



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

# *Trabajo de Diploma*

**En opción al Título de Ingeniero  
Eléctrico**

*Título: Selección y montaje de Variador de Velocidad para transporte neumático de mineral laterítico en planta piloto CEDINIQ.*

**Diplomante.** Ernesto Cabrera Montero.

**Tutores.** Ing. Osmany Pérez Aballe.

Ing. Geolvis Galano Urtate.

Ing. Eduardo Pérez Pérez.

**Curso, 2010-2011**  
**“Año 54 de la Revolución”**

**Declaración de autoridad.**

Yo, Ernesto Cabrera Montero, autor de este trabajo de diploma titulado: “Optimización energética de transporte de mineral laterítico de la planta piloto CEDINIQ, mediante selección y montaje de Variador de Velocidad en ventilador de tiro forzado “certifico su propiedad intelectual a favor del Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa “Dr. Antonio Núñez Jiménez”, el cual podrá hacer uso del mismo para fines docentes y educativos.

---

**Tutor.** Ing. Osmany Pérez Aballe.

---

**Tutor.** Ing. Geolvis Galano Urtate.

---

**Tutor.** Ing. Eduardo Pérez Pérez.

---

**Diplomante.** Ernesto Cabrera Montero.

## **Agradecimientos**

La realización de este Trabajo de Diploma y mi éxito profesional no hubiera sido posible sin la contribución de algunas personas a quienes quisiera agradecer.

De manera especial a mis padres que han sido la guía en mi desarrollo educacional por ser el ejemplo a seguir y el motivo de inspiración para la selección de mi profesión.

A mis tutores Ing. Osmany Pérez Aballe, Ing. Eduardo Pérez Pérez y a Ing. Geolvis Galano Urtate, por sus consejos y orientación durante la realización de este trabajo.

A todos los profesores, por los conocimientos y experiencia que me transmitieron, su incuestionable nivel científico unido a su pedagogía y humildad, hago llegar mi más sincero respeto y gratitud.

A todos los profesores de la carrera de ingeniería eléctrica y en especial a los compañeros de mi trabajo de la Empresa Pedro Sotto Alba (Talleres Eléctrico y en especial al Departamento del Laboratorio Eléctrico).

## **Dedicatoria**

Dedico este trabajo de diploma a mis padres Yoel y Digna, a mi familia y a todas aquellas personas que de alguna forma nos ayudaron en la realización de esta tesis.

# Pensamiento



*“Para ser exitoso no tienes que hacer cosas extraordinarias, haz cosas ordinarias extraordinariamente bien”.*

**Ernesto Che Guevara**

# Resumen

Con la realización del presente trabajo investigativo, “Selección y montaje de Variador de Velocidad para transporte neumático de mineral laterítico en planta piloto CEDINIQ”, se pretende realizar la selección y montaje de un variador de velocidad que alimente al motor del ventilador centrífugo de tiro de mineral forzado, el cual se encuentra trabajando a régimen constante, independientemente de las necesidades que requiere la carga, y las variaciones de flujo necesarias en el proceso se logran a través de reguladores mecánicos de flujo, llamados dámper o compuertas. Al Variador seleccionado se le realizaron una serie de experimentos con el objetivo de corroborar la correcta selección del accionamiento eléctrico, para la realización de estos, se estudiaron cuáles eran los parámetros más influyentes en el proceso de molienda y a partir de ahí se realizaron los experimentos correspondientes. Al evaluar los resultados se llegan a 2 conclusiones fundamentales: la primera referida a la correcta selección del variador de velocidad y la segunda a la relación del consumo eléctrico en el ventilador de tiro forzado y su relación con el resto de los procesos de molienda.

## Summary

With the completion of this research work, "Selection and installation of VFD for pneumatic transport of lateritic ore CEDINIQ pilot plant" is intended to make the selection and installation of a variable speed motor that feeds the centrifugal fan shot forced mineral, which is working at a constant rate, regardless of the needs required by the load, and changes necessary in the process flow is accomplished through mechanical flow regulators, called damper or dampers. I selected the ESC perform a series of experiments in order to verify the correct selection of electric drive to achieve these, we studied the parameters which were most influential in the milling process and from there the corresponding experiments were performed. In evaluating the results reach 2 key findings: the first has to select the correct drive controller and the second to the relationship of power consumption in the forced draft fan and its relationship with the rest of the milling process

