



ISMMM

INSTITUTO SUPERIOR DE
DR. ANTONIO NUÑEZ

Ingeniería Eléctrica
Facultad: Metalurgia
Electromecánica

Trabajo de Diploma
En opción al Título de
Ingeniero Eléctrico

**Análisis de la Eficiencia Energética de los
Accionamientos de Bombeo de la Planta de
Neutralización de la empresa Pedro Sotto Alba.**

Autor: Yurileidy Ochoa González.

Tutores: M. Sc. Gabriel Hernández Ramírez.

Moa, Holguín
Junio del 2014
“Año 56 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 2014.

Yurileidy Ochoa González

Firma Autor

M. Sc. Gabriel Hernández Ramírez.

Firma Tutor



Resumen

En este trabajo se presentan 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. Se determinó el comportamiento de las principales variables eléctricas para diferentes flujos de la planta, obteniéndose el punto de operación para una eficiencia del 78 %. Se propone un control difuso para mejorar la eficiencia del accionamiento con su respectivas simulaciones en el software Simulink/MATLAB.



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.

Índice de contenido

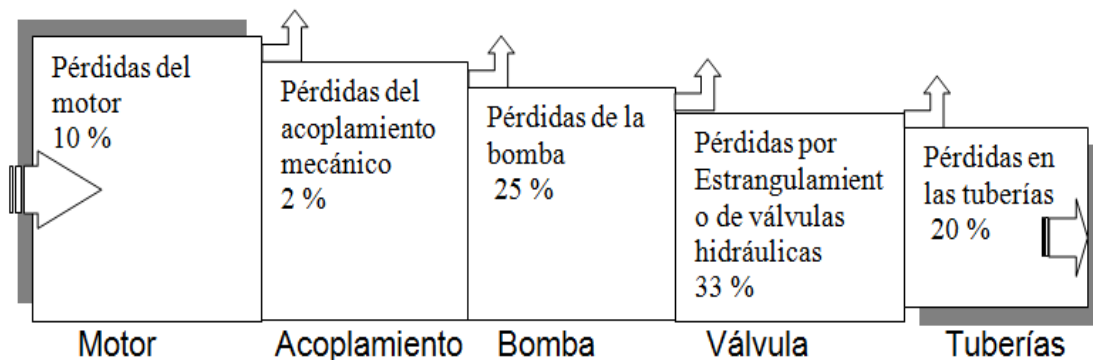
Declaración de Autoría	
Pensamiento	
Dedicatoria	¡Error! Marcador no definido.
Agradecimientos	
Resumen	
Introducción	6
Capítulo I: Fundamentación Teórica	11
1.1 Introducción	11
1.2 Estado del arte.	11
1.3 Base teórico de la investigación	13
1.4 Conclusiones	24
Capítulo II: Métodos y Materiales.....	25
2.1 Introducción	25
2.2 Descripción del Proceso Tecnológico y eléctrico.	25
2.3 Caracterización y análisis del accionamiento eléctrico de la bomba.	33
2.4 Características de los variadores de velocidad YASKAWA F7.	36
2.5 Descripción del monitoreo a través de PQM portátil.	40
2.6 Resultados de las mediciones realizadas.	42
2.7 Conclusiones	44
Capítulo III: Análisis de resultado de la evaluación de la eficiencia en un sistema .	45
3.1 Introducción	45
3.2. Propuestas para mejorar la eficiencia en el accionamiento de la bomba.	45
3.2. Estimador de la eficiencia para la planta de Neutralización	48
3.4 Valoración económica del trabajo	51
3.5 Conclusiones	54
Conclusiones Generales	55
Recomendaciones	55
Bibliografía	57
Anexos.....	63



Introducción

La problemática del uso racional de la energía en el contexto actual continúa ocupando un lugar prioritario en las investigaciones científicas a nivel mundial, debido a los precios crecientes y a la exigencia de ahorro de energía como vía hacia el desarrollo sustentable, el valor de la eficiencia energética juega un papel fundamental, principio tecnológico esencial para lograr el desarrollo tecnológico, en Cuba cobra mayor significado por lo limitado de sus recursos energéticos y en la industria cubana del níquel inmersa en un creciente y constante ascenso en sus producciones, demanda cada vez más un apreciable consumo de energía cuyos portadores deciden la rentabilidad de sus empresas aspectos recogidos en los lineamientos de la política económica y social del VI Congreso del Partido Comunista de Cuba. Se requiere que paralelamente al crecimiento progresivo se perfeccionen los parámetros y regímenes de trabajo de las instalaciones tecnológicas para explotar de una forma más racional y eficiente las grandes reservas de recursos minerales existentes en los yacimientos niquelíferos en la parte oriental de Cuba y se perfeccionen el: diseño, la contratación y puesta en marcha, la explotación y mantenimiento de las tecnologías que se transfieren o crear en Cuba de manera que sean adecuadamente eficaces y eficientes, lo que garantizará la existencia de un proceso productivo continuo. Los sistemas de transporte de fluidos son consumidores de una parte importante de la energía utilizada con fines productivos en cualquier industria de procesos, si tomamos en cuenta, que más del 60 % de la energía total que se consume es a costa de los accionamientos eléctricos con motores de inducción, y de estos más del 55 % lo constituyen los accionamientos de bombas; se estima además que más del 20 % de la energía que se puede ahorrar está asociada con el mejoramiento del rendimiento en los motores y los subsistemas mecánicos[Rojas 2006], entonces tiene importancia atender cualquier medida que técnicamente se justifique y contribuya a mejorar los índices de rendimientos de estos sistemas.

Una idea integral con la apreciación que se tiene en términos de rendimiento de un accionamiento de bombas, siendo este muy típico en cualquier instalación industrial se muestra a continuación. Pérdidas del motor. Pérdidas del acoplamiento mecánico 2% Pérdidas de la bomba 25%. Pérdida por estrangulamiento de válvulas hidráulicas 33%. Pérdidas en las tuberías 20% [Mestizo 1994].



Para la detección de sobreconsumo energético de los sistemas de transporte industrial de fluidos es básica la obtención del punto de funcionamiento del sistema que está dado por la intercepción entre las características de carga-capacidad de los equipos de bombeo y los de resistencia hidráulica-capacidad del sistema de tuberías; de donde puede obtenerse el flujo, la potencia y la eficiencia de operación de los equipos de bombeo, los flujos por cada ramificación del sistema, las pérdidas hidráulicas en cada tubería y la energía del fluido en las secciones características. Siendo los sistemas de transporte de fluidos un eslabón que media entre un sinnúmero de operaciones básicas en toda industria de procesos, resulta sin dudas limitado cualquier análisis global que se desee efectuar del proceso industrial que no incluya las operaciones de transporte. Durante el proceso las características del fluido y de los sistemas pueden variar como en el complejo tecnológico de la industria niquelífera cubana, las empresas Ernesto Che Guevara realiza la producción de Níquel más Cobalto por el proceso Carbonato Amoniacal (**CARON**) y en la Empresa Cubano



Canadiense “Comandante Pedro Sotto Alba - Moa Nickel S.A.”(ECPSA) con tecnología de lixiviación ácida a presión y una alta eficiencia de extracción de sulfuros de níquel y cobalto.

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 inestable eficiencia debido a problemas técnicos y operacionales que conducen a la baja productividad y el incremento en el consumo energético dado por el desconocimiento de las propiedades de las pulpa e ineficiencia del accionamiento eléctrico de las bombas encargadas del transporte para las condiciones de explotación en la Empresa Cmdte Pedro Sotto Alba de Moa, así como la variabilidad de la carga mecánica que representan estos accionamientos industriales.



Problema de la investigación:

Inexistencia de una metodología para evaluar la eficiencia energética en los accionamientos de bombas cuando operan carga mecánica variable.

Campo de acción:

Reducción del consumo energético en accionamientos de bombas.

Objeto de Estudio:

Accionamiento eléctrico con bombas en la planta de Neutralización.

Objetivo del trabajo:

Evaluar la eficiencia energética en los accionamientos de bombas para el transporte de la planta.

Objetivos Específicos:

1. Caracterizar el flujo tecnológico y suministro eléctrico de la planta.
2. Caracterizar el sistema de bombeo y de la red de la planta.
3. Obtener base de datos (mediciones).
4. Proponer variante técnica-organizativa para la disminución del consumo energético de la planta.

Hipótesis:

Si se logra determinar la caracterización reológica de la pulpa transportada y su influencia en el rendimiento de los accionamientos de bombas, se podrá proponer un procedimiento para la disminución del consumo energético en este tipo de accionamiento.

En el desarrollo de la investigación se aplican los siguientes **métodos**:

El método documental y bibliográfico para fundamentar históricamente el problema, sus antecedentes, científicidad, novedad, justificación, así como la lógica objetiva de su evolución. etc.



El método análisis y síntesis: para analizar y sintetizar toda la información obtenida en el proceso de investigación.

Entrevistas con especialistas para profundizar en el tratamiento del problema.



Capítulo I: Fundamentación Teórica



1.1 Introducción

El objetivo del presente capítulo es establecer el Marco Teórico-Metodológico de la investigación, a partir del estado del arte del tema basado en el análisis de los trabajos precedentes, la metodología seguida para su ejecución así como la base teórica que sustenta la investigación y una caracterización integral del estado actual del objeto de estudio

1.2 Estado del arte.

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 en base a un analizador óptimo de energía que opera mediante el manejo escalar del accionamiento [5]. 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 P. Van Roy, B. Slaets y Ronnie Belmans, en ICEM-2000, en cuanto a detectar el grado de imprecisiones que contienen las diferentes normas (IEC, IEEE, NEMA, JEC) para establecer standards de rendimientos. Ellos concluyen que para motores de una misma capacidad y tipo, 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.

Características de operación del motor de inducción

Son los de mayor uso en la industria, por lo tanto son los de mayor análisis. Cuando aplicamos una corriente alterna a un estator, se produce un campo magnético giratorio, este campo de acuerdo a las leyes de inducción electromagnéticas, induce corriente en las bobinas del rotor y estas producen otro campo magnético opuesto según la ley de Lenz y que por lo mismo tiende a seguirlo en su rotación de tal forma que el rotor empieza a girar con tendencia a igualar la velocidad del campo magnético giratorio, sin que ello llegue a producirse. Si sucediera, dejaría de producirse la variación de flujo indispensable para la inducción de corriente en la bobina del inducido. A medida que se vaya haciéndose mayor la diferencia entre la velocidad de giro del campo y la del rotor, las corrientes inducidas en él y por lo tanto su propio campo, irán en aumento gracias a la composición de ambos campos se consigue una velocidad estacionaria. En los motores asincrónicos nunca se alcanza la velocidad del sincronismo, los bobinados del rotor cortan siempre el flujo giratorio del campo inductor.

