	241	211	181	212	216	59	41,1823	72,0	0,82	26,5	335,5
103	114	106	472	474	472	76,29	45,98	0,86	59,89	47,9	48,1	56	15	7,8	9,4	153	147	168	183	212	216	41	41,8284	58,6	0,7	26,6	336,5
98	105	104	471	470	472	72,55	43,4	0,86	59,92	57,4	51,6	50	11,7	11,9	8,4	276	328	324	183	224	207	99	47,9479	110,0	0,9	26,7	335,7
105	107	107	472	471	471	75,66	43,88	0,86	59,94	50,8	54,3	45,8	7,9	10,2	7,1	336	284	337	220	186	205	98	47,4636	108,9	0,9	26,6	336,3
113	120	116	471	472	469	84,18	45,83	0,88	59,91	51,5	46,6	47,5	14,6	7,8	8,7	256	232	281	209	181	215	78	35,5378	85,7	0,91	26,3	342,5
109	112	108	469	473	471	78,13	45,09	0,87	60,03	58	52,1	70,9	8,4	10,3	7,7	216	217	241	192	196	223	67	48,5072	82,7	0,81	26,6	337,4
95	100	97	467	470	470	67,68	42,07	0,85	60,1	52,2	60,6	48,1	8,6	7	8,2	158	172	174	183	209	217	82	26,9521	86,3	0,95	26,5	345,1
94	96	96	470	471	471	66,81	41,32	0,85	60,07	52,9	48,9	65,3	6,2	10,1	8,5	268	328	281	207	216	180	94	30,8963	98,9	0,95	26,2	351,3
100	102	100	471	471	469	71,16	42,87	0,86	60,07	53,3	51,7	52,5	7,6	11,1	8,4	299	332	272	199	222	187	93	57,6362	109,4	0,85	26,4	350,4
105	108	108	471	472	470	75,86	45,07	0,86	60,06	50,8	58,7	58,9	12,1	9,2	9,2	288	259	240	222	187	199	82	37,3603	90,1	0,91	26,4	351,1
103	115	107	471	473	472	77,36	45,26	0,86	60,01	56	49,5	54,9	12,5	8,1	7,3	227	193	187	224	197	193	53	42,5209	67,9	0,78	26,7	350,8
102	109	104	472	473	472	74,78	44,51	0,86	60,09	49,6	56,8	62,8	11	9,3	7,7	289	312	347	182	210	219	104	44,3038	113,0	0,92	26,6	337,4
85	93	89	472	473	471	62,24	39,74	0,84	60,14	50,4	57,4	55,1	9,3	8,8	9,1	289	336	347	184	201	220	96	37,9416	103,2	0,93	26,3	335,0
106	114	112	470	471	470	78,87	45,26	0,87	60,02	49,9	54,7	43,1	12,1	7,7	7,2	243	281	260	201	218	185	81	43,7192	92,0	0,88	26,3	335,3
91	98	94	470	473	470	66,13	41,12	0,85	59,85	53,9	44	60,9	9,5	9,7	7,9	209	241	211	181	212	216	59	41,1823	72,0	0,82	26,5	335,5
103	114	106	472	474	472	76,29	45,98	0,86	59,89	47,9	48,1	56	15	7,8	9,4	153	147	168	183	212	216	41	41,8284	58,6	0,7	26,6	336,5
98	105	104	471	470	472	72,55	43,4	0,86	59,92	57,4	51,6	50	11,7	11,9	8,4	276	328	324	183	224	207	99	47,9479	110,0	0,9	26,7	335,7
105	107	107	472	471	471	75,66	43,88	0,86	59,94	50,8	54,3	45,8	7,9	10,2	7,1	336	284	337	220	186	205	98	47,4636	108,9	0,9	26,6	336,3
113	120	116	471	472	469	84,18	45,83	0,88	59,91	51,5	46,6	47,5	14,6	7,8	8,7	256	232	281	209	181	215	78	35,5378	85,7	0,91	26,3	342,5
109	112	108	469	473	471	78,13	45,09	0,87	60,03	58	52,1	70,9	8,4	10,3	7,7	216	217	241	192	196	223	67	48,5072	82,7	0,81	26,6	337,4
95	100	97	467	470	470	67,68	42,07	0,85	60,1	52,2	60,6	48,1	8,6	7	8,2	158	172	174	183	209	217	82	26,9521	86,3	0,95	26,5	345,1
94	96	96	470	471	471	66,81	41,32	0,85	60,07	52,9	48,9	65,3	6,2	10,1	8,5	268	328	281	207	216	180	94	30,8963	98,9	0,95	26,2	351,3
100	102	100	471	471	469	71,16	42,87	0,86	60,07	53,3	51,7	52,5	7,6	11,1	8,4	299	332	272	199	222	187	93	57,6362	109,4	0,85	26,4	350,4
105	108	108	471	472	470	75,86	45,07	0,86	60,06	50,8	58,7	58,9	12,1	9,2	9,2	288	259	240	222	187	199	82	37,3603	90,1	0,91	26,4	351,1
103	115	107	471	473	472	77,36	45,26	0,86	60,01	56	49,5	54,9	12,5	8,1	7,3	227	193	187	224	197	193	53	42,5209	67,9	0,78	26,7	350,8
111	119	114	471	474	473	82,74	45,74	0,88	59,95	50,2	43,8	58,9	9,4	9,1	6,3	163	142	145	196	191	222	37	36,6978	52,1	0,71	26,5	349,1
105	110	106	470	470	470	76,01	44,59	0,86	59,93	60	46,8	61	10,5	10,4	7,1	291	280	316	204	184	220	99	32,5397	104,2	0,95	26,4	348,4
113	121	118	467	470	471	84,34	47,16	0,87	59,94	64,6	51,1	51	11,9	12,3	8,5	284	313	344	186	194	219	94	40,0438	102,2	0,92	26,0	349,6
99	104	102	473	473	473	72,42	42,77	0,86	59,95	65,8	48,2	64,7	7	9,6	8,6	230	270	267	182	213	212	79	38,2614	87,8	0,9	26,4	349,0
100	105	103	471	472	468	72,77	43,34	0,86	59,94	58,8	42,6	54,3	9,5	8,7	6,4	204	238	196	215	215	183	63	34,0038	71,6	0,88	26,7	349,1
100	104	101	469	471	468	71,85	43,05	0,86	60,02	58,4	53,9	63,6	7,6	7,9	7,3	273	264	225	186	221	197	78	44,2046	89,7	0,87	26,3	349,4
110	115	113	470	472	471	80,52	45,57	0,87	60,07	56,9	55	51,4	12,9	7,9	7,4	320	280	281	218	181	206	93	39,6178	101,1	0,92	26,3	349,3
91	98	93	472	470	473	65,61	42,16	0,84	60,06	58	52,1	47,3	8,9	7,2	9,4	326	283	302	217	211	181	92	52,1388	105,7	0,87	26,5	348,1
104	108	108	470	470	471	76,08	43,76	0,87	60,08	46,7	45,5	50,5	8,3	9	9,5	270	230	273	190	199	223	80	49,5795	94,1	0,85	26,6	350,5
94	99	98	471	471	469	68,61	41,39	0,86	60,11	60,6	57,1	64	9,6	6,9	9	190	166	204	198	188	221	50	29,6683	58,1	0,86	26,4	348,9
116	118	119	469	470	470	85,25	45,46	0,88	60,07	50,8	50,6	44,1	7,9	9,8	10,7	171	206	192	188	222	197	57	35,3254	67,1	0,85	26,4	352,6
108	114	110	468	469	465	78,62	44,97	0,87	60,09	52	48,8	56	11,4	9,1	6,8	289	355	313	182	220	205	94	45,5263	104,4	0,9	26,4	348,5
106	115	111	469	469	469	77,87	45,66	0,86	60,1	56,1	43,5	78,7	10,3	11,1	7,5	302	315	268	201	222	188	93	39,6178	101,1	0,92	26,6	350,5
103	109	105	468	475	470	74,44	44,86	0,86	60,04	56	71,4	54,9	12,2	9	9,2	264	251	224	215	212	182	72	50,2563	87,8	0,82	26,5	353,0
109	117	112	471	470	469	80,64	46,09	0,87	59,95	58,8	48,7	53,9	8,3	7,3	8,4	214	193	179	223	195	192	57	32,3034	65,5	0,87	26,5	348,4
91	93	92	470	468	469	63,75	40,45	0,84	59,91	49,6	45,3	56	11,2	9,3	9,9	262	216	238	219	183	204	68	34,8374	76,4	0,89	26,3	348,0
118	120	116	472	474	471	85,17	46,92	0,87	59,91	40,8	69,3	55,6	8,6	8,9	7,6	299	259	284	220	183	202	88	42,6203	97,8	0,9	26,3	337,6
109	113	110	472	473	471	79,04	45,48	0,87	59,91	62,1	46,9	53,2	9	11,4	8,4	312	283	348	186	200	218	100	56,6726	114,9	0,87	26,3	337,6
107	109	104	476	476	472	76,36	44,6	0,86	59,96	61,3	49,5	49,4	7,8	8,9	8,7	240	240	283	182	213	214	78	52,4163	94,0	0,83	26,5	337,9
115																											