<b>Selección y montaje de Variador de Velocidad para transporte neumático de mineral laterítico en planta piloto CEDINIQ</b>	
<b>INDICE</b>	<b>pág.</b>
<b>RESUMEN</b>	
<b>ABSTRACT</b>	
<b>INTRODUCCION GENERAL</b>	
<i>Situación problemática actual</i>	
<i>Problema a investigar</i>	
<i>Objetivo</i>	
<i>Objetivos específicos</i>	
<i>Objeto de la investigación</i>	
<i>Campo de acción</i>	
<i>Hipótesis</i>	
<i>Tareas de trabajo</i>	
<i>Resultado esperados</i>	
<i>Aportes</i>	
<b>CAPITULO 1. “MARCO TEORICO”</b>	
<i>1.0 Introducción.</i>	
<i>1.1 Estado del arte.</i>	
<i>1.2 Principales cuestiones a considerar para la correcta selección de un variador de velocidad.</i>	
<i>1.3 Variador de velocidad F7, Yaskawa.</i>	
<i>1.4 Alarma y fallas más comunes del variador de velocidad.</i>	
<i>1.5 Ajustes de programación del variador de velocidad F7.</i>	
<i>1.6 Características de control de motor de CA</i>	
<i>1.7 Ahorro energético mediante la correcta selección de los motores</i>	
<i>1.8 Control por variación de velocidad</i>	
<i>1.9 Método de control por frecuencia</i>	
<i>1.10 Cargabilidad del motor</i>	
<i>1.11 Criterios generales de selección.</i>	
<b>1.12 Teoría para la regulación de flujo en ventiladores utilizando Variador de Velocidad.</b>	
<i>1.12.1 Ventiladores axiales.</i>	
<i>1.12.2 Ventiladores centrífugos.</i>	
<i>1.12.3 Sistema de regulación</i>	
<i>1.12.4 Componentes de un sistema de control.</i>	
<i>1.12.5 Aplicaciones más comunes de los reguladores utilizando variadores de frecuencia y con métodos por estrangulación.</i>	
<i>1.12.6 Medidas de eficiencia</i>	
<b>1.13 Conclusiones.</b>	





# INTRODUCCION GENERAL.

## Introducción.

El actual escenario energético mundial está atravesando por una crisis, en la cual, hay que explotar todas las alternativas que tributen al uso más racional de los portadores energéticos. En un apreciable por ciento de los accionamientos eléctricos en la industria del níquel cubana están presentes los motores de inducción, que es una de las mejores formas de obtener energía mecánica a partir de energía eléctrica, aunque tiene la limitante de mantener su velocidad fija, una vez fijados los valores nominales de alimentación, sin portar las variaciones de carga. Sin embargo la mayoría de los procesos industriales requieren variación de velocidad.

Una instalación promedio puede reducir su consumo energético entre un 10 y 20%. En la presente investigación se realiza un análisis de los diferentes aspectos relacionados con los temas que son discutidos en la bibliografía consultada, con el fin de disponer de los elementos básicos y de las tendencias actuales que resultan esenciales para el análisis de la eficiencia energética en accionamientos con ventiladores centrífugos de tiro forzado de mineral .

El Variador de velocidad es un dispositivo empleado para controlar la velocidad giratoria de una maquinaria, especialmente de motores; estos, amplían el campo de regulación allí donde las condiciones de caudal fluctúan o donde hay necesidad de controlar la presión, en aplicaciones donde intervienen bombas o ventiladores. Una nueva generación de accionamientos de velocidad variable, permite que los motores asíncronos sean tan controlables y eficientes como sus contrapartes de CD, ha evolucionado rápidamente con los avances de la electrónica del estado sólido y sin los mayores costos que anteriormente implicaba. Estos accionamientos se aplican en una gran variedad de casos sin importar la potencia nominal del motor o su localización dentro de una planta.

Aspecto importante es, que estos dispositivos que permiten variar la velocidad de los motores asíncronos trifásicos, convirtiendo las magnitudes fijas de frecuencia y tensión

de red en magnitudes variables, incluyen en su mayoría dentro del propio convertidor protecciones para el motor, tales como protecciones contra sobre intensidad, sobre temperatura, fallo contra desequilibrios, defectos a tierra, etc., además de ofrecer procesos de arranque y frenados suaves mediante rampas de aceleración y de frenado, lo que implica un aumento de la vida del motor y las instalaciones. Como debe saberse, el uso de convertidores de frecuencia añade un enorme potencial para el ahorro de energía disminuyendo la velocidad del motor en muchas aplicaciones.