Eficiencia en los motores eléctricos

Los métodos para determinar la eficiencia son: Por medición directa o por pérdidas segregadas. Estos métodos están expuestos en el Standard Test Procedure for Polyphase Induction Motors and Generators, Std 112-1978, ANSI/IEEE; en el Standard Test Code for DC Machines, Std 113-1973, IEEE; en el Test Procedure for Single-Phase Induction Motors, Std 114-1982, ANSI/IEEE y en el Test Procedure for Synchronous Machines, Std 115-1965,

- IEEE. Las mediciones directas pueden hacerse usando motores, generadores o dinamómetros calibrados para la entrada a generadores y salida de motores y, motores eléctricos de precisión para la entrada a motores y salida de generadores. Las pérdidas segregadas en los motores se clasifican como sigue:
- Pérdidas $I^2 \cdot R$ en el estator (Campo en derivación y en serie $I^2 \cdot R$ para corriente continua).



- Pérdidas $I^2 \cdot R$ en el rotor ($I^2 \cdot R$ en la armadura, para corriente continua).
- Pérdidas en el núcleo.
- Pérdidas por cargas parásitas.
- Pérdidas por fricción y acción del viento.
- Pérdidas en el contacto de las escobillas (Rotor devanado y corriente continua).
- Pérdidas en el excitador (Sincrónico y corriente directa).
- Pérdidas por ventilación (Corriente directa).

Las pérdidas se calculan en forma separadas y luego se totalizan.

Donde:

Pe: Potencia entregada.

P: Potencia absorbida.

R: Rendimiento.

φ : Angulo del factor de potencia.

1.3 Base teórico de la investigación

El estudio consiste en utilizar el modelo del motor de inducción (MI) y las relaciones más relevantes en el funcionamiento de la bomba centrífuga (BC), para demostrar una de las vías de mejorar la eficiencia del accionamiento eléctrico por el control de variadores de velocidad que adapta la potencia de entrada del sistema a la carga mecánica exigida por la bomba centrífuga en su transporte eficiente de hidromezclas de mineral laterítico.

Para esto buscamos el vínculo entre la potencia eléctrica de entrada del accionamiento, su desarrollo como potencia electromagnética en los devanados del motor, hasta que es convertida en forma de potencia mecánica rotacional en el eje de la bomba centrífuga. Se muestra en la figura 1.1.

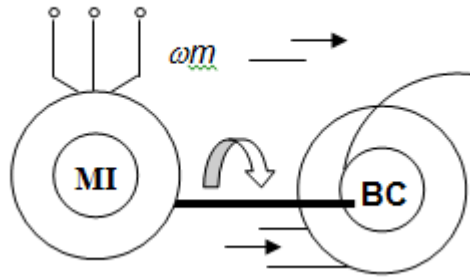


Figura 1.1 Grupo Motor de inducción (MI) con Bomba Centrífuga (BC)

La transferencia de potencia electromagnética en mecánica rotacional está asociada con las componentes activas y reactivas de la potencia desarrollada por el motor de inducción MI.

La componente activa de la potencia eléctrica que se convierte en trabajo útil (dado en W ó kW) está determinada por:

$$P_{MI} = \sqrt{3} \cdot U \cdot I \cos \varphi \quad (1.1)$$

Donde:

U es la tensión de alimentación de línea del motor de inducción, [V]

I es la corriente de alimentación de línea del motor de inducción, [A]

$\cos \varphi$ es el factor de potencia del motor de inducción.

φ es el ángulo de desfase entre la tensión y la corriente, [°]

y la potencia reactiva (dada en Var o kVar) es la encargada de intercambiar la energía electromagnética que se produce en la máquina de inducción con la fuente: el inversor sinusoidal de tensión por modulación de anchos de pulsos (VSI a PWM: siglas en inglés) y crea el campo magnético rotacional que gira de acuerdo a la frecuencia de la corriente de alimentación del motor (MI) y viene dada como:

$$Q_{MI} = \sqrt{3} \cdot U \cdot I \cdot \sin \varphi \quad (1.2)$$

Y partiendo que la eficiencia del motor de inducción está definida como la relación entre la potencia de salida P_s y la potencia de entrada P_e :

$$\eta_{MI} = \frac{P_s}{P_e} = \frac{P_s}{P_s + \Delta p} = \frac{P_e - \Delta p}{P_e} \quad (1.3)$$

Donde:

P_s – es la potencia de salida en el árbol del motor de inducción, [kW].

P_e – es la potencia eléctrica de entrada del motor de inducción, [kW].

Δp – son las pérdidas totales en el motor de inducción, [kW].

Las pérdidas totales Δp del motor de inducción están determinadas principalmente por:

$$\Delta p = \Delta p_{cus} + \Delta p_{cur} + \Delta p_{ac} + \Delta p_{mec} + \Delta p_{ad} \quad (1.4)$$

Δp_{cus} - son las pérdidas del cobre en el devanado del estator del motor, [kW].

Δp_{cur} - son las pérdidas del cobre en el devanado del rotor del motor, [kW].

Δp_{ac} – son las pérdidas del acero en el núcleo del motor de inducción, [kW].

Δp_{mec} - son las pérdidas mecánicas del motor de inducción, [kW].

Δp_{ad} - son las pérdidas adicionales en el motor de inducción, [kW].

La potencia electromagnética P_{em} y también llamada potencia en el entrehierro PAG es la encargada de enlazar, la potencia eléctrica de entrada del motor P_e con la potencia mecánica rotacional de salida P_s que se manifiesta en el eje de la bomba centrífuga, teniendo en cuenta las pérdidas Δp que va teniendo a través de las principales partes de la máquina eléctrica.

Desde la potencia electromagnética se genera el momento electromagnético M_{em} a una frecuencia angular sincrónica ω_s que entrega la potencia convertida P_{conv} en el árbol del motor con la frecuencia angular de rotación del rotor ω_r [Chapman, 2003], tal como se indica en la expresión (1.5):

$$M_{em} = \frac{P_{em}}{\omega_s} = \frac{P_{conv}}{\omega_r} = \frac{P_{AG}}{\omega_s} \quad (1.5)$$

Donde:

M_{em} es el momento electromagnético del motor de inducción, [N.m]

P_{conv} es la potencia convertida por el motor existente en su árbol, [kW]

ω_r es la frecuencia angular de rotación del rotor, [rad/s]

ω_s es la frecuencia angular sincrónica del motor, [rad/s]

P_{AG} – es la potencia del entrehierro del motor, [kW]

La potencia del entrehierro P_{AG} es la que se transfiere del circuito del estator al circuito del rotor y es igual a la potencia que se disipa en la componente R_r/s en el conocido circuito equivalente por fase del motor de inducción (figura 1.2).

$$P_{AG} = I_r^2 \cdot \frac{R_r}{s} \quad (1.6)$$

Donde:

s – es el deslizamiento del motor de inducción, [%].

I_r – es la corriente del rotor del motor de inducción, [A].

R_r – es la resistencia óhmica de los devanados del rotor, [ohm]

Y la potencia del entrehierro total será:

$$P_{AG} = 3 \cdot I_r^2 \cdot \frac{R_r}{s} \quad (1.7)$$

Que para regiones de bajos deslizamientos, esta potencia del entrehierro puede ser escrita en función de la tensión aplicada en los terminales del motor como:

$$P_{AG} = 3.s.\frac{U^2}{R_r} \quad (1.8)$$

Y el par producido por el motor se convierte en:

$$M_{em} = 3.s.\frac{U^2}{R_r.\omega_s} = 3.\frac{I_r^2.R_r}{\omega_s}.\left(\frac{1-s}{s}\right) \quad (1.9)$$

Y este par electromagnético, para condiciones de estado estacionario, se corresponde con el par resistivo de la carga mecánica M_c desarrollada por la bomba centrífuga, y está relacionado con la potencia de salida P_s

por la expresión (1.10):

$$P_s = M_c.\omega_r \quad (1.10)$$

El momento electromagnético tiene componentes activa y de magnetización por el lado de la corriente, que de acuerdo con [Cеровski y Javurek, 1997] se escribe como la expresión (1.11):

$$M_{em} = p.\frac{m_1}{2}.\frac{L_m}{L_r}.\psi_r.I_M \quad (1.11)$$

Siendo:

p – es el número par de polos del motor.

m_1 – es el número de fases del motor.

L_m – es la inductancia mutua del motor, [mH].

L_r – es la inductancia del rotor, [mH].

Ψ_r – es el flujo magnético del rotor, [Wb]

I_M – es la componente activa de la corriente del torque electromagnético del

Motor, [A].

El módulo de la corriente del estator está dado como:

$$I = \sqrt{(I_M)^2 + (I_{mag})^2} \quad (1.12)$$

Donde:

I_{mag} – es la corriente de magnetización del torque electromagnético, [A]

En la expresión (1.11) el torque electromagnético está en función del flujo del rotor Ψ_r , el cual está determinado por la corriente de magnetización I_{mag} , como (1.13):

$$\psi_r = I_{mag} \cdot L_m \quad (1.13)$$

Y de esta forma podemos controlar el torque electromagnético desarrollado por el motor de inducción a través del flujo magnético del rotor Ψ_r con un comando que maneje el módulo de la corriente de magnetización I_{mag} de la máquina; o mediante la tensión aplicada en los terminales de alimentación del motor de inducción, de acuerdo a la expresión (1.14) ofrecida por [Romero, 2000].

$$\psi_r = \frac{U}{\omega_s} \quad (1.14)$$

Es decir, con el manejo de estas variables se puede ir adecuando la potencia del entrehierro de la máquina de tal forma que sean menores sus pérdidas. Las pérdidas del acero del motor Δp_{ac} están determinadas por (1.15):

$$\Delta p_{ac} = 3 \cdot \frac{E_1^2}{R_{mag}} \quad (1.15)$$

Donde:

E_1 – es la f.e.m. de respuesta del motor a la tensión aplicada, [V].

R_{mag} – es la resistencia magnética del circuito magnético del motor, [ohm].

Siguiendo las expresiones (1.13), (1.14) y (1.15); con cambios en la corriente de magnetización I_{mag} , esencialmente porque variando la frecuencia del motor se modifica su reactancia de magnetización X_m , y entonces varía la f.e.m. E_1 de la máquina, pudiéndose disminuir así las pérdidas en el acero Δpac .