Medición en la entrada del VFD, realizado con PQM															Medición en la salida del VFD, realizado con Multilin SR-469												
la	lb	lc	Vab	Vbc	Vca	P	Q	PF	F	THD: Ia	THD: Ib	THD: Ic	THD: Van	THD: Vbn	THD: Vcn	la	lb	lc	Vab	Vbc	Vca	P	Q	S	FP	F	Flujo mineral
(A)	(A)	(A)	(V)	(V)	(V)	(kW)	(kvar)	(I)	(Hz)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(A)	(A)	(A)	(V)	(V)	(V)	(kW)	(KVar)	(KVA)	(I)	(Hz)	(gpm)
105	113	108	473	472	471	77,82	44,07	0,87	60,02	57,9	42,3	75,2	9,5	9,1	7	177	142	153	219	184	210	52	33,5887	61,9	0,84	26,7	337,0
102	109	104	472	473	472	74,78	44,51	0,86	60,09	49,6	56,8	62,8	11	9,3	7,7	289	312	347	182	210	219	104	44,3038	113,0	0,92	26,6	337,4
85	93	89	472	473	471	62,24	39,74	0,84	60,14	50,4	57,4	55,1	9,3	8,8	9,1	289	336	347	184	201	220	96	37,9416	103,2	0,93	26,3	335,0
106	114	112	470	471	470	78,87	45,26	0,87	60,02	49,9	54,7	43,1	12,1	7,7	7,2	243	281	260	201	218	185	81	43,7192	92,0	0,88	26,3	335,3
91	98	94	470	473	470	66,13	41,12	0,85	59,85	53,9	44	60,9	9,5	9,7	7,9	209	241	211	181	212	216	59	41,1823	72,0	0,82	26,5	335,5
103	114	106	472	474	472	76,29	45,98	0,86	59,89	47,9	48,1	56	15	7,8	9,4	153	147	168	183	212	216	41	41,8284	58,6	0,7	26,6	336,5
98	105	104	471	470	472	72,55	43,4	0,86	59,92	57,4	51,6	50	11,7	11,9	8,4	276	328	324	183	224	207	99	47,9479	110,0	0,9	26,7	335,7
105	107	107	472	471	471	75,66	43,88	0,86	59,94	50,8	54,3	45,8	7,9	10,2	7,1	336	284	337	220	186	205	98	47,4636	108,9	0,9	26,6	336,3
113	120	116	471	472	469	84,18	45,83	0,88	59,91	51,5	46,6	47,5	14,6	7,8	8,7	256	232	281	209	181	215	78	35,5378	85,7	0,91	26,3	342,5
109	112	108	469	473	471	78,13	45,09	0,87	60,03	58	52,1	70,9	8,4	10,3	7,7	216	217	241	192	196	223	67	48,5072	82,7	0,81	26,6	337,4
95	100	97	467	470	470	67,68	42,07	0,85	60,1	52,2	60,6	48,1	8,6	7	8,2	158	172	174	183	209	217	82	26,9521	86,3	0,95	26,5	345,1
94	96	96	470	471	471	66,81	41,32	0,85	60,07	52,9	48,9	65,3	6,2	10,1	8,5	268	328	281	207	216	180	94	30,8963	98,9	0,95	26,2	351,3
100	102	100	471	471	469	71,16	42,87	0,86	60,07	53,3	51,7	52,5	7,6	11,1	8,4	299	332	272	199	222	187	93	57,6362	109,4	0,85	26,4	350,4
105	108	108	471	472	470	75,86	45,07	0,86	60,06	50,8	58,7	58,9	12,1	9,2	9,2	288	259	240	222	187	199	82	37,3603	90,1	0,91	26,4	351,1
103	115	107	471	473	472	77,36	45,26	0,86	60,01	56	49,5	54,9	12,5	8,1	7,3	227	193	187	224	197	193	53	42,5209	67,9	0,78	26,7	350,8
111	119	114	471	474	473	82,74	45,74	0,88	59,95	50,2	43,8	58,9	9,4	9,1	6,3	163	142	145	196	191	222	37	36,6978	52,1	0,71	26,5	349,1
105	110	106	470	470	470	76,01	44,59	0,86	59,93	60	46,8	61	10,5	10,4	7,1	291	280	316	204	184	220	99	32,5397	104,2	0,95	26,4	348,4
113	121	118	467	470	471	84,34	47,16	0,87	59,94	64,6	51,1	51	11,9	12,3	8,5	284	313	344	186	194	219	94	40,0438	102,2	0,92	26,0	349,6
99	104	102	473	473	473	72,42	42,77	0,86	59,95	65,8	48,2	64,7	7	9,6	8,6	230	270	267	182	213	212	79	38,2614	87,8	0,9	26,4	349,0
100	105	103	471	472	468	72,77	43,34	0,86	59,94	58,8	42,6	54,3	9,5	8,7	6,4	204	238	196	215	215	183	63	34,0038	71,6	0,88	26,7	349,1
100	104	101	469	471	468	71,85	43,05	0,86	60,02	58,4	53,9	63,6	7,6	7,9	7,3	273	264	225	186	221	197	78	44,2046	89,7	0,87	26,3	349,4
110	115	113	470	472	471	80,52	45,57	0,87	60,07	56,9	55	51,4	12,9	7,9	7,4	320	280	281	218	181	206	93	39,6178	101,1	0,92	26,3	349,3
91	98	93	472	470	473	65,61	42,16	0,84	60,06	58	52,1	47,3	8,9	7,2	9,4	326	283	302	217	211	181	92	52,1388	105,7	0,87	26,5	348,1
104	108	108	470	470	471	76,08	43,76	0,87	60,08	46,7	45,5	50,5	8,3	9	9,5	270	230	273	190	199	223	80	49,5795	94,1	0,85	26,6	350,5
94	99	98	471	471	469	68,61	41,39	0,86	60,11	60,6	57,1	64	9,6	6,9	9	190	166	204	198	188	221	50	29,6683	58,1	0,86	26,4	348,9
116	118	119	469	470	470	85,25	45,46	0,88	60,07	50,8	50,6	44,1	7,9	9,8	10,7	171	206	192	188	222	197	57	35,3254	67,1	0,85	26,4	352,6
108	114	110	468	469	465	78,62	44,97	0,87	60,09	52	48,8	56	11,4	9,1	6,8	289	355	313	182	220	205	94	45,5263	104,4	0,9	26,4	348,5
106	115	111	469	469	469	77,87	45,66	0,86	60,1	56,1	43,5	78,7	10,3	11,1	7,5	302	315	268	201	222	188	93	39,6178	101,1	0,92	26,6	350,5
103	109	105	468	475	470	74,44	44,86	0,86	60,04	56	71,4	54,9	12,2	9	9,2	264	251	224	215	212	182	72	50,2563	87,8	0,82	26,5	353,0
109	117	112	471	470	469	80,64	46,09	0,87	59,95	58,8	48,7	53,9	8,3	7,3	8,4	214	193	179	223	195	192	57	32,3034	65,5	0,87	26,5	348,4
91	93	92	470	468	469	63,75	40,45	0,84	59,91	49,6	45,3	56	11,2	9,3	9,9	262	216	238	219	183	204	68	34,8374	76,4	0,89	26,3	348,0
105	110	106	470	470	470	76,01	44,59	0,86	59,93	60	46,8	61	10,5	10,4	7,1	291	280	316	204	184	220	99	32,5397	104,2	0,95	26,4	348,4
113	121	118	467	470	471	84,34	47,16	0,87	59,94	64,6	51,1	51	11,9	12,3	8,5	284	313	344	186	194	219	94	40,0438	102,2	0,92	26,0	349,6
99	104	102	473	473	473	72,42	42,77	0,86	59,95	65,8	48,2	64,7	7	9,6	8,6	230	270	267	182	213	212	79	38,2614	87,8	0,9	26,4	349,0
100	105	103	471	472	468	72,77	43,34	0,86	59,94	58,8	42,6	54,3	9,5	8,7	6,4	204	238	196	215	215	183	63	34,0038	71,6	0,88	26,7	349,1
100	104	101	469	471	468	71,85	43,05	0,86	60,02	58,4	53,9	63,6	7,6	7,9	7,3	273	264	225	186	221	197	78	44,2046	89,7	0,87	26,3	349,4
110	115	113	470	472	471	80,52	45,57	0,87	60,07	56,9	55	51,4	12,9	7,9	7,4	320	280	281	218	181	206	93	39,6178	101,1	0,92	26,3	349,3
91	98	93	472	470	473	65,61	42,16	0,84	60,06	58	52,1	47,3	8,9	7,2	9,4	326	283	302	217	211	181	92	52,1388	105,7	0,87	26,5	348,1
104	108	108	470	470	471	76,08	43,76	0,87	60,08	46,7	45,5	50,5	8,3	9	9,5	270	230	273	190	199	223	80	49,5795	94,1	0,85	26,6	350,5
94	99	98	471	471	469	68,61	41,39	0,86	60,11	60,6	57,1	64	9,6	6,9	9	190	166	204	198	188	221	50	29,6683	58,1	0,86	26,4	348,9
116	118	119	469	470	470	85,25	45,46	0,88	60,07	50,8	50,6	44,1	7,9	9,8	10,7	171	206	192	188	222	197	57	35,3254	67,1	0,85	26,4	352,6
108	114	110	468	469	465	78,62	44,97	0,87	60,09	52	48,8	56	11,4	9,1	6,8	289	355	313	182	220	205	94	45,5263	104,4	0,9	26,4	348,5
106	115	111	469	469	469	77,87	45,66	0,86	60,1	56,1	43,5	78,7	10,3	11,1	7,5	302	315	268	201	222	188	93	39,6178	101,1	0,92	26,6	350,5
103	109	105	468	475	470	74,44	44,86	0,86	60,04	56	71,4	54,9	12,2	9	9,2	264	251	224	215	212	182	72	50,2563	87,8	0,82	26,5	353,0
109	117	112	471	470	469	80,64	46,09	0,87	59,95	58,8	48,7	53,9	8,3	7,3	8,4	214	193	179	223	195	192	57	32,3034	65,5	0,87	26,5	348,4
91	93	92	470	468	469	63,75	40,45	0,84	59,91	49,6	45,3	56	11,2	9,3	9,9	262	216	238	219	183	204	68	34,8374	76,4	0,89	26,3	348,0
118	120	116	472	474	471	85,17	46,92	0,87	59,91	40,8	69,3	55,6	8,6	8,9	7,6	299	259	284	220	183	202	88	42,6203	97,8	0,9	26,3	337,6
109	113	110	472	473	471	79,04	45,48	0,87	59,91	62,1	46,9	53,2	9	11,4	8,4	312	283	348	186	200	218	100	56,6726	114,9	0,87	26,3	337,6
109	113																										