El objetivo principal de esta investigación consiste en exponer las bases teóricas y trabajos precedentes relacionados con las normas de consumo de energía en los accionamientos de trabajo centrífugo para poder seleccionar correctamente el variador adecuado para el caso de estudio.

### **Situación problemática actual.**

Los motores de inducción operan a altas eficiencias, pero al utilizarlos en accionamientos eléctricos con cargas variables o en presencia de cargas centrífugas, donde esta varía en un amplio margen, ocasiona pérdidas eléctricas importantes. En la planta piloto de Moa cuando el ventilador de tiro forzado de mineral es operado a velocidad constante el flujo de mineral por las tuberías es controlado a través de dámper, el motor opera cerca de la carga máxima todo el tiempo al margen de la presión o el flujo suministrado, el cual depende de varios factores de connotación metalúrgica como pueden ser la carga de bolas del molino, el flujo de alimentación de mineral al molino, la composición granulométrica del mineral de alimentación, etc. Es por ello que surge la necesidad de investigar un accionamiento más eficiente mediante la aplicación de un variador de velocidad en sustitución del dámper, en el sistema de transportación de barrido y transportación del material desmenuzado.

### **Problema a investigar lo constituye.**

Se desconoce la efectividad energética que pudiera traer el control del flujo de aire en el sistema de barrido y transportación del material desmenuzado en la sección de molienda de planta piloto, mediante un accionamiento del ventilador de recirculación con un variador de velocidad en sustitución del sistema por estrangulación.

## **Objetivo.**

Evaluar la efectividad energética que puede alcanzarse al introducir un accionamiento con variador de velocidad para el ventilador de recirculación en el sistema de barrido y transporte de material en la sección de molienda de la planta piloto del CEDINIQ.

## **Objetivos específicos.**

- Estudiar la factibilidad de montaje de variadores de velocidad en el sistema de barrido de mineral.
- Evaluar la influencia de la introducción del nuevo accionamiento sobre el proceso.
- Comparar el comportamiento energético de ambos accionamientos.

## **Objeto de la investigación.**

Variadores de velocidad para el transporte neumático de mineral.

## **Campo de acción.**

Eficiencia energética en accionamientos centrífugos.

## **Hipótesis.**

Si se seleccionara correctamente un variador de velocidad para el accionamiento de tiro forzado de mineral y se implementara su montaje, entonces aumentaría la eficiencia energética del sistema de transporte neumático de mineral, conservando la energía que anteriormente se disipaba en los dampers.

## **Tareas de trabajo.**

Los métodos de investigación empleados son los siguientes:

- Método de investigación documental y bibliográfica para la sistematización del conjunto de conocimientos y teorías relacionadas con el objeto de estudio.
- Método de investigación teórico - experimental para describir, caracterizar y cuantificar el proceso de transporte de mineral a escala semi-industrial.
- Análisis y síntesis

En el desarrollo de la investigación se toman como base los estudios efectuados por prestigiosos investigadores relacionados en la bibliografía, así como la información recopilada de trabajos de investigación y tesis de grados realizadas en la Planta piloto del níquel.

### **Resultados esperados**

- Seleccionar y montar correctamente un Variador de velocidad en la planta piloto.
- Aumento de eficiencia en el proceso de molienda.

## **CAPITULO 1. “MARCO TEORICO CONCEPTUAL”**

### **1.1 Introducción.**

El motor eléctrico es el equipo más utilizado en las Industrias entre sus generalidades de accionar bombas y ventilador. Esto significa que una combinación de motor y bomba, o de motor y ventilador, constituyen áreas importantes en que el uso de la energía puede hacerse más eficiente. Así, se pueden lograr numerosas ventajas, asegurando que el sistema este correctamente dimensionado, usando la energía racionalmente.

Hay grandes oportunidades de ahorro en los casos que se controla el flujo de agua o de aire por métodos de estrangulamiento (válvulas o compuertas) y se sustituye por métodos en que se varía la velocidad del motor que acciona la bomba.

El método más eficaz y eficiente para la variación de velocidad es hoy en día el uso de variadores de velocidad aplicados a los motores asincrónicos, principalmente aquellos que emplean el principio de control por modulación del ancho de pulso (*PWM*).