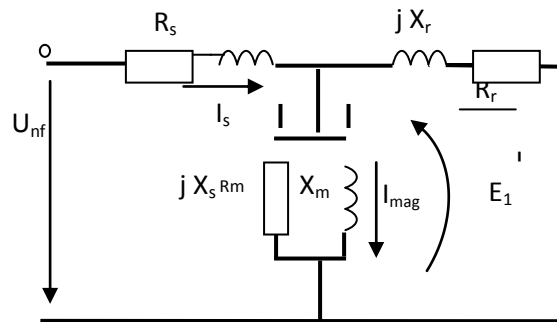


Figura 1.2 Circuito equivalente simplificado del motor de inducción.

Con el uso del circuito equivalente simplificado del motor de inducción (fig 1.2), y a partir del cálculo de sus parámetros por datos de catálogo del motor [Costa Montiel y otros, 2004], se pueden evaluar las pérdidas.

Por otra parte, como el motor de inducción es alimentado a través de la fuente inversora de tensión sinusoidal (VSI a PWM), la cual opera con los comandos elaborados desde el modelo de la Teoría de Campo Orientado (TCO) del motor, dado por sus componentes en los ejes de cuadraturas dd-qq, es conveniente explicar sus expresiones.

Para el control de las pérdidas del motor es de interés un esquema de control indirecto vectorial con el flujo del rotor orientado en su eje directo dd, tomando como referencia el sistema de coordenadas que gira a la velocidad angular sincrónica del campo del estator ω_e .

Las relaciones entre las corrientes y tensiones en los ejes dd-qq con sus componentes están definidas por las expresiones [Bose, Pestel y Kaushik1997] (1.16) y (1.17):

$$\sigma L_s \frac{di_{ds}}{dt} = -R_s i_{ds} + \omega_e \sigma L_s i_{qs} + U_{ds} \quad (1.16)$$

$$\sigma L_s \frac{di_{qs}}{dt} = -R_s i_{qs} - \omega_e \sigma L_s i_{ds} - \omega_e \frac{L_m}{L_r} \psi_{dr} + U_{qs} \quad (1.17)$$

Donde:

$$\sigma = 1 - \frac{L_m^2}{L_s \cdot L_r} : \text{es el llamado coeficiente de Blonde.}$$

ω_e – es la frecuencia angular sincrónica del campo del estator del motor,

[rad/s].

U_{ds} , U_{qs} – son las tensiones en el estator del motor en los ejes dd-qq, [V].

i_{ds} , i_{qs} – son las corrientes en el estator en los ejes dd-qq, [A].

ψ_{dr} , ψ_{qr} – son los flujos magnéticos en el rotor en los ejes dd-qq, [Wb].

L_s , L_r – son las inductancias en los devanados del estator y rotor, [mH].

L_m – es la inductancia mutua del motor eléctrico, [mH].

R_s – es la resistencia óhmica de los devanados del estator, [ohm].

Con la orientación del flujo del rotor sobre su eje directo dd, donde se asume que la componente transversal $\Psi_{qr} = 0$; en estado estacionario se obtiene:

$$\psi_{dr} = L_m \cdot I_{ds} \quad (1.18)$$

Siendo equivalentes la componente I_{ds} con la corriente de magnetización I_{mag} [Bose y otros, 1997].

La componente total de la corriente del estator en los ejes de cuadratura tiene como módulo:

$$I_s = \sqrt{(I_{ds})^2 + (I_{qs})^2} \quad (1.19)$$

de tal forma que I_{ds}^* y I_{qs}^* sirven de comandos durante el control de las pérdidas.

La potencia de entrada del accionamiento es obtenida desde:

$$P_e = I_{ds} \cdot U_{ds} + I_{qs} \cdot U_{qs} \quad (1.20)$$

A partir de lo cual, con cambios en I_{ds} se controla el flujo del rotor Ψ_{dr} y con ello el torque del motor de inducción, que repercute en la potencia de entrada.

Se puede entonces, valorar la eficiencia del accionamiento eléctrico a través del momento de carga M_c desarrollado por la potencia mecánica de la bomba centrífuga, por su velocidad angular de rotación ω_r y entre la potencia de entrada eléctrica del motor de inducción, según (1.21):

$$\eta_{MI} = \frac{M_c \cdot \omega_r}{P_e} \quad (1.21)$$

El momento mecánico o de carga desarrollado por la bomba centrífuga (BC) está relacionado con la potencia mecánica N_b y la velocidad angular de rotación ω_r de acuerdo a la siguiente expresión (1.22):

$$M_c = \frac{N_b}{\omega_r} \quad (1.22)$$

Donde

M_c es el momento de carga mecánico de la bomba, [N.m]

N_b es la potencia mecánica desarrollada por la bomba, [kW]

ω_r es la velocidad angular de rotación del rotor, [rad/s]



Para el análisis, se tiene en cuenta el tipo de transmisión entre la bomba y el motor eléctrico corrigiendo las relaciones correspondientes por el rendimiento de la transmisión η_{tr} de tal forma que trabajaremos con ω_r .

La potencia mecánica de la bomba centrífuga es válida para cualquier tipo de fluido según la expresión (1.23) [62][B. Nekrasov, 1968]:

$$N_b = \frac{\rho \cdot H \cdot Q}{102 \cdot \eta_b \eta_{tr}} = \frac{\rho \cdot H \cdot v \cdot A}{102 \cdot \eta_b \eta_{tr}} \quad (1.23)$$

Donde

ρ Es la densidad del fluido transportado por la bomba, [kg/m³]

H es la altura de carga desarrollada por la bomba, [m]

Q es el caudal o gasto desarrollado por la bomba, [m³/s]

η_b es el rendimiento de la bomba, [%]

η_{tr} - es el rendimiento de la transmisión, tiene en cuenta el tipo de transmisión en el acoplamiento mecánico entre la bomba y el motor eléctrico, [%]

Para expresar la potencia de la bomba en [kW], se debe utilizar en el denominador de la expresión (1.23) 3600, ya que el gasto Q debe estar dado en [m³/s].

El caudal desarrollado por la bomba centrífuga está determinado por:

$$Q = v \cdot A \quad (1.24)$$

Donde

v es la velocidad lineal de transporte del fluido, [m/s]

A es el área de la sección transversal de la tubería de impulsión de la bomba, [m²] ó [mm²]

Poner a trabajar el sistema motor de inducción – bomba centrífuga MI-BC en zonas de mejores eficiencias es una tarea realizable cuando se evacuan las pérdidas eléctricas a través de la reducción de reactivos ocasionados por el exceso de flujos magnéticos en el entrehierro de la máquina de inducción con relación a su carga y por otra parte si se disminuyen las pérdidas en los elementos hidráulicos de la bomba centrífuga BC operando con adecuadas velocidades y gastos específicos.

La velocidad específica desarrollada por la bomba centrífuga depende del número de revoluciones del motor MI, del caudal y la altura de carga desarrollada por la bomba y ofrece una medida de la capacidad productiva de la turbo-máquina BC para transportar el fluido:

$$n_{esp} = \frac{n_b \sqrt{Q}}{H^{3/4}} \quad (1.25)$$

Donde

n_b es el número de revoluciones de la bomba centrífuga, [rpm]

H es la altura de carga desarrollada por la bomba, [m]

Con este parámetro n_{esp} y el caudal Q desarrollado por la bomba, se puede estimar la eficiencia de la turbo-máquina a través de un gráfico ofrecido por el fabricante.[B. Nekrasov, 1968].

La altura de carga que desarrolla la bomba centrífuga, dado en metros [m] se identifica por la carga neta de succión positiva según el término dado por sus siglas en inglés NPSH y se calcula por la expresión (1.26):

$$NPSH = 10 \left(\frac{n \sqrt{Q}}{c} \right)^{\frac{3}{4}} \quad (1.26)$$

Donde

c es un coeficiente que depende la velocidad específica, dado en tablas.

Y este NPSH de cálculo se acostumbra comparar con la carga neta de succión



positiva requerida $NPSH_{req}$,

1.4 Conclusiones:

Se aprecia que las variables que inciden en la eficiencia del sistema de accionamiento de bomba centrífuga son: la potencia de entrada y la frecuencia angular de rotación del motor eléctrico, la densidad de la hidromezcla transportada, la altura de carga de presión y el caudal desarrollado por la bomba centrífuga. Una parte apreciable de la energía que se transfiere desde el motor de inducción hacia la bomba centrífuga se disipa en la red hidráulica en forma de pérdidas, donde es frecuente la aparición de regímenes de cavitación por la presencia de gases en el fluido transportado y que provoca vibraciones mecánicas adicionales en el sistema.

Capítulo II: Métodos y Materiales



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

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 serpentínico 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 neutralización: Objeto de Estudio.

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 precipitación 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
- Planta Ácido
- Planta de Hidrogeno

- Planta de H_2S
La Empresa Cubano Canadiense “Comandante Pedro Sotto Alba - Moa Nickel S.A.”(ECPSA) con tecnología de lixiviación ácida a presión y una alta eficiencia de extracción de sulfuros de níquel y cobalto, teniendo el siguiente flujo tecnológico, como se muestra en la figura 2.1