Medición en la entrada del VFD, realizado con PQM															Medición en la salida del VFD, realizado con Multilin SR-469												
la	lb	lc	Vab	Vbc	Vca	P	Q	PF	F	THD: Ia	THD: Ib	THD: Ic	THD: Van	THD: Vbn	THD: Vcn	la	lb	lc	Vab	Vbc	Vca	P	Q	S	FP	F	Flujo mineral
(A)	(A)	(A)	(V)	(V)	(V)	(kW)	(kvar)	()	(Hz)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(A)	(A)	(A)	(V)	(V)	(V)	(kW)	(KVAR)	(KVA)	()	(Hz)	(gpm)
105	113	108	473	472	471	77,82	44,07	0,87	60,02	57,9	42,3	75,2	9,5	9,1	7	177	142	153	219	184	210	52	33,5887	61,9	0,84	26,7	337,0
102	109	104	472	473	472	74,78	44,51	0,86	60,09	49,6	56,8	62,8	11	9,3	7,7	289	312	347	182	210	219	104	44,3038	113,0	0,92	26,6	337,4
85	93	89	472	473	471	62,24	39,74	0,84	60,14	50,4	57,4	55,1	9,3	8,8	9,1	289	336	347	184	201	220	96	37,9416	103,2	0,93	26,3	335,0
106	114	112	470	471	470	78,87	45,26	0,87	60,02	49,9	54,7	43,1	12,1	7,7	7,2	243	281	260	201	218	185	81	43,7192	92,0	0,88	26,3	335,3
91	98	94	470	473	470	66,13	41,12	0,85	59,85	53,9	44	60,9	9,5	9,7	7,9	209	241	211	181	212	216	59	41,1823	72,0	0,82	26,5	335,5
103	114	106	472	474	472	76,29	45,98	0,86	59,89	47,9	48,1	56	15	7,8	9,4	153	147	168	183	212	216	41	41,8284	58,6	0,7	26,6	336,5
98	105	104	471	470	472	72,55	43,4	0,86	59,92	57,4	51,6	50	11,7	11,9	8,4	276	328	324	183	224	207	99	47,9479	110,0	0,9	26,7	335,7
105	107	107	472	471	471	75,66	43,88	0,86	59,94	50,8	54,3	45,8	7,9	10,2	7,1	336	284	337	220	186	205	98	47,4636	108,9	0,9	26,6	336,3
113	120	116	471	472	469	84,18	45,83	0,88	59,91	51,5	46,6	47,5	14,6	7,8	8,7	256	232	281	209	181	215	78	35,5378	85,7	0,91	26,3	342,5
109	112	108	469	473	471	78,13	45,09	0,87	60,03	58	52,1	70,9	8,4	10,3	7,7	216	217	241	192	196	223	67	48,5072	82,7	0,81	26,6	337,4
95	100	97	467	470	470	67,68	42,07	0,85	60,1	52,2	60,6	48,1	8,6	7	8,2	158	172	174	183	209	217	82	26,9521	86,3	0,95	26,5	345,1
94	96	96	470	471	471	66,81	41,32	0,85	60,07	52,9	48,9	65,3	6,2	10,1	8,5	268	328	281	207	216	180	94	30,8963	98,9	0,95	26,2	351,3
100	102	100	471	471	469	71,16	42,87	0,86	60,07	53,3	51,7	52,5	7,6	11,1	8,4	299	332	272	199	222	187	93	57,6362	109,4	0,85	26,4	350,4
105	108	108	471	472	470	75,86	45,07	0,86	60,06	50,8	58,7	58,9	12,1	9,2	9,2	288	259	240	222	187	199	82	37,3603	90,1	0,91	26,4	351,1
103	115	107	471	473	472	77,36	45,26	0,86	60,01	56	49,5	54,9	12,5	8,1	7,3	227	193	187	224	197	193	53	42,5209	67,9	0,78	26,7	350,8
111	119	114	471	474	473	82,74	45,74	0,88	59,95	50,2	43,8	58,9	9,4	9,1	6,3	163	142	145	196	191	222	37	36,6978	52,1	0,71	26,5	349,1
105	110	106	470	470	470	76,01	44,59	0,86	59,93	60	46,8	61	10,5	10,4	7,1	291	280	316	204	184	220	99	32,5397	104,2	0,95	26,4	348,4
113	121	118	467	470	471	84,34	47,16	0,87	59,94	64,6	51,1	51	11,9	12,3	8,5	284	313	344	186	194	219	94	40,0438	102,2	0,92	26,0	349,6
99	104	102	473	473	473	72,42	42,77	0,86	59,95	65,8	48,2	64,7	7	9,6	8,6	230	270	267	182	213	212	79	38,2614	87,8	0,9	26,4	349,0
100	105	103	471	472	468	72,77	43,34	0,86	59,94	58,8	42,6	54,3	9,5	8,7	6,4	204	238	196	215	215	183	63	34,0038	71,6	0,88	26,7	349,1
100	104	101	469	471	468	71,85	43,05	0,86	60,02	58,4	53,9	63,6	7,6	7,9	7,3	273	264	225	186	221	197	78	44,2046	89,7	0,87	26,3	349,4
110	115	113	470	472	471	80,52	45,57	0,87	60,07	56,9	55	51,4	12,9	7,9	7,4	320	280	281	218	181	206	93	39,6178	101,1	0,92	26,3	349,3
91	98	93	472	470	473	65,61	42,16	0,84	60,06	58	52,1	47,3	8,9	7,2	9,4	326	283	302	217	211	181	92	52,1388	105,7	0,87	26,5	348,1
104	108	108	470	470	471	76,08	43,76	0,87	60,08	46,7	45,5	50,5	8,3	9	9,5	270	230	273	190	199	223	80	49,5795	94,1	0,85	26,6	350,5
94	99	98	471	471	469	68,61	41,39	0,86	60,11	60,6	57,1	64	9,6	6,9	9	190	166	204	198	188	221	50	29,6683	58,1	0,86	26,4	348,9
116	118	119	469	470	470	85,25	45,46	0,88	60,07	50,8	50,6	44,1	7,9	9,8	10,7	171	206	192	188	222	197	57	35,3254	67,1	0,85	26,4	352,6
108	114	110	468	469	465	78,62	44,97	0,87	60,09	52	48,8	56	11,4	9,1	6,8	289	355	313	182	220	205	94	45,5263	104,4	0,9	26,4	348,5
106	115	111	469	469	469	77,87	45,66	0,86	60,1	56,1	43,5	78,7	10,3	11,1	7,5	302	315	268	201	222	188	93	39,6178	101,1	0,92	26,6	350,5
103	109	105	468	475	470	74,44	44,86	0,86	60,04	56	71,4	54,9	12,2	9	9,2	264	251	224	215	212	182	72	50,2563	87,8	0,82	26,5	353,0
109	117	112	471	470	469	80,64	46,09	0,87	59,95	58,8	48,7	53,9	8,3	7,3	8,4	214	193	179	223	195	192	57	32,3034	65,5	0,87	26,5	348,4
91	93	92	470	468	469	63,75	40,45	0,84	59,91	49,6	45,3	56	11,2	9,3	9,9	262	216	238	219	183	204	68	34,8374	76,4	0,89	26,3	348,0
105	110	106	470	470	470	76,01	44,59	0,86	59,93	60	46,8	61	10,5	10,4	7,1	291	280	316	204	184	220	99	32,5397	104,2	0,95	26,4	348,4
113	121	118	467	470	471	84,34	47,16	0,87	59,94	64,6	51,1	51	11,9	12,3	8,5	284	313	344	186	194	219	94	40,0438	102,2	0,92	26,0	349,6
99	104	102	473	473	473	72,42	42,77	0,86	59,95	65,8	48,2	64,7	7	9,6	8,6	230	270	267	182	213	212	79	38,2614	87,8	0,9	26,4	349,0
100	105	103	471	472	468	72,77	43,34	0,86	59,94	58,8	42,6	54,3	9,5	8,7	6,4	204	238	196	215	215	183	63	34,0038	71,6	0,88	26,7	349,1
100	104	101	469	471	468	71,85	43,05	0,86	60,02	58,4	53,9	63,6	7,6	7,9	7,3	273	264	225	186	221	197	78	44,2046	89,7	0,87	26,3	349,4
110	115	113	470	472	471	80,52	45,57	0,87	60,07	56,9	55	51,4	12,9	7,9	7,4	320	280	281	218	181	206	93	39,6178	101,1	0,92	26,3	349,3
91	98	93	472	470	473	65,61	42,16	0,84	60,06	58	52,1	47,3	8,9	7,2	9,4	326	283	302	217	211	181	92	52,1388	105,7	0,87	26,5	348,1
104	108	108	470	470	471	76,08	43,76	0,87	60,08	46,7	45,5	50,5	8,3	9	9,5	270	230	273	190	199	223	80	49,5795	94,1	0,85	26,6	350,5
94	99	98	471	471	469	68,61	41,39	0,86	60,11	60,6	57,1	64	9,6	6,9	9	190	166	204	198	188	221	50	29,6683	58,1	0,86	26,4	348,9
116	118	119	469	470	470	85,25	45,46	0,88	60,07	50,8	50,6	44,1	7,9	9,8	10,7	171	206	192	188	222	197	57	35,3254	67,1	0,85	26,4	352,6
108	114	110	468	469	465	78,62	44,97	0,87	60,09	52	48,8	56	11,4	9,1	6,8	289	355	313	182	220	205	94	45,5263	104,4	0,9	26,4	348,5
106	115	111	469	469	469	77,87	45,66	0,86	60,1	56,1	43,5	78,7	10,3	11,1	7,5	302	315	268	201	222	188	93	39,6178	101,1	0,92	26,6	350,5
103	109	105	468	475	470	74,44	44,86	0,86	60,04	56	71,4	54,9	12,2	9	9,2	264	251	224	215	212	182	72	50,2563	87,8	0,82	26,5	353,0
109	117	112	471	470	469	80,64	46,09	0,87	59,95	58,8	48,7	53,9	8,3	7,3	8,4	214	193	179	223	195	192	57	32,3034	65,5	0,87	26,5	348,4
91	93	92	470	468	469	63,75	40,45	0,84	59,91	49,6	45,3	56	11,2	9,3	9,9	262	216	238	219	183	204	68	34,8374	76,4	0,89	26,3	348,0
118	120	116	472	474	471	85,17	46,92	0,87	59,91	40,8	69,3	55,6	8,6	8,9	7,6	299	259	284	220	183	202	88	42,6203	97,8	0,9	26,3	337,6
109	113	110	472	473	471	79,04	45,48	0,87	59,91	62,1	46,9	53,2	9	11,4	8,4	312	283	348	186	200	218	100	56,6726	114,9	0,87	26,3	337,6
109	113																										