### **1.2 Estado del arte.**

Una investigación científica de acuerdo a lo planteado por Aróstegui, J. M. y otros en 1975 [1], en cualquier área del conocimiento debe siempre estar sustentada por una investigación empírica y por una investigación teórica, de ahí que sea necesario utilizar los métodos que caracterizan a cada una de ellas para desarrollar científicamente las mismas a partir de una clara caracterización del objeto, del planteamiento del problema, los objetivos, la hipótesis y las tareas.

Para desarrollar la investigación Selección y montaje de Variador de Velocidad para el transporte neumático de mineral laterítico de la planta piloto CEDINIQ, para ello fueron consultados diferentes trabajos y estudios, orientando la revisión bibliográfica en función de esto; la información relacionada con el enfoque teórico y metodológico del estudio a realizar sobre la utilización de variadores de velocidad para disminuir consumo eléctrico en la planta.

El proceso de transporte neumático en tuberías horizontales, verticales y codos como sistema integrado, se basa en el principio físico, de que el aire bajo ciertas condiciones puede ser utilizado para transportar materiales pesados, creando una caída de presión entre el inicio y el final de la tubería (Neidigh, 2002).

En los últimos años se han incrementado las investigaciones relacionadas con el transporte neumático de diversos materiales, la mayoría de los autores (Lampinen, 1991; Paul, 1999; Rodes, 2001; Farnish, 2002; Singer, 2002) distinguen dos fases fundamentales: la fluida y la densa; en esta última se hacen diferentes clasificaciones, las más completas son las efectuadas por Rodes (2001) que las divide en dos partes fundamentales.

- Flujo en fase densa continua, donde el sólido ocupa la parte inferior de la tubería horizontal. El transporte en esta, requiere de altas presiones del gas y es limitado a distancias menores de un kilómetro.
- Flujo en fase densa discontinua (se incluye el flujo en fase pistón), donde existen cavidades de aire entre la carga de material transportado a través de la tubería.

Se resalta en el trabajo el punto de tránsito entre las fases fluida y densa, el que depende de las características del material transportado, la configuración y parámetros del sistema; se describe la fase densa como la condición donde los sólidos son transportados de forma que no están suspensos totalmente en el gas, un aspecto de gran interés en el desarrollo de la presente investigación.

La parte del accionamiento encargada de lograr la mezcla aire - mineral y la presión en los ductos para la transportación de partículas, son los Ventiladores centrífugos, los cuales son definidos por Escoda S (2003) y Ramos P (1995) como una turbo máquina que transmite energía para generar la presión necesaria con la que mantiene un flujo continuo de aire. Dentro de una clasificación general se encuentran a los ventiladores como turbo máquinas hidráulica tipo generador para gases.

Un ventilador consta en esencia de un motor de accionamiento generalmente eléctrico, con los dispositivos de control propios: arranque, regulación de velocidad, conmutación de polaridad, etc., y un propulsor giratorio en contacto con el aire al que le transmite

energía. El propulsor adopta la forma de rodete con alabes, envuelto por una caja con paredes de cierre en forma de espiral. La envolvente tubular puede llevar una reja radial de alabes fijos a la entrada o salida de la hélice llamada directriz que guía al aire para aumentar la presión y el rendimiento del aparato.

Los ventiladores centrífugos son equipos empleados para el trasiego de aire, gases o partículas en instalaciones industriales. En estos aparatos, la trayectoria del aire sigue una trayectoria axial a la entrada y paralela a un plano radial a la salida. Entrada y salida están en ángulo recto. El rodete de estos aparatos está compuesto de alabes que pueden ser hacia delante o hacia atrás.

Según Ramos P. (1995), las bombas y ventiladores son calculados para cubrir los requerimientos máximos de la carga, sin embargo, es común que el sistema demande una amplia gama de puntos de operación, hasta fracciones de los parámetros de diseño de estos accionamientos. Elementos como válvulas reguladoras o compuertas popularmente llamadas dámpers, son ampliamente utilizados en ventiladores y bombas para adecuarse a estas necesidades y aunque son confiables y simples afectan severamente la eficiencia del sistema.

El motor de inducción es hoy el motor eléctrico más robusto y confiable, por lo que es el más popular en la industria. Sin embargo su empleo para algunas aplicaciones, que requieren cambios de velocidades, es muy restringido ya que dada la fuente de alimentación (*frecuencia y voltaje*), y escogido el motor (*potencia y número de polos*) estos giran a velocidad prácticamente fija si no se varían estos parámetros, por tal razón se preferían otros tipos de motores menos eficientes y más caros para estas aplicaciones, por lo planteado por Gutiérrez Arévalo, (1996) y Raúl Cobo, (2008). Los motores de inducción operan con un margen de deslizamiento de un 3%.