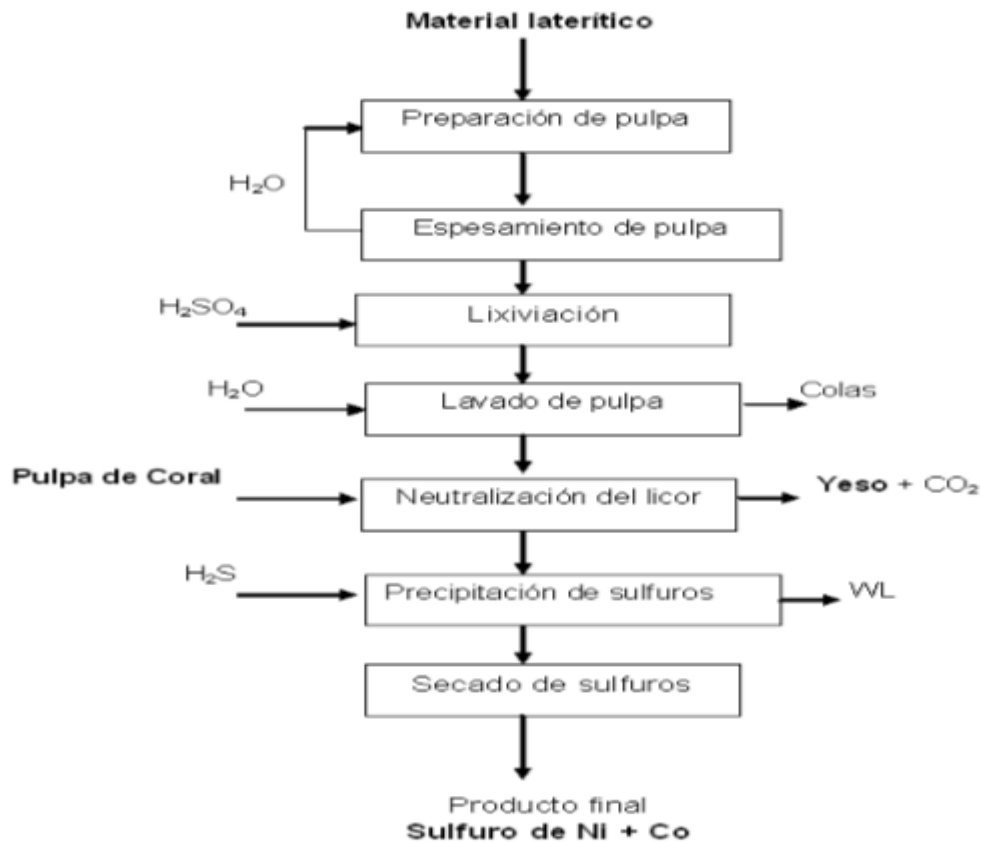


Figura 2.1. Flujo Tecnológico de la empresa

La laterita es una mezcla de minerales de hierro, donde la goethita es la fase mineralógica principal, con maghemita, hematita, gibbsita y serpentina como secundarias. El cieno es carbonatado, en forma de calcita y aragonito; el material de yeso se identifica como bassanita y el sulfuro de Ni + Co está constituido básicamente por millerita. La laterita, el cieno y el yeso están formados fundamentalmente por partículas finas (menores de 0,045 mm), lo que explica sus comportamientos reológicos, ajustables al modelo de Bulkley – Herschel. Por el contrario, el sulfuro de Ni + Co tiene una distribución de tamaño próxima a un material monodisperso, ajustándose bien al modelo de Newton. La pulpa cruda de mineral laterítico, materia prima principal en la industria del níquel, presenta características no newtonianas debido a sus propiedades físico-químicas y al

contenido de sólidos requerido para su procesamiento industrial; ocasionando problemas de transportación y sedimentación por su alta viscosidad [Pérez 2010].

En la actualidad, no es posible dar a las suspensiones lateríticas que se procesan en el área del níquel, una caracterización que garantice un comportamiento reológico predecible; de hecho, el comportamiento reológico de una muestra cambia con el yacimiento, así como con el sitio y la profundidad con que se tome, de ahí que el modelo reológico implica un trabajo experimental largo y complejo por el número y naturaleza de las experiencias.

Las características no newtonianas de estas suspensiones minerales se deben a efectos de diversos factores, siendo los principales la concentración total de sólidos, la distribución de tamaños de las partículas, el pH, la temperatura de la suspensión y la composición mineralógica. Por este motivo, es necesario conocer las curvas de flujo y los parámetros reológicos que describen el comportamiento de dichas suspensiones con vistas al cálculo y evaluación de los equipos, conductos, sistemas de bombeo y para la reducción de consumo energético. Se muestra en la figura 2.2 el consumo de la planta en el año 2013 por meses.

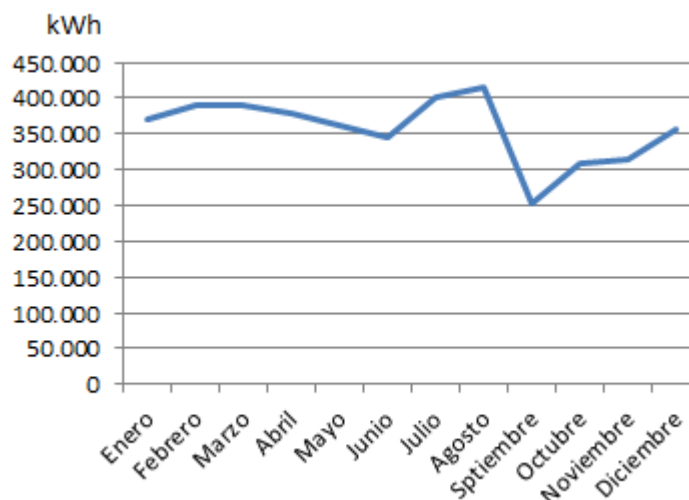


Figura 2.2. Consumo de la planta año 2013



2.2.1 Planta de Neutralización.

La Planta de Neutralización está compuesta por dos trenes con sus respectivas baterías de reactores, dos clarificadores y dos tanques de almacenaje de licor crudo y producto respectivamente. Tiene que enviar más de 4200 gls/min de licor para la Planta de Sulfuro en condiciones de balance. Se consumen 6 ton de coral/ton Ni+Co. La adición de CuSO_4 mejora la eficiencia de precipitación en Sulfuro, inhibe la precipitación de Fe en las autoclaves y controla la granulometría del sulfuro. Constituye un desafío la imposibilidad de controlar adecuadamente el Cu sin la necesidad de añadir CuSO_4 .

Principales variables de control:

- PH del licor neutralizado: 2- 2,3,
- Por ciento de sólidos en el coral: > 35%
- Contenido del H_2S en el licor: 20-25 ppm
- Por ciento de sólido del yeso: 20%.
- Relación Ni/Cu: 700 (relación en g/l)

El cieno carbonatado (coral) procedente de los yacimientos situados en la bahía de Moa es de color gris claro, con restos de conchas de organismos marinos que son eliminados en el proceso de beneficio del coral, donde se convierte en una pulpa cruda, espesa, con 15 a 25 % de sólido, que se utiliza para la neutralización del licor crudo ($\text{pH}=2$) procedente de la Planta de Lavaderos para llevarlo a un $\text{pH}=2,6$ y de esta forma garantizar la eficiencia de precipitación, ya que el ácido libre en el licor tiene un efecto negativo en la precipitación de los sulfuros.

El yeso, en estado sólido, se obtiene como desecho de la Planta de Neutralización y se envía a la Planta de Lavaderos para recuperar el Ni y el Co contenido en él. Es producto de la reacción de neutralización:



A continuación se muestra en la figura 2.3 el esquema tecnológico a través del Citect

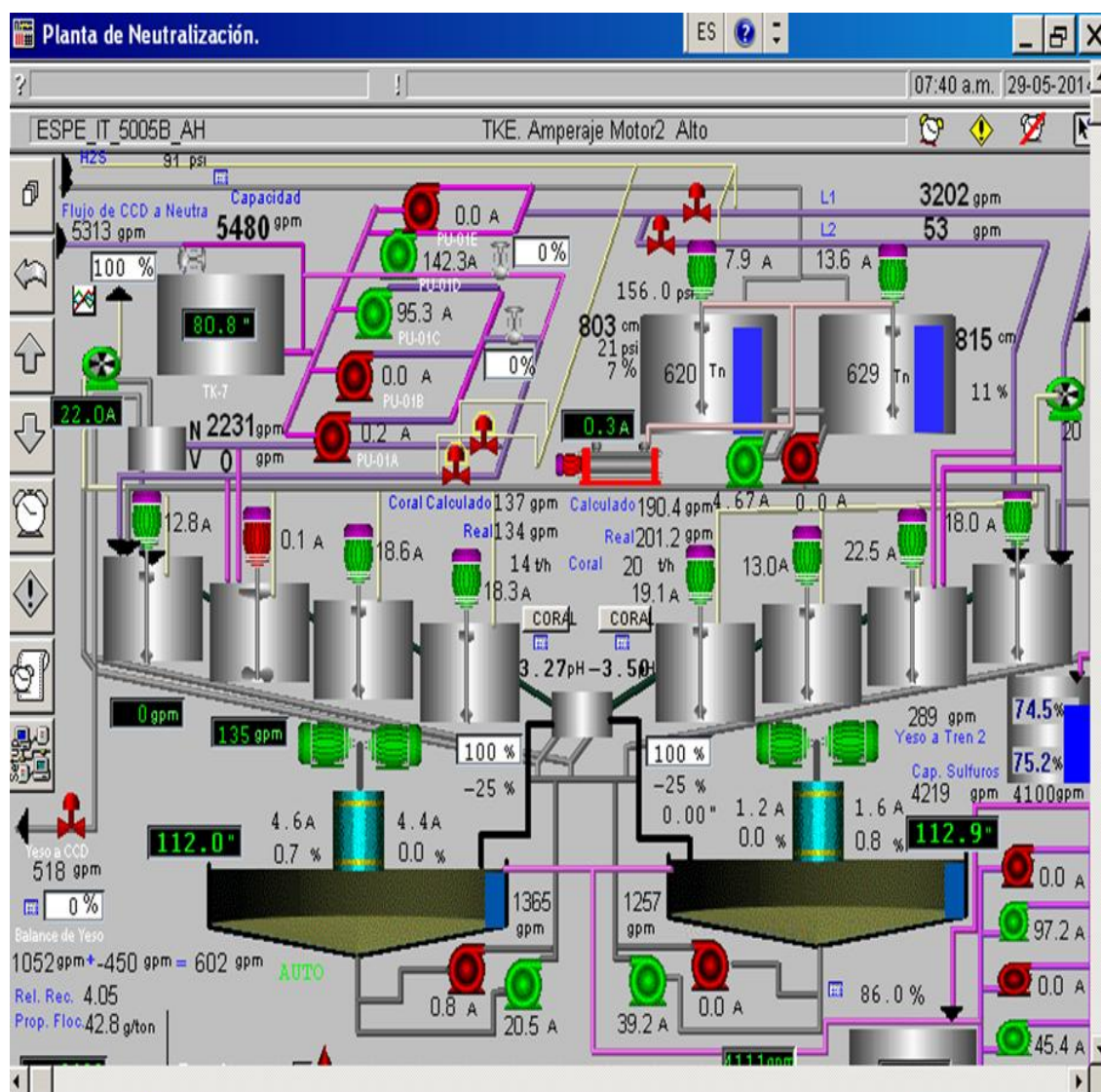


Figura 2.3 Citect planta de Neutralización



A continuación se realizara un análisis de los accionamientos para identificar los de mayor peso en el consumo de energía, como se muestra en la figura 2.4.