Anexos



Medición en la entrada del VFD, realizado con PQM													Medición en la salida del VFD, realizado con Multilin SR-469														
Ia	Ib	Ic	Vab	Vbc	Vca	P	Q	PF	F	THD: Ia	THD: Ib	THD: Ic	THD: Van	THD: Vbn	THD: Vcn	Ia	Ib	Ic	Vab	Vbc	Vca	P	Q	S	FP	F	Flujo mineral
(A)	(A)	(A)	(V)	(V)	(V)	(kW)	(kvar)	()	(Hz)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(A)	(A)	(A)	(V)	(V)	(V)	(kW)	(KVAr)	(KVA)	()	(Hz)	(gpm)
45,26	0,86	60,01	56	49,5	54,9	12,5	8,1	7,3	227	193	187	224	197	193	53	42,5209	67,9	0,78	26,7	350,8							
45,74	0,88	59,95	50,2	43,8	58,9	9,4	9,1	6,3	163	142	145	196	191	222	37	36,6978	52,1	0,71	26,5	349,1							
44,59	0,86	59,93	60	46,8	61	10,5	10,4	7,1	291	280	316	204	184	220	99	32,5397	104,2	0,95	26,4	348,4							
47,16	0,87	59,94	64,6	51,1	51	11,9	12,3	8,5	284	313	344	186	194	219	94	40,0438	102,2	0,92	26,0	349,6							
42,77	0,86	59,95	65,8	48,2	64,7	7	9,6	8,6	230	270	267	182	213	212	79	38,2614	87,8	0,9	26,4	349,0							
43,34	0,86	59,94	58,8	42,6	54,3	9,5	8,7	6,4	204	238	196	215	215	183	63	34,0038	71,6	0,88	26,7	349,1							
43,05	0,86	60,02	58,4	53,9	63,6	7,6	7,9	7,3	273	264	225	186	221	197	78	44,2046	89,7	0,87	26,3	349,4							
45,57	0,87	60,07	56,9	55	51,4	12,9	7,9	7,4	320	280	281	218	181	206	93	39,6178	101,1	0,92	26,3	349,3							
42,16	0,84	60,06	58	52,1	47,3	8,9	7,2	9,4	326	283	302	217	211	181	92	52,1388	105,7	0,87	26,5	348,1							
43,76	0,87	60,08	46,7	45,5	50,5	8,3	9	9,5	270	230	273	190	199	223	80	49,5795	94,1	0,85	26,6	350,5							
41,39	0,86	60,11	60,6	57,1	64	9,6	6,9	9	190	166	204	198	188	221	50	29,6683	58,1	0,86	26,4	348,9							
45,46	0,88	60,07	50,8	50,6	44,1	7,9	9,8	10,7	171	206	192	188	222	197	57	35,3254	67,1	0,85	26,4	352,6							
44,97	0,87	60,09	52	48,8	56	11,4	9,1	6,8	289	355	313	182	220	205	94	45,5263	104,4	0,9	26,4	348,5							
45,66	0,86	60,1	56,1	43,5	78,7	10,3	11,1	7,5	302	315	268	201	222	188	93	39,6178	101,1	0,92	26,6	350,5							
44,86	0,86	60,04	56	71,4	54,9	12,2	9	9,2	264	251	224	215	212	182	72	50,2563	87,8	0,82	26,5	353,0							
46,09	0,87	59,95	58,8	48,7	53,9	8,3	7,3	8,4	214	193	179	223	195	192	57	32,3034	65,5	0,87	26,5	348,4							
40,45	0,84	59,91	49,6	45,3	56	11,2	9,3	9,9	262	216	238	219	183	204	68	34,8374	76,4	0,89	26,3	348,0							
44,59	0,86	59,93	60	46,8	61	10,5	10,4	7,1	291	280	316	204	184	220	99	32,5397	104,2	0,95	26,4	348,4							
47,16	0,87	59,94	64,6	51,1	51	11,9	12,3	8,5	284	313	344	186	194	219	94	40,0438	102,2	0,92	26,0	349,6							
42,77	0,86	59,95	65,8	48,2	64,7	7	9,6	8,6	230	270	267	182	213	212	79	38,2614	87,8	0,9	26,4	349,0							
43,34	0,86	59,94	58,8	42,6	54,3	9,5	8,7	6,4	204	238	196	215	215	183	63	34,0038	71,6	0,88	26,7	349,1							
43,05	0,86	60,02	58,4	53,9	63,6	7,6	7,9	7,3	273	264	225	186	221	197	78	44,2046	89,7	0,87	26,3	349,4							
45,57	0,87	60,07	56,9	55	51,4	12,9	7,9	7,4	320	280	281	218	181	206	93	39,6178	101,1	0,92	26,3	349,3							
42,16	0,84	60,06	58	52,1	47,3	8,9	7,2	9,4	326	283	302	217	211	181	92	52,1388	105,7	0,87	26,5	348,1							
43,76	0,87	60,08	46,7	45,5	50,5	8,3	9	9,5	270	230	273	190	199	223	80	49,5795	94,1	0,85	26,6	350,5							
41,39	0,86	60,11	60,6	57,1	64	9,6	6,9	9	190	166	204	198	188	221	50	29,6683	58,1	0,86	26,4	348,9							
45,46	0,88	60,07	50,8	50,6	44,1	7,9	9,8	10,7	171	206	192	188	222	197	57	35,3254	67,1	0,85	26,4	352,6							
44,97	0,87	60,09	52	48,8	56	11,4	9,1	6,8	289	355	313	182	220	205	94	45,5263	104,4	0,9	26,4	348,5							
45,66	0,86	60,1	56,1	43,5	78,7	10,3	11,1	7,5	302	315	268	201	222	188	93	39,6178	101,1	0,92	26,6	350,5							
44,86	0,86	60,04	56	71,4	54,9	12,2	9	9,2	264	251	224	215	212	182	72	50,2563	87,8	0,82	26,5	353,0							
46,09	0,87	59,95	58,8	48,7	53,9	8,3	7,3	8,4	214	193	179	223	195	192	57	32,3034	65,5	0,87	26,5	348,4							
40,45	0,84	59,91	49,6	45,3	56	11,2	9,3	9,9	262	216	238	219	183	204	68	34,8374	76,4	0,89	26,3	348,0							
46,92	0,87	59,91	40,8	69,3	55,6	8,6	8,9	7,6	299	259	284	220	183	202	88	42,6203	97,8	0,9	26,3	337,6							
45,48	0,87	59,91	62,1	46,9	53,2	9	11,4	8,4	312	283	348	186	200	218	100	56,6726	114,9	0,87	26,3	337,6							
44,6	0,86	59,96	61,3	49,5	49,4	7,8	8,9	8,7	240	240	283	182	213	214	78	52,4163	94,0	0,83	26,5	337,9							
46,84	0,88	60,02	44,2	49,6	45,2	8,4	7,7	8,2	270	222	228	224	191	195	68	42,1426	80,0	0,85	26,5	337,8							
44,07	0,87	60,02	57,9	42,3	75,2	9,5	9,1	7	177	142	153	219	184	210	52	33,5887	61,9	0,84	26,7	337,0							
44,51	0,86	60,09	49,6	56,8	62,8	11	9,3	7,7	289	312	347	182	210	219	104	44,3038	113,0	0,92	26,6	337,4							
39,74	0,84	60,14	50,4	57,4	55,1	9,3	8,8	9,1	289	336	347	184	201	220	96	37,9416	103,2	0,93	26,3	335,0							
45,26	0,87	60,02	49,9	54,7	43,1	12,1	7,7	7,2	243	281	260	201	218	185	81	43,7192	92,0	0,88	26,3	335,3							
41,12	0,85	59,85	53,9	44	60,9	9,5	9,7	7,9	209	241	211	181	212	216	59	41,1823	72,0	0,82	26,5	335,5							
45,98	0,86	59,89	47,9	48,1	56	15	7,8	9,4	153	147	168	183	212	216	41	41,8284	58,6	0,7	26,6	336,5							
43,4	0,86	59,92	57,4	51,6	50	11,7	11,9	8,4	276	328	324	183	224	207	99	47,9479	110,0	0,9	26,7	335,7							
43,88	0,86	59,94	50,8	54,3	45,8	7,9	10,2	7,1	336	284	337	220	186	205	98	47,4636	108,9	0,9	26,6	336,3							
45,83	0,88	59,91	51,5	46,6	47,5	14,6	7,8	8,7	256	232	281	209	181	215	78	35,5378	85,7	0,91	26,3	342,5							
45,09	0,87	60,03	58	52,1	70,9	8,4	10,3	7,7	216	217	241	192	196	223	67	48,5072	82,7	0,81	26,6	337,4							
42,07	0,85	60,1	52,2	60,6	48,1	8,6	7	8,2	158	172	174	183	209	217	82	26,9521	86,3	0,95	26,5	345,1							
41,32	0,85	60,07	52,9	48,9	65,3	6,2	10,1	8,5	268	328	281	207	216	180	94	30,8963	98,9	0,95	26,2	351,3							
42,87	0,86	60,07	53,3	51,7	52,5	7,6	11,1	8,4	299	332	272	199	222	187	93	57,6362	109,4	0,85	26,4	350,4							
45,07	0,86	60,06	50,8	58,7	58,9	12,1	9,2	9,2	288	259	240	222	187	199	82	37,3603	90,1	0,91	26,4	351,1							