Para variar velocidad en los motores de inducción de rotor en jaula se usan varios métodos que se relacionan a continuación.

- Modificando números de polos.
- Variando la tensión en los bornes.
- Variando la frecuencia en los bornes.



- Mediante el control del deslizamiento rotórico.
- Por procedimientos mecánicos.
- Variando la resistencia del rotor bobinado.

La aplicación de uno u otro método depende del tipo de accionamiento que se va a utilizar, y la eficiencia que se espera lograr, para algunos de ellos se requiere tener acceso a la estructura de la máquina, imposibilitando usar esos métodos para la variación de velocidad de forma continua, una vez que se tenga el motor ya no es posible variar el número de polos, hay que rebobinarlo y en cualquier tipo de motor no se puede variar la resistencia del rotor. El más versátil de estos métodos es el de la variación de la tensión y la frecuencia a la entrada de la maquina mediante variadores de velocidad.

Según Raúl Cobo, (2008), los Convertidores de Frecuencia, también llamados Variadores de Frecuencia (VDF) o Inversores (*aunque realmente este nombre corresponde a una parte del VDF, por constituir el componente principal, muchos fabricantes usan esta denominación*), han venido a resolver el problema de poder usar los motores a velocidades variables sin disminuir significativamente su eficiencia, con lo que ahora estos motores conectados a estos equipos permiten ser usados en aplicaciones especiales. Estos dispositivos forman parte de la familia denominada Drivers en AC (*AC Drives*), la cual está constituida por otros equipos para comando de motores de corriente alterna, tales como arrancadores suaves, que se emplean sólo para la partida y parada de los motores, y no para modificar la velocidad en régimen permanente.

La alimentación con convertidor de frecuencia provoca que el comportamiento del motor y sus prestaciones difieran de las que son propias del motor alimentado con el régimen sinusoidal, según Jornet A. (2005), debido a los armónicos de alta frecuencia. Cuando se empezaron a usar los motores asíncronos con convertidor de frecuencia se hacían diseños especiales o modificaciones del diseño básico para alimentación sinusoidal. Sin embargo, hoy en día, al disminuir el contenido armónico de la señal del convertidor para potencias medianas y pequeñas, lo usual es tomar motores de serie normalizados y,

como máximo, reducir del 5 al 10% su potencia nominal, a despecho de que no sea suficiente para mantener sus correctas características de funcionamiento.

Cuando los ventiladores y sopladores son operados a velocidad constante y la presión de aire la salida es controlada por dámper, el motor opera cerca de la carga máxima todo el tiempo al margen de la salida suministrada. Gran cantidad de energía es disipada por estos dampers. Los sistemas de variación de velocidad permiten la operación óptima del equipo cumpliendo con los requerimientos del sistema. Para el funcionamiento eficiente del sistema hay que realimentar a través de sensores a la salida para casos donde el volumen de mineral es variable, porque de lo contrario no haría falta todo el aparataje de control que está presente en los variadores de velocidad. Al utilizar el variador de velocidad se ahorra la energía mecánica que anteriormente se disipaba en el dámper.

Para minimizar las pérdidas en el motor es necesario adecuar su velocidad con los requerimientos que exigen las cargas mecánicas. Lo más avanzado, y perfeccionado que se tiene hasta ahora son los Accionamientos de Velocidad Ajustable (AVA), comercialmente llamados variadores de velocidad, que constituyen en sí convertidores de frecuencia o Inversores Sinusoidales de Voltajes con modulación por ancho de pulsos (VSI, PWM o VFD por sus siglas en inglés), el funcionamiento práctico más usual en la industria de estos se reduce a la utilización constante del cociente de frecuencia y tensión, para así mantener aproximadamente constante la densidad del flujo, así como también permanece prácticamente constante el momento máximo, según lo planteado por Pérez Abril, (2010). Este funcionamiento de mantener proporcionales los parámetros del motor garantiza una alta eficiencia en este elemento del accionamiento.

Según catalogo Schneider (2010) En la industria, el 60% de la electricidad consumida es utilizada en motores para bombeo y ventilación y el 63% de esta energía se utiliza para aplicaciones con fluidos. Muchos de ellos con arrancadores suaves, esto significa que el motor funciona a máxima velocidad, aun cuando se requieren bajos niveles de flujo. Con frecuencia, son utilizados métodos de regulación o de control ineficientes y el consumo energético permanece alto.