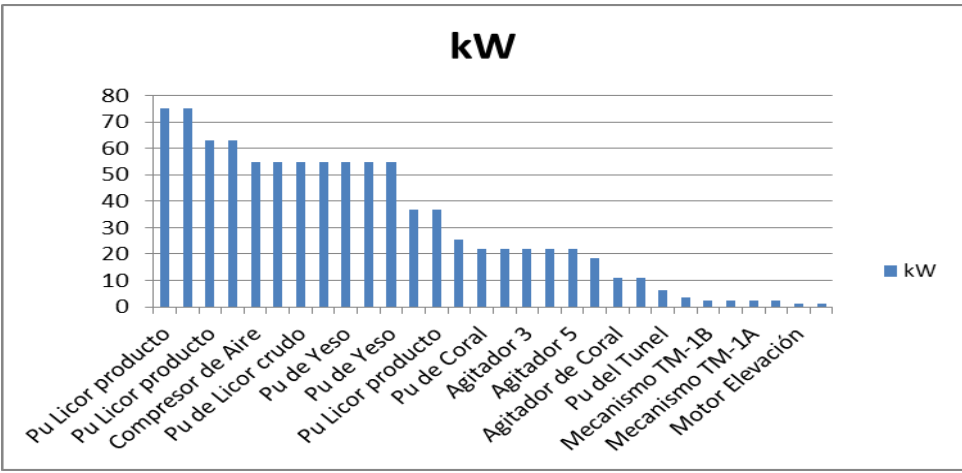


Figura 2.4 Estratificación de la potencia de los accionamientos de la planta.

Como se evidencia los accionamientos de bombas son los de mayor consumo como se muestra en la figura 2.5.

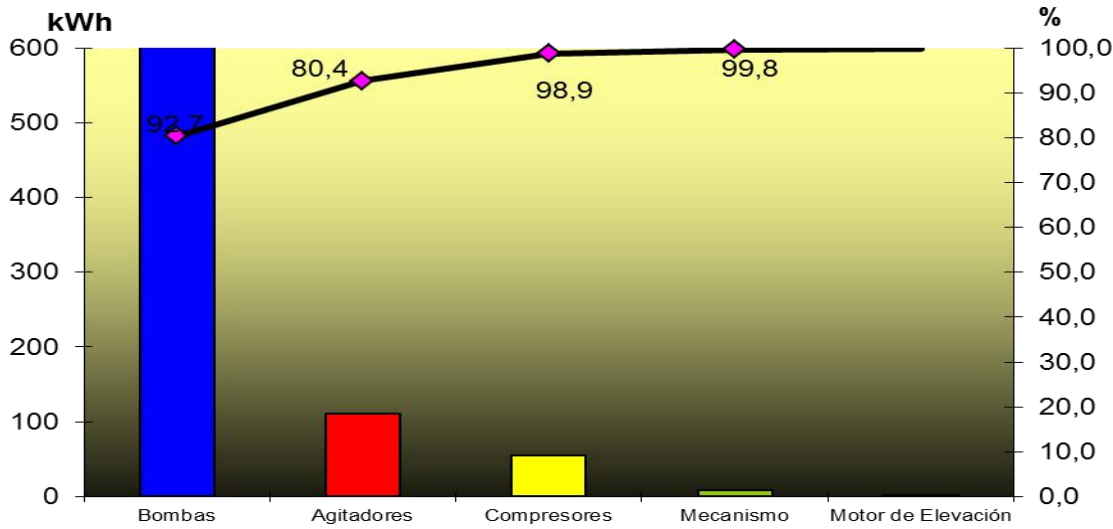


Figura 2.5 Pareto de los accionamiento de la planta.

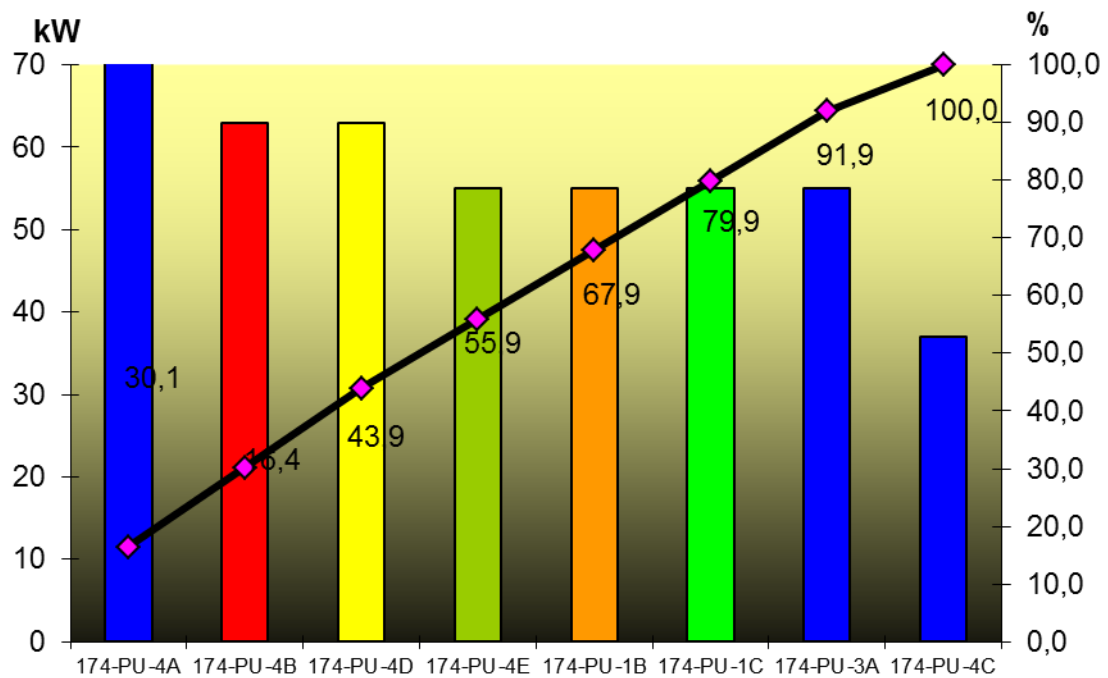


Figura 2.6 Pareto de los accionamiento de la planta

Como se puede apreciar las bombas de Licor producto, licor crudo y las de yesos son las de mayor incidencia en el consumo de la planta por lo que se realizara un análisis más detallado de las mismas.

2.2 Caracterización y análisis del accionamiento eléctrico de la bomba.

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 2.5 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.

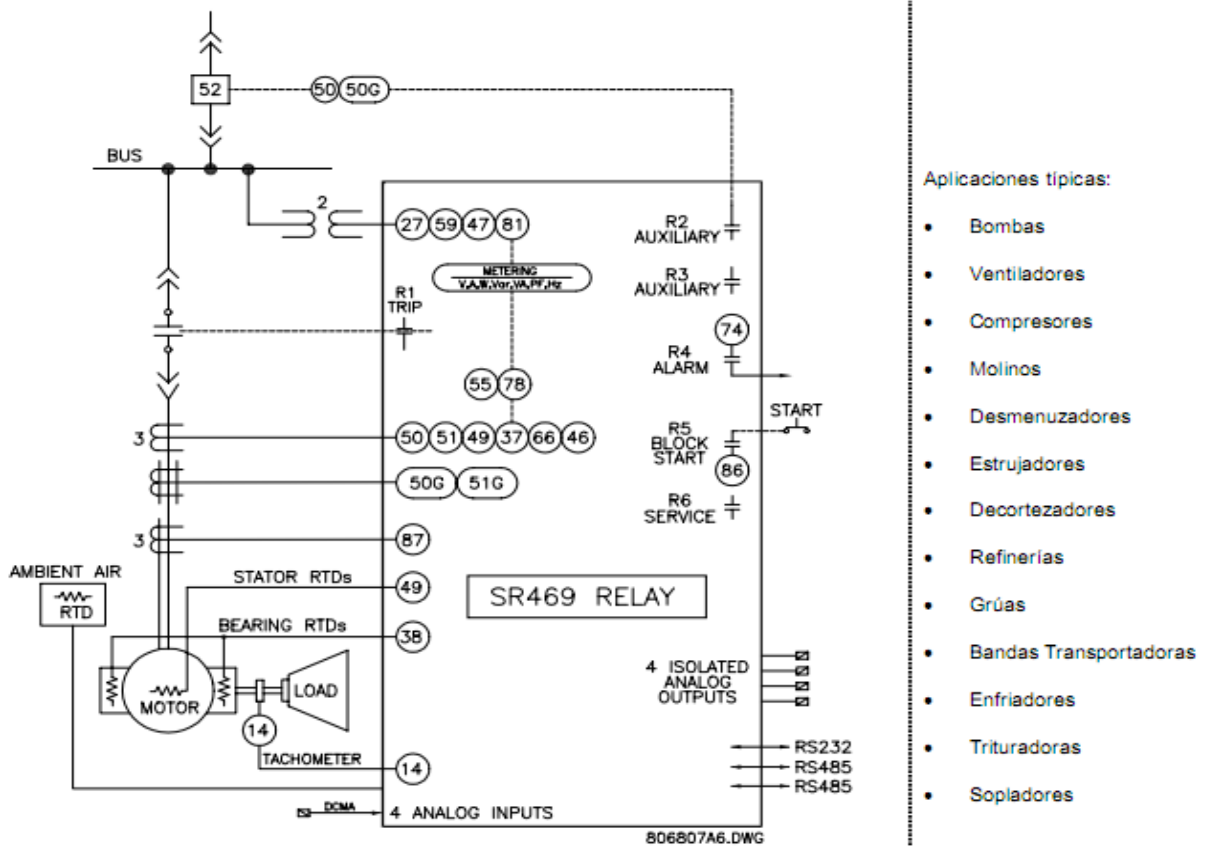


Figura. 2.7. Diagrama unifilar del SR-469.

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 Figura.. 2.8.

Model Number CIMR-F7U		4030	4037	4045	4055	4075	4090	4110	4132	4160	4185	4220 ¹⁵	4300 ¹⁵
Ajustes de salida	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)	60.0	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 ¹⁵	150 ¹⁵
	Límite de corriente (% In de salida)	150										150 ¹⁵	150 ¹⁵
	Frecuencia Portadora	2kHz											
	Frecuencia máxima de salida	300.0Hz											
	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
	Límite de corriente (% In de salida)	120											
	Frecuencia Portadora	8	8	8	5	5	8	5	5	5	2	2	2
	Frecuencia máxima de salida	400.0Hz											
	Voltage max salida	3-phase, 380, 400, 415, 440, 460 or 480Vac (Proportional to input voltage)											

Figura.. 2.8 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 Figura.. 2.9.