Medición en la entrada del VFD, realizado con PQM														Medición en la salida del VFD, realizado con Multilin SR-469													
Ia	Ib	Ic	Vab	Vbc	Vca	P	Q	PF	F	THD: Ia	THD: Ib	THD: Ic	THD: Van	THD: Vbn	THD: Vcn	Ia	Ib	Ic	Vab	Vbc	Vca	P	Q	S	FP	F	Flujo mineral
(A)	(A)	(A)	(V)	(V)	(V)	(kW)	(kvar)	()	(Hz)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(A)	(A)	(A)	(V)	(V)	(V)	(kW)	(KVAr)	(KVA)	()	(Hz)	(gpm)
103	115	107	471	473	472	77,36	45,26	0,86	60,01	56	49,5	54,9	12,5	8,1	7,3	227	193	187	224	197	193	53	42,5209	67,9	0,78	26,7	350,8
105	113	108	473	472	471	77,82	44,07	0,87	60,02	57,9	42,3	75,2	9,5	9,1	7	177	142	153	219	184	210	52	33,5887	61,9	0,84	26,7	337,0
102	109	104	472	473	472	74,78	44,51	0,86	60,09	49,6	56,8	62,8	11	9,3	7,7	289	312	347	182	210	219	104	44,3038	113,0	0,92	26,6	337,4
85	93	89	472	473	471	62,24	39,74	0,84	60,14	50,4	57,4	55,1	9,3	8,8	9,1	289	336	347	184	201	220	96	37,9416	103,2	0,93	26,3	335,0
106	114	112	470	471	470	78,87	45,26	0,87	60,02	49,9	54,7	43,1	12,1	7,7	7,2	243	281	260	201	218	185	81	43,7192	92,0	0,88	26,3	335,3
91	98	94	470	473	470	66,13	41,12	0,85	59,85	53,9	44	60,9	9,5	9,7	7,9	209	241	211	181	212	216	59	41,1823	72,0	0,82	26,5	335,5
103	114	106	472	474	472	76,29	45,98	0,86	59,89	47,9	48,1	56	15	7,8	9,4	153	147	168	183	212	216	41	41,8284	58,6	0,7	26,6	336,5
98	105	104	471	470	472	72,55	43,4	0,86	59,92	57,4	51,6	50	11,7	11,9	8,4	276	328	324	183	224	207	99	47,9479	110,0	0,9	26,7	335,7
105	107	107	472	471	471	75,66	43,88	0,86	59,94	50,8	54,3	45,8	7,9	10,2	7,1	336	284	337	220	186	205	98	47,4636	108,9	0,9	26,6	336,3
113	120	116	471	472	469	84,18	45,83	0,88	59,91	51,5	46,6	47,5	14,6	7,8	8,7	256	232	281	209	181	215	78	35,5378	85,7	0,91	26,3	342,5
109	112	108	469	473	471	78,13	45,09	0,87	60,03	58	52,1	70,9	8,4	10,3	7,7	216	217	241	192	196	223	67	48,5072	82,7	0,81	26,6	337,4
95	100	97	467	470	470	67,68	42,07	0,85	60,1	52,2	60,6	48,1	8,6	7	8,2	158	172	174	183	209	217	82	26,9521	86,3	0,95	26,5	345,1
94	96	96	470	471	471	66,81	41,32	0,85	60,07	52,9	48,9	65,3	6,2	10,1	8,5	268	328	281	207	216	180	94	30,8963	98,9	0,95	26,2	351,3
100	102	100	471	471	469	71,16	42,87	0,86	60,07	53,3	51,7	52,5	7,6	11,1	8,4	299	332	272	199	222	187	93	57,6362	109,4	0,85	26,4	350,4
105	108	108	471	472	470	75,86	45,07	0,86	60,06	50,8	58,7	58,9	12,1	9,2	9,2	288	259	240	222	187	199	82	37,3603	90,1	0,91	26,4	351,1
103	115	107	471	473	472	77,36	45,26	0,86	60,01	56	49,5	54,9	12,5	8,1	7,3	227	193	187	224	197	193	53	42,5209	67,9	0,78	26,7	350,8
111	119	114	471	474	473	82,74	45,74	0,88	59,95	50,2	43,8	58,9	9,4	9,1	6,3	163	142	145	196	191	222	37	36,6978	52,1	0,71	26,5	349,1
105	110	106	470	470	470	76,01	44,59	0,86	59,93	60	46,8	61	10,5	10,4	7,1	291	280	316	204	184	220	99	32,5397	104,2	0,95	26,4	348,4
113	121	118	467	470	471	84,34	47,16	0,87	59,94	64,6	51,1	51	11,9	12,3	8,5	284	313	344	186	194	219	94	40,0438	102,2	0,92	26,0	349,6
99	104	102	473	473	473	72,42	42,77	0,86	59,95	65,8	48,2	64,7	7	9,6	8,6	230	270	267	182	213	212	79	38,2614	87,8	0,9	26,4	349,0
100	105	103	471	472	468	72,77	43,34	0,86	59,94	58,8	42,6	54,3	9,5	8,7	6,4	204	238	196	215	215	183	63	34,0038	71,6	0,88	26,7	349,1
100	104	101	469	471	468	71,85	43,05	0,86	60,02	58,4	53,9	63,6	7,6	7,9	7,3	273	264	225	186	221	197	78	44,2046	89,7	0,87	26,3	349,4
110	115	113	470	472	471	80,52	45,57	0,87	60,07	56,9	55	51,4	12,9	7,9	7,4	320	280	281	218	181	206	93	39,6178	101,1	0,92	26,3	349,3
91	98	93	472	470	473	65,61	42,16	0,84	60,06	58	52,1	47,3	8,9	7,2	9,4	326	283	302	217	211	181	92	52,1388	105,7	0,87	26,5	348,1
104	108	108	470	470	471	76,08	43,76	0,87	60,08	46,7	45,5	50,5	8,3	9	9,5	270	230	273	190	199	223	80	49,5795	94,1	0,85	26,6	350,5
94	99	98	471	471	469	68,61	41,39	0,86	60,11	60,6	57,1	64	9,6	6,9	9	190	166	204	198	188	221	50	29,6683	58,1	0,86	26,4	348,9
116	118	119	469	470	470	85,25	45,46	0,88	60,07	50,8	50,6	44,1	7,9	9,8	10,7	171	206	192	188	222	197	57	35,3254	67,1	0,85	26,4	352,6
108	114	110	468	469	465	78,62	44,97	0,87	60,09	52	48,8	56	11,4	9,1	6,8	289	355	313	182	220	205	94	45,5263	104,4	0,9	26,4	348,5
106	115	111	469	469	469	77,87	45,66	0,86	60,1	56,1	43,5	78,7	10,3	11,1	7,5	302	315	268	201	222	188	93	39,6178	101,1	0,92	26,6	350,5
103	109	105	468	475	470	74,44	44,86	0,86	60,04	56	71,4	54,9	12,2	9	9,2	264	251	224	215	212	182	72	50,2563	87,8	0,82	26,5	353,0
109	117	112	471	470	469	80,64	46,09	0,87	59,95	58,8	48,7	53,9	8,3	7,3	8,4	214	193	179	223	195	192	57	32,3034	65,5	0,87	26,5	348,4
91	93	92	470	468	469	63,75	40,45	0,84	59,91	49,6	45,3	56	11,2	9,3	9,9	262	216	238	219	183	204	68	34,8374	76,4	0,89	26,3	348,0
118	120	116	472	474	471	85,17	46,92	0,87	59,91	40,8	69,3	55,6	8,6	8,9	7,6	299	259	284	220	183	202	88	42,6203	97,8	0,9	26,3	337,6
109	113	110	472	473	471	79,04	45,48	0,87	59,91	62,1	46,9	53,2	9	11,4	8,4	312	283	348	186	200	218	100	56,6726	114,9	0,87	26,3	337,6
107	109	104	476	476	472	76,36	44,6	0,86	59,96	61,3	49,5	49,4	7,8	8,9	8,7	240	240	283	182	213	214	78	52,4163	94,0	0,83	26,5	337,9
115	123	120	472	473	471	86,63	46,84	0,88	60,02	44,2	49,6	45,2	8,4	7,7	8,2	270	222	228	224	191	195	68	42,1426	80,0	0,85	26,5	337,8
105	113	108	473	472	471	77,82	44,07	0,87	60,02	57,9	42,3	75,2	9,5	9,1	7	177	142	153	219	184	210	52	33,5887	61,9	0,84	26,7	337,0
102	109	104	472	473	472	74,78	44,51	0,86	60,09	49,6	56,8	62,8	11	9,3	7,7	289	312	347	182	210	219	104	44,3038	113,0	0,92	26,6	337,4
85	93	89	472	473	471	62,24	39,74	0,84	60,14	50,4	57,4	55,1	9,3	8,8	9,1	289	336	347	184	201	220	96	37,9416	103,2	0,93	26,3	335,0
106	114	112	470	471	470	78,87	45,26	0,87	60,02	49,9	54,7	43,1	12,1	7,7	7,2	243	281	260	201	218	185	81	43,7192	92,0	0,88	26,3	335,3
91	98	94	470	473	470	66,13	41,12	0,85	59,85	53,9	44	60,9	9,5	9,7	7,9	209	241	211	181	212	216	59	41,1823	72,0	0,82	26,5	335,5
103	114	106	472	474	472	76,29	45,98	0,86	59,89	47,9	48,1	56	15	7,8	9,4	153	147	168	183	212	216	41	41,8284	58,6	0,7	26,6	336,5
98	105	104	471	470	472	72,55	43,4	0,86	59,92	57,4	51,6	50	11,7	11,9	8,4	276	328	324	183	224	207	99	47,9479	110,0	0,9	26,7	335,7
105	107	107	472	471	471	75,66	43,88	0,86	59,94	50,8	54,3	45,8	7,9	10,2	7,1	336	284	337	220	186	205	98	47,4636	108,9	0,9	26,6	336,3
113	120	116	471	472	469	84,18	45,83	0,88	59,91	51,5	46,6	47,5	14,6	7,8	8,7	256	232	281	209	181	215	78	35,5378	85,7	0,91	26,3	342,5
109	112	108	469	473	471	78,13	45,09	0,87	60,03	58	52,1	70,9	8,4	10,3	7,7	216	217	241	192	196	223	67	48,5072	82,7	0,81	26,6	337,4
95	100	97	467	470	470	67,68	42,07	0,85	60,1	52,2	60,6	48,1	8,6	7	8,2	158	172	174	183	209	217	82	26,9521	86,3	0,95	26,5	345,1
94	96	96	470	471	471	66,81	41,32	0,85	60,07	52,9	48,9	65,3	6,2	10,1	8,5	268	328	281	207	216	180	94	30,8963	98,9	0,95	26,2	351,3
100	102</																										