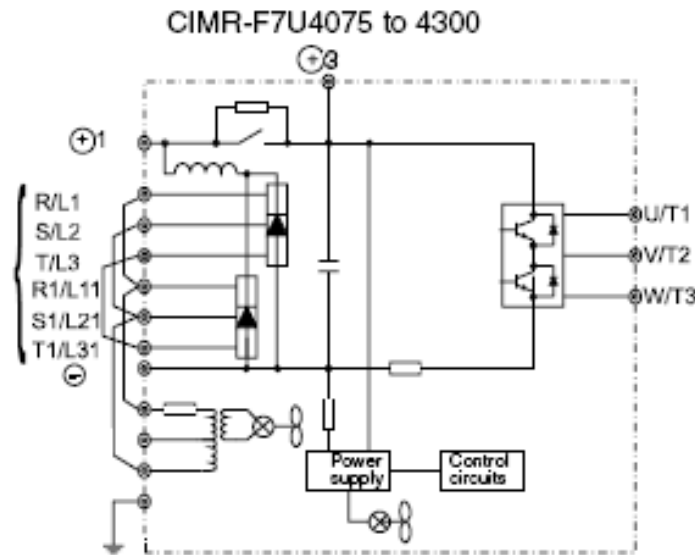


Figura. 2.9. Diagrama del Variador de velocidad YASKAWA F7 modelo 4300.

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.

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 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. 2.10: PQM portátil usada en el monitoreo

2.5.1 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.

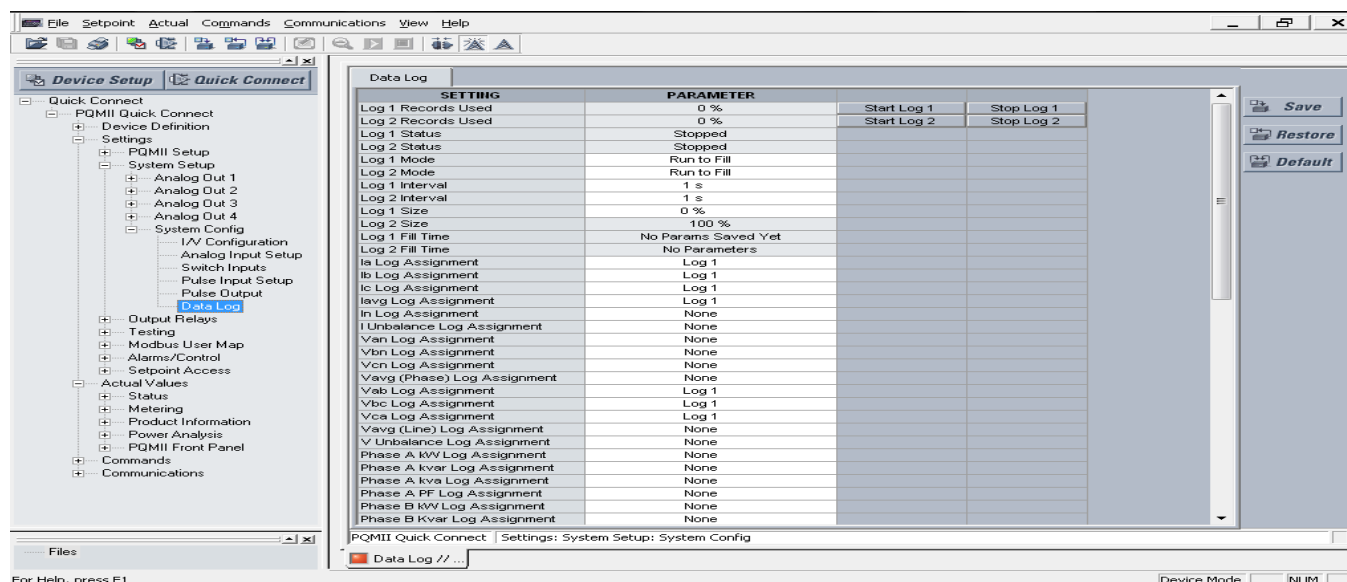


Figura.. 2.11. Software de la PQM para la activación de los parámetros.

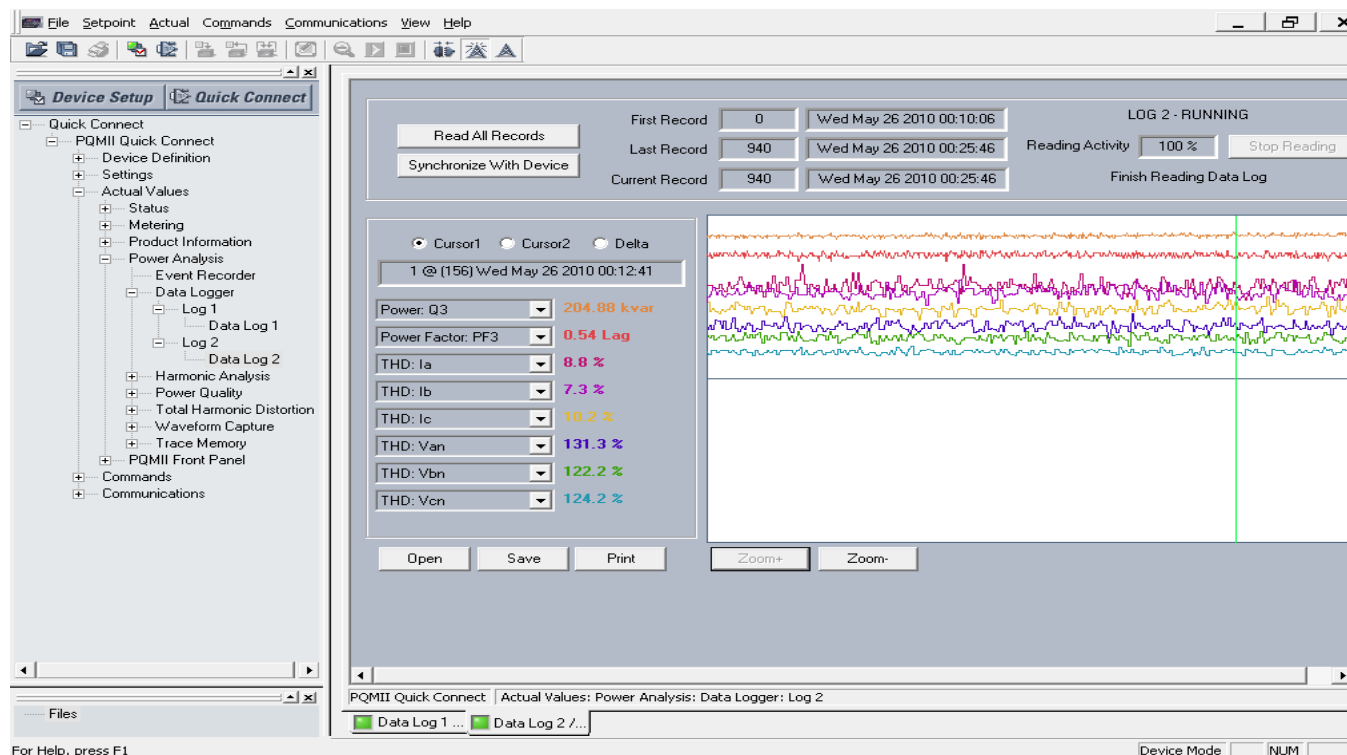


Figura.2.12. Ejemplo de la forma de obtención de los gráficos.

2.6 Resultados de las mediciones realizadas.

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

Se muestra en anexos el resumen de las mediciones de las principales variables eléctricas a la 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.

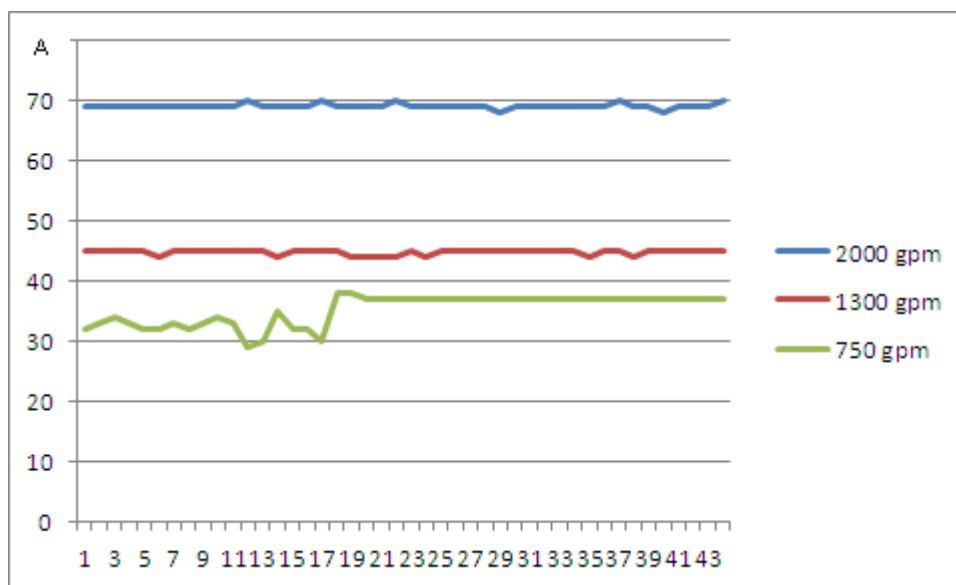


Figura. 2.13 Comportamiento de la corriente a la salida del VFD.

La Figura. 2.13 muestra el comportamiento de la corriente en la salida se puede observar que existe diferencia con la variación de los gpm que son bombeos, valores que oscilan de 70, 45 y 38 A.

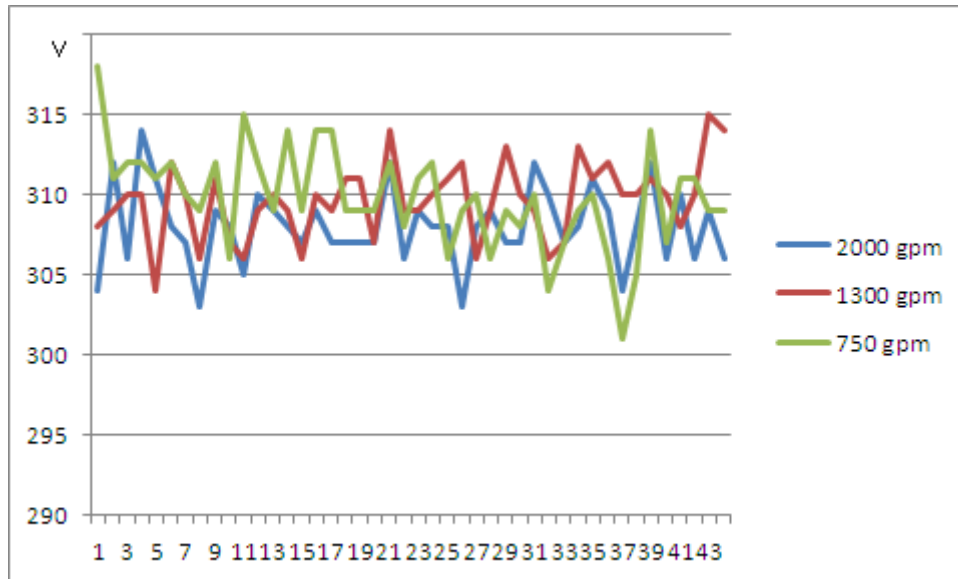


Figura. 2.14 Comportamiento de la tensión a la salida del VFD.