Anexo 2: Precio del filtro de armónico propuesto.



GE Tranquell Surge Arrester 9L15ECC001 650V 3P 9L15ECC-001 3 Pole

Item Used
condition: | Add to W

Quantity: 7 available

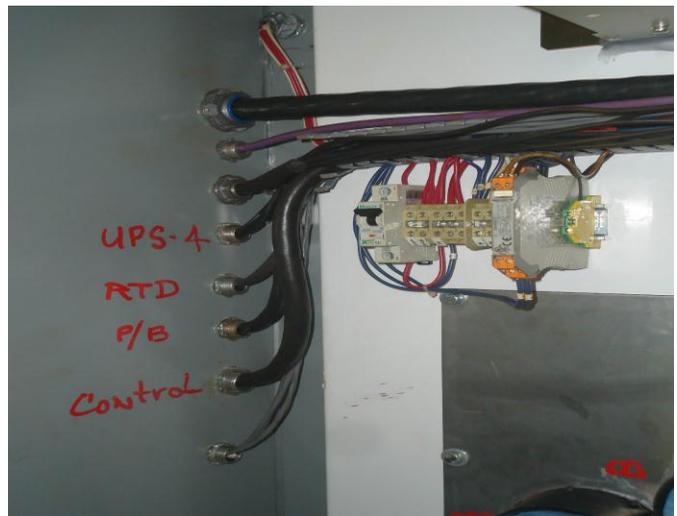
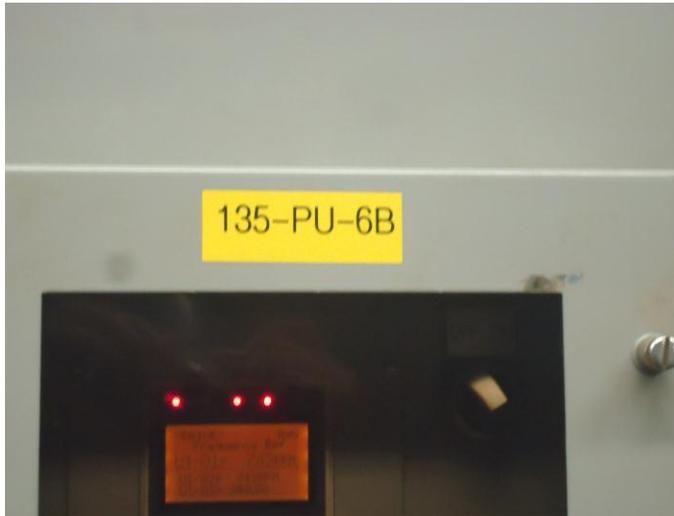
Price: US \$18.00

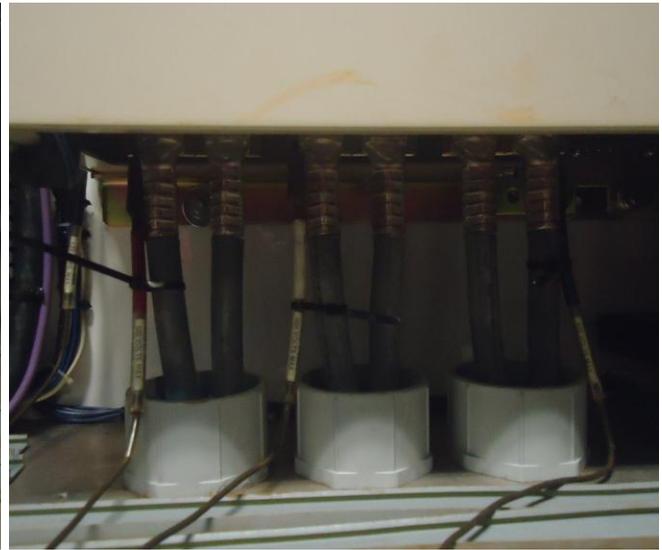
Seller information
southbendindustrial (38363) 
99,8% Positive feedback

[Save this seller](#)
[See other items](#)
Visit store: [southbendindustrial](#)

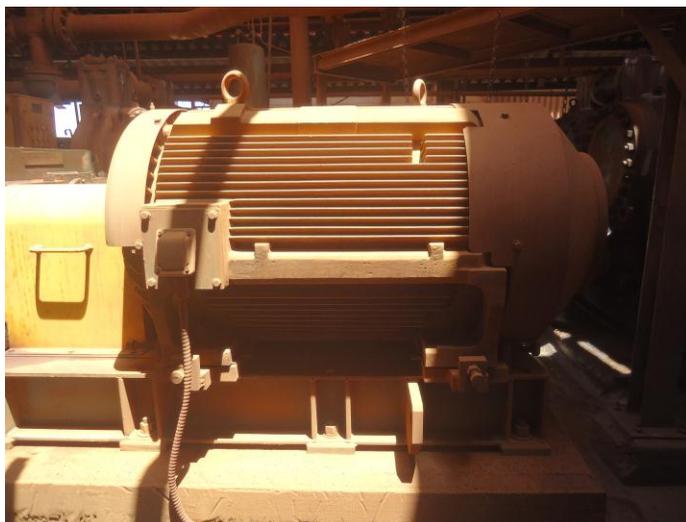
Anexo 3: Fotografías realizadas al accionamiento de la bomba 135-PU-16B durante la investigación.