Se muestra en la figura 2.14 y 2.15 las variaciones de tensión a la salida con valores de 315 V como máximo

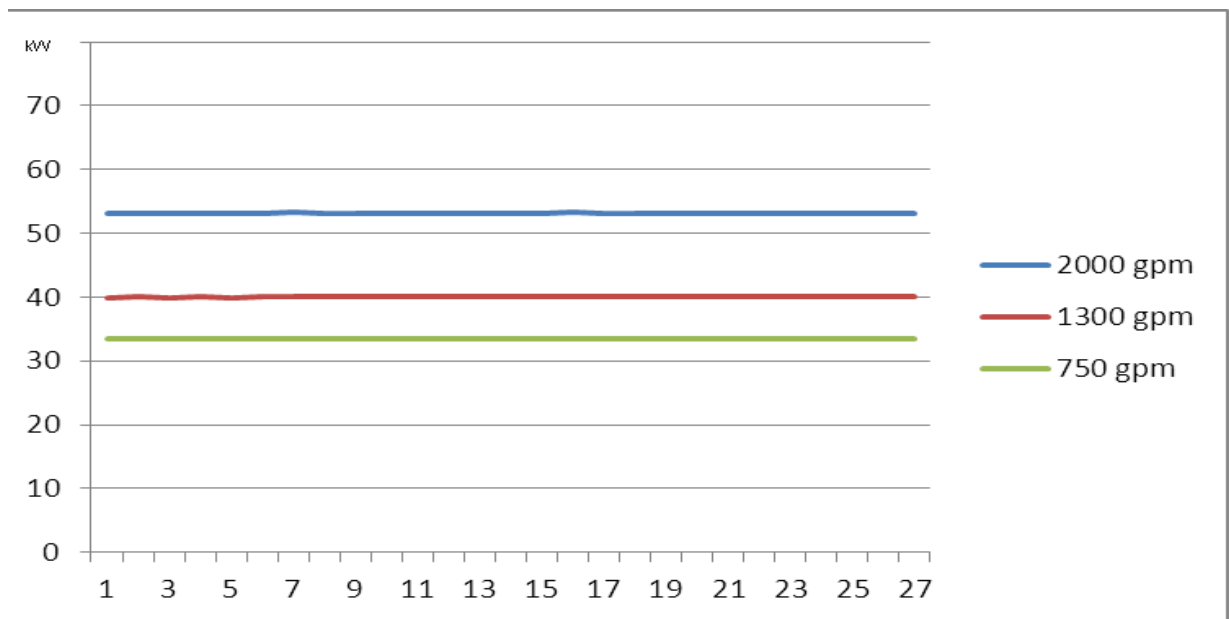


Fig. 2.9 Comportamiento de las potencias a la salida del VFD.



Es necesario resaltar de la representación de las potencias salida en la fig. 2.9 que el consumo oscila entre 35 y 55 kW y la potencia nominal del mismo es de 75 kW, el cual trabaja con un coeficiente de carga de un 70 %, el variador para los diferentes caudales trabaja 80 %, 60 %, 50 %.

2.7 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 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: Análisis de resultado de la evaluación de la eficiencia en un sistema de bombeo de la Planta .



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.

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

Cuando se presentan diferentes condiciones de operación, deben obtenerse los diferentes puntos de operación de la bomba.

Con los datos obtenidos e información técnica del fabricante se obtuvo la curva característica de la bomba, que es la que relaciona las variables que intervienen en el funcionamiento de la misma. A partir de la curva característica, con la caracterización de la red hidráulica y las mediciones obtenidas del Citect, se creó la curva de trabajo de la bomba que se muestra en la figura 3.1.

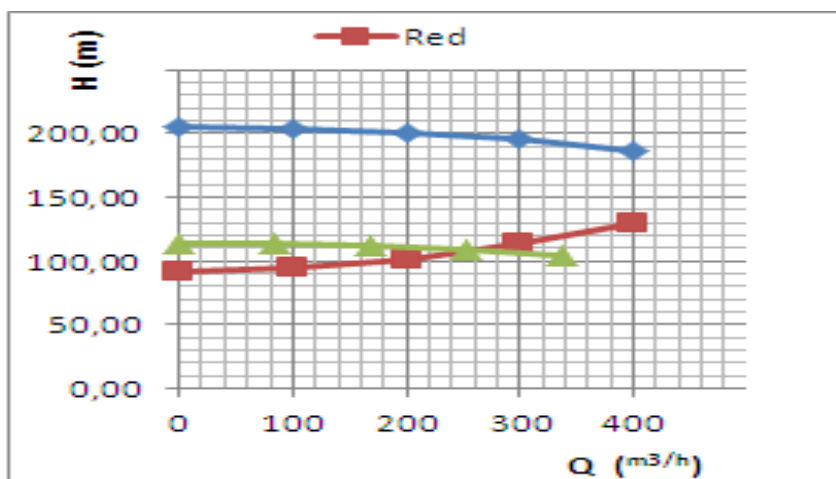


Figura 3.1. Curva del sistema y punto de operación de la bomba de yeso.

Como los datos del pasaporte se obtiene el rendimiento de la bomba como se muestra en la tabla 3.1 y figura 3.2.

Tabla 3.1 Rendimiento de la bomba de yeso

Rendimiento	Q (m³/h)
0	0
58	100
74	200
82	300
82	400

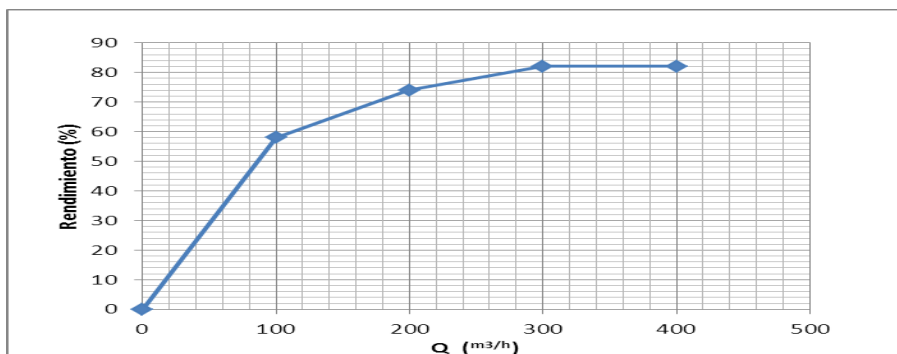


Figura 3.2 Curva de rendimiento de la bomba



Con la realización de la curva de trabajo de la bomba, se obtuvo que el equipo para un caudal (Q) de 250 m³/h, altura (H) de presión de 90 m, el rendimiento de la bomba es de un 78 %.

3.3. 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 retro-alimentación, 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.

Estimador de la eficiencia para la planta de Neutralización

La operación del estimador de eficiencia se explica a través de la figura 3.1. Las corrientes, tensiones, la frecuencia angular son muestreadas y con ellas son obtenidas las variables de potencia de entrada P_e , y el torque de carga M_c .

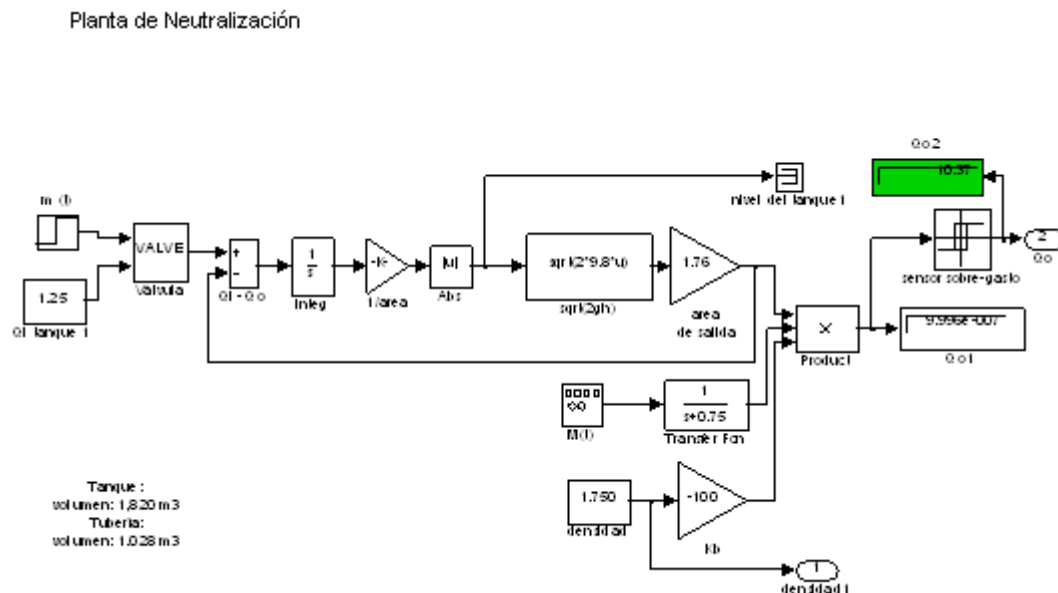


Figura 3.3 Modelo de la bomba centrífuga con parámetros para el bombeo

La base de reglas para el estimador de eficiencia usando la técnica difusa con actualización de la corriente i_{ds}^* , donde se ha utilizado como referencia el criterio propuesto por Mac Vicar – Whelan.

Indicando que para la variable P_e lingüísticamente: MB es muy baja, B es baja, N es normal, A es alta, MA es muy alta; y de igual forma se siguió para las otras variables:



Un ejemplo de regla difusa puede ser tomado como:

IF P_e es alta (A), M_c es baja (B), THEN η es baja (B).

La idea básica es que si la potencia de entrada es alta y se usa para muy poco torque, entonces la eficiencia es baja, porque se usa muy poca potencia de entrada en crear el torque que pide la bomba centrífuga.