Anexo 4: Descripción del proceso tecnológico de la Empresa “Cmte. Pedro Soto Alba”.

En el proceso general de la fábrica intervienen las plantas que le dan tratamiento directo al mineral y las que producen ciertas materias primas, cada una de estas plantas poseen funciones específicas que en un orden cronológico de producción son:

➤ **PLANTA DE PREPARACIÓN DE PULPA:**

Su función es separar el material serpentinitico del Limonítico, el mineral minado es beneficiado mediante un proceso de preparación mecánica, hasta obtener la máxima recuperación de las partículas de limonita de un tamaño menor a 0.84 mm, con un 25-30 % de sólido que constituye la pulpa producto la cual es enviada a la planta de Espesadores para su posterior procesamiento.

➤ **PLANTA DE ESPESADORES DE PULPA:**

Esta planta tiene como objetivo preparar una pulpa espesada de 45 a 48 % de sólido a partir de una pulpa con 25 % de sólido procedente de la planta de preparación de pulpa y a la vez asegurar una alimentación estable a la planta de lixiviación.

➤ **PLANTA DE LIXIVIACIÓN:**

En esta planta comienza el proceso metalúrgico del mineral laterítico después de haber recibido el tratamiento físico en las plantas de Pulpa y Espesadores. La planta de lixiviación como su propio nombre lo indica es la encargada de lixiviar la pulpa por medio de un agente químico, que en este caso es el ácido sulfúrico (H_2SO_4), donde se efectúa la disolución de los óxidos de níquel y cobalto fundamentalmente, es decir donde se separan de los demás elementos que componen el mineral con vista a la extracción del níquel y cobalto en forma de sulfatos. Este proceso se efectúa bajo



condiciones específicas y apropiadas de operación como son: temperatura, presión y otros factores que influyen y que determinan en este proceso, los cuales son llevados a cabo en un sistema de reactores.

➤ **PLANTA DE LAVADERO:**

Su función es lavar la pulpa lixiviada y obtener un licor rico en níquel y cobalto separando las colas de hierro. La pulpa lixiviada se somete a un lavado con agua cruda a contracorriente por decantación en el que participan siete sedimentadores, en los cuales se lleva a cabo la operación ayudados por bombas centrífugas que extraen el producto espesado de un tanque y lo depositan en el reboso del otro del tanque 1 al tanque 7 sucesivamente. Otras extraen el líquido de un sedimentador y lo bombean al reboso del otro, así ocurre desde el tanque 7 al tanque 1 hasta obtener un licor crudo el cual es bombeado hacia la planta de neutralización.

➤ **PLANTA DE NEUTRALIZACION:**

Esta planta tiene como objetivo principal el acondicionamiento del licor rico en níquel y cobalto para la realización óptima del proceso de precipitación de los sulfuros, lo cual se logra mediante la reducción del hierro y el cromo, la reacción de neutralización del ácido libre y la precipitación del cobre. La reacción de neutralización consiste en bajar este grado de acidez, para ello se le añade al licor una sustancia básica: el carbonato de calcio, que al reaccionar en un sistema de cuatro reactores, el pH queda en 2.4 - 2.6 que es el ideal para que precipiten los sulfatos de níquel y cobalto en los autoclaves de sulfuros.

➤ **PLANTA DE PRECIPITACION DE SULFURO:**

Su principal operación tecnológica consiste en la precipitación de los metales en forma de sulfuros con el objetivo de extraer selectivamente el níquel y el cobalto de la solución y separarlo de las impurezas. Este proceso se lleva a cabo utilizando ácido sulfhídrico (H_2S) como agente precipitador, la precipitación ocurre en condiciones apropiadas de temperatura, presión y concentración de ácido sulfhídrico (H_2S) en los autoclaves de los sulfatos de níquel y cobalto contenidos en el licor producto proveniente de la planta de neutralización.

➤ **PLANTA DE SECADO Y DERRETIMIENTO DE AZUFRE:**

Es la encargada de recibir los sulfuros de níquel y cobalto, secarlos y embazarlos para su exportación. La segunda planta tiene como objetivo, derretir el azufre y bombearlo hacia la planta de ácido y H_2S para la producción de ácido sulfúrico y sulfhídrico respectivamente.



➤ PLANTA AUXILIARES DE PROCESO:

❖ Planta termoeléctrica:

Su función es suministrar de forma segura, estable y con calidad ciertos servicios auxiliares a la producción de la empresa, como son: Energía eléctrica para todas las necesidades de la fábrica, vapor de agua a diferentes presiones (650 PSI, 15 PSI, 85 PSI y de 15 PSI), aire comprimido y secado a 120 PSI de presión, para los instrumentos de todas las plantas, así como aire de servicio a 120 PSI de presión para los trabajos de mantenimientos en las distintas áreas, garantizar el suministro y tratamiento del agua utilizada por la empresa (Doméstica, Desmineralizada, de Enfriamiento y de Proceso).

❖ Planta Ácido:

Su objetivo es producir ácido sulfúrico de 98% de pureza a partir del azufre, este ácido es consumido en el proceso de lixiviación. el azufre es previamente quemado en un horno a una temperatura de 820°C a 920°C, para la formación del SO₂ en presencia de oxígeno, luego el SO₂ es convertido en SO₃ en presencia de masas catalizadoras de pentóxido de vanadio la cual aceleran la velocidad de reacción química, el SO₃ es enviado a las torres de absorción cuya función es absorber el mismo y convertirlo mediante su reacción con el agua en ácido sulfúrico de 98% de pureza , el que luego es enfriado y almacenado en tanques para su posterior consumo.

❖ Planta de Hidrogeno:

Tiene la función de producir el hidrógeno de 98% de pureza a partir de la mezcla L.P.G (propano - butano), para la obtención del ácido sulfhídrico H₂S. La formación del hidrógeno comienza en los hornos reformadores en el que se hace pasar L.P.G mezclado con el vapor de agua de 85 lb/pulg² de presión sobrecalentado, esta mezcla al hacer contacto con una temperatura de aproximadamente 920°C produce la formación del gas CO el que luego es enfriado hasta 400°C y más tarde convertido en CO₂ e hidrógeno gaseoso el que posteriormente sería enfriado hasta 40°C y separado el agua que pueda haberse condensado producto del enfriamiento. El CO₂ es absorbido y el hidrógeno libre (98%) es extraído mediante compresores.

❖ Planta de H₂S:

Tiene la función de combinar el azufre líquido con el hidrógeno gaseoso y formar un nuevo gas: el ácido sulfhídrico, el que será utilizado en la planta de precipitación de sulfuros y neutralización. El azufre líquido se filtra en forma de lluvia por la parte superior del reactor a una temperatura de



aproximadamente 150°C y el hidrogeno se inyecta a temperatura ambiente por la parte inferior del reactor. Al hacer contacto el azufre con el hidrógeno se forma el gas H_2S , el que luego es enfriado. El azufre que no reaccionó fluye por el fondo del reactor hacia las bombas de recirculación.