Tabla 3.2 Base de reglas de las relaciones de potencia P_e , Momento de carga M_c , y la eficiencia del accionamiento η_{acc}

		Eficiencia: η_{acc}				
P_e, M_c		MB	B	N	A	MA
	MB	MB	MB	MB	B	N
	B	B	B	B	N	N
	N	B	N	N	N	A
	A	N	A	A	A	MA
	MA	A	A	A	MA	MA

3.3.1 Resultados de la simulación

El esquema de estimación de eficiencia del accionamiento de bomba centrífuga simulado utilizando el MATLAB.

Tomando cada valor para un determinado estado estacionario del accionamiento eléctrico; por ejemplo la eficiencia sin el uso del controlador a diferentes por cientos de carga nominal con respecto a su torque, se presentan en las tablas 3.2.

$$\eta_{MI} = \frac{P_s}{P_s + \Delta p} \quad (3.1)$$



Para diferentes cargas mecánicas se evalúa la eficiencia por un bloque estimador usando la técnica difusa.

Tabla 3.3 Valores de eficiencias del motor de inducción con datos de 75 kW, 460 V, obtenida durante la simulación.

Mc/Mn [%]	$\Delta P_{\text{TOTAL}} [\text{kW}]$	Eficiencia [%]	Pe [kW]
36	1,7	90,72	75.00
29	1,75	90	64.67
25	1,67	88,5	55.75
20	1,43	87,3	44.6
16	1,28	86,1	35.68
12	1,12	84,7	26.76

Figura. 3.2. Gráfico del comportamiento de la eficiencia sin regulador difuso.

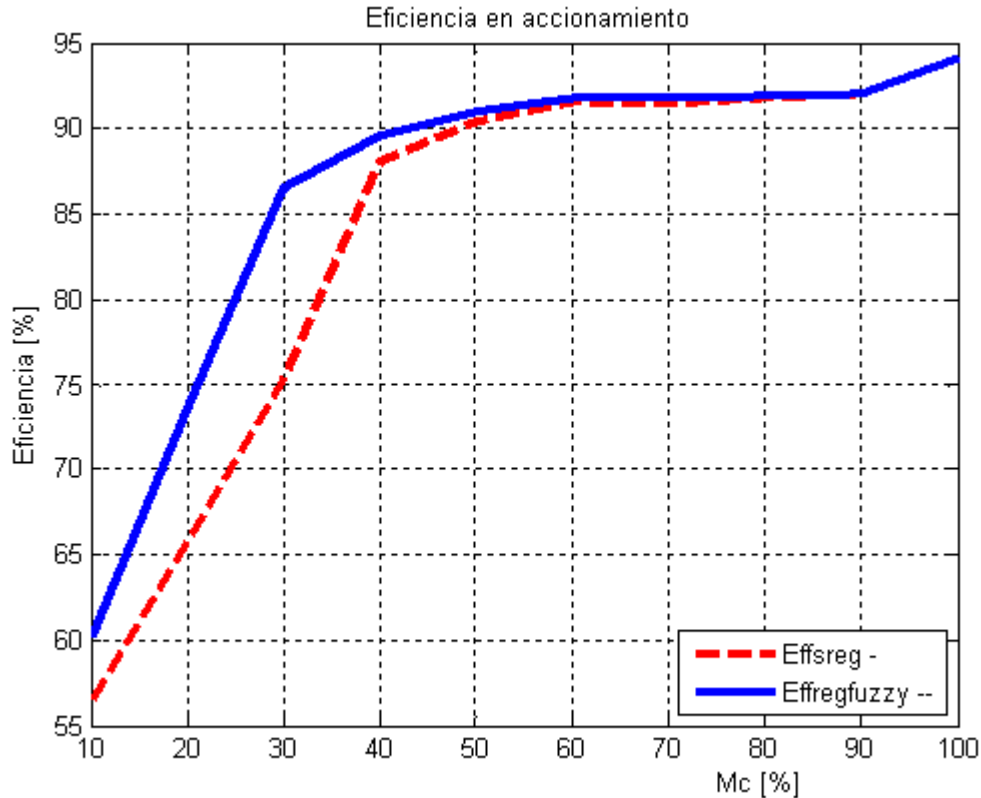


Figura. 3.3. Gráfico de las eficiencias obtenidas usando el regulador difuso y sin este en el accionamiento de bombas.

En la figura. 3.2 y 3.3 se representa 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 a un ahorro de energía para la Empresa.

3.4 Valoración económica del trabajo.

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 (3.2) y (3.3).

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 (3.2):

$$E_{MI\text{ahorro}} = N_b \cdot \left(\frac{1}{\eta_{MI1}} - \frac{1}{\eta_{MI2}} \right) \cdot h_{\text{totales}} \quad (3.2)$$

Donde:

$E_{MI\text{ahorro}}$ – 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 (3.3):

$$E_{ba\text{hooro}} = N_{b1} \left(1 - \frac{\eta_{b1}}{\eta_{b2}} \right) \cdot h_{\text{totales}} \quad (3.3)$$

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 accionamientos de bombas de yeso de la planta de neutralización de la Empresa Cmte. Pedro Sotto 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.

Mc [%]	η_{MI1}	η_{MI2}	$\Delta E \Delta \alpha \rho \iota o$	Costo de E ahorrada anual total
	[%]	[%]	[kWh]	(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
Total	92	91,5	87,81	6740,23

Considerando que en la planta existen tres accionamientos de este tipo el ahorro por este concepto es de 6740,23 CUC.

3.4.2 Cálculo del tiempo de amortización de la inversión.

Se tiene que
$$T_{amortización} = \frac{Inversión}{Energía Ahorrada} \quad (3.1)$$

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 1,7



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 5 meses

3.5 Conclusiones.

En este capítulo se propuso las mejoras de la eficiencia a través del controlador difusos asistido por SIMULINK / MATLAB para comparar el rendimiento del motor con el controlador difuso y sin este, además se realizaron varias propuestas para para mejorar la eficiencia en el accionamiento de la bomba de yeso. 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 determinaron las características de explotación de los accionamientos, lo que facilitó la realización de un 1h0conjunto de mediciones, que sirvieron de referencia para conocer el comportamiento de la eficiencia energética en el accionamiento de un 78 %.
2. Se realizó la simulación de los accionamientos eléctricos considerando las condiciones industriales de explotación, sugiriendo como propuesta la aplicación de Lógica Difusa en el accionamiento de la bomba de yeso.
3. Con la aplicación del controlador difuso se obtiene un ahorro promedio de energía de 6740,23 CUC anuales, por concepto de reducción de pérdidas en el sistema de accionamiento eléctrico.



Recomendaciones

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 yeso.

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 Sagardia, 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 Sequinr 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 laterítica", Tesis doctoral, ISPJAE, La Habana, Cuba, 2006.
44. Rojas Purón, L.D., Guzmán del Río, 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

Consumo de la planta año 2013

Meses	Consumo kWh
Enero	371.610
Febrero	391.000
Marzo	390.000
Abril	378.000
Mayo	361.740
Junio	345.170
Julio	402.000
Agosto	415.000
Septiembre	252.000
Octubre	308.000
Noviembre	314.000
Diciembre	356.000

Los principales equipos de la planta.

Equipos	Función. Razón de ser
Tanques de almacenaje de coral	Almacena la pulpa de coral que viene desde el Puerto con más de 35 % de sólidos para alimentarla a la Planta.
Tanque 7 de licor crudo	Almacena el licor proveniente de la Planta de Lavaderos para alimentarlo a la Planta.
Reactor tubular (1)	Reduce el Fe^{3+} y el Cr^{6+} y precipita el Cu en forma de sulfuro de cobre (CuS) mediante una inyección de H_2S , a una concentración de 20-25 ppm, en la línea de licor crudo de alimentación a cada tren. El H_2S proviene de la purga de las autoclaves de Sulfuro (H_2S al 70 %) y de la Planta de H_2S (H_2S puro al 98 %).
Reactores en serie (2, 3, 4 y 5)	Neutralizar el licor reducido mediante la adición de pulpa de coral, que presenta un 90% de CaCO_3 . El pH varía desde 1 hasta 2,3. Hay dos trenes instalados que operan normalmente, cada uno con su batería de 4 reactores en serie.
Caja distribuidora #2	Recepciona la pulpa neutralizada (yeso) que sale de los reactores y la distribuye en partes iguales a los sedimentadores mediante canales.

Sedimentadores	Concentra la pulpa de yeso producto de la reacción desde un 7 a un 20 % de sólidos adicionando floculante con una dosis de 20-40 g/ton de mineral. El licor producto se envía a Lixiviación para su precalentamiento antes de enviarlo a Sulfuro, o se almacena en tanque de licor producto (TK 8).
Caja distribuidora #1	Recepciona el yeso del fondo de los sedimentadores. Una parte se envía a Lavaderos para recuperar el licor rico en Ni y Co y la otra se recircula a los reactores 2 y 3.
Tanque 8 de licor producto	Almacena el licor neutralizado que se obtiene como producto en la Planta.
Sistema de cobre	Se adiciona CuSO_4 en la línea de licor producto antes de llegar a Lixiviación para controlar el área superficial (entre 2000 y 2500 cm^2/cm^3) y el contenido de Fe en el sulfuro de Ni+Co menor de un 1,5 %. En función de esto se regula la dosis de Cu a añadir en la muestra SF (relación Ni/Cu entre 600-900).
Planta de floculante	Está constituida por una tolva, un soplador, un tornillo sin fin, un tanque de preparación y un tanque de almacenamiento. Esta Planta también prepara el floculante que se emplea en Sulfuro.
Planta de Hidrosulfuro de Amonio	Produce hidrosulfuro de amonio para la Che Guevara, no forma parte del proceso, pero es operada por Moanickel y entra en el balance de H_2S diario con un consumo sobre las 4 TM/día

	como promedio.
--	----------------

Anexo :





Time	Current: Ia	Current: Ib	Current: Ic
1	69	68	68
2	69	68	68
3	69	68	68
4	69	68	68
5	69	68	68
6	69	69	68
7	69	68	68
8	69	69	68
9	69	68	68
10	69	68	68
11	70	69	68
12	69	69	68
13	69	68	67
14	69	68	68
15	69	68	68
16	70	69	69
17	69	68	68
18	69	68	68
19	69	68	69
20	69	69	68
21	70	68	68
22	69	68	68
23	69	68	68
24	69	68	68
25	69	68	68
26	69	68	68



--	--	--	--

27	69	68	68
----	----	----	----

28	68	68	68
----	----	----	----

29	69	68	68
----	----	----	----

30	69	68	68
----	----	----	----