Mientras que los dampers trabajan para mantener una presión constante en los ductos, una solución con variador de frecuencia ahorra más energía y reduce la complejidad de la instalación. En vez de los métodos antes mencionados, un accionamiento disminuye la velocidad del ventilador para suministrar los flujos y presiones requeridos, controlando el ventilador de extracción para conservar la diferencia de flujo de aire entre el abastecimiento y la extracción.

El aire es el medio escogido por los diseñadores de esta metodología de obtención de níquel más cobalto para transportar el mineral laterítico de una parte a otra de la planta piloto. En el análisis de la consulta bibliográfica hasta el momento no da respuesta a la problemática escogida, en cuanto a la energía disipada en los dámperes. En su mayoría aborda elementos aislados de los sistemas de transporte neumático y el ahorro energético con la sustitución del dâmpen por variadores de velocidad, pero no plantea la forma de lograr optimización mediante automatismo en el sistema de transporte neumático del mineral laterítico cubano.

Esto impone la necesidad de ejecutar una investigación para seleccionar variadores de velocidad con vista al aumento de la eficiencia en el transporte neumático en las industrias del níquel con tecnología carbonato amoniacal.

### **1.3 Ahorro energético mediante la correcta selección de variadores de frecuencia.**

En los variadores de velocidad hay una gran cantidad de ventajas que se pueden lograr, en parte asegurando que el sistema esté correctamente dimensionado, y en parte usándolo racionalmente. Otros tipos de cargas (elevadores, grúas, compresores, transportadores, máquinas herramienta, extrusoras, máquinas textiles, etc.) también ofrecen actualmente un importante campo para el ahorro, si se utilizan adecuadamente equipos eficientes.

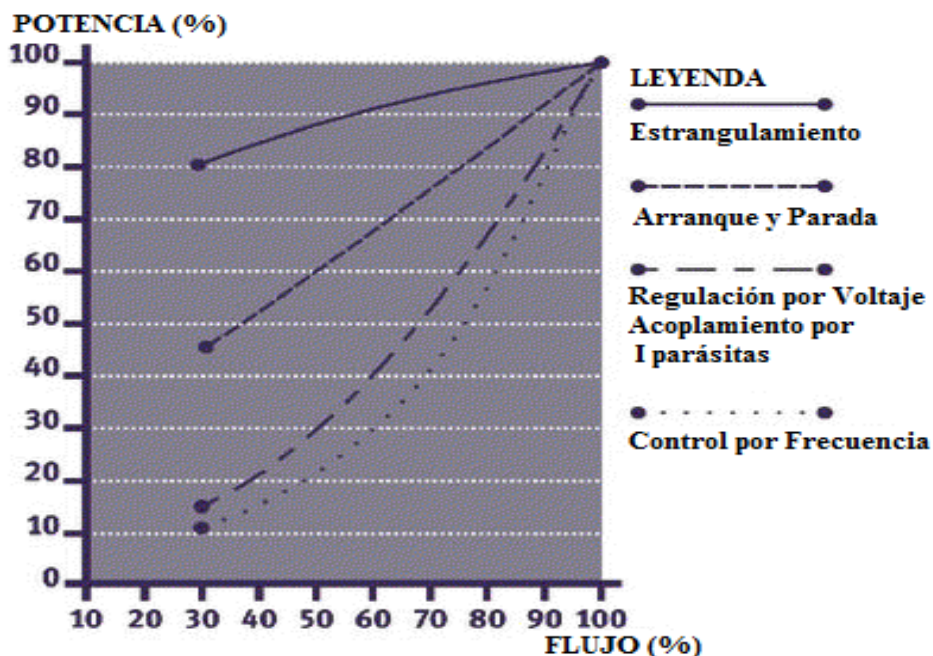
Un área que brinda grandes oportunidades de ahorro es en los casos en que se controla el flujo de agua o de aire por métodos de estrangulamiento (válvulas o compuertas) y se sustituye por métodos en que se varía la velocidad del motor que acciona la bomba.

El método más eficaz y eficiente para la variación de velocidad es hoy en día el uso de variadores de frecuencia aplicados a los motores asincrónicos, principalmente aquellos que emplean el principio de control por modulación del ancho de pulso (PWM).

#### 1.4 Control por variación de velocidad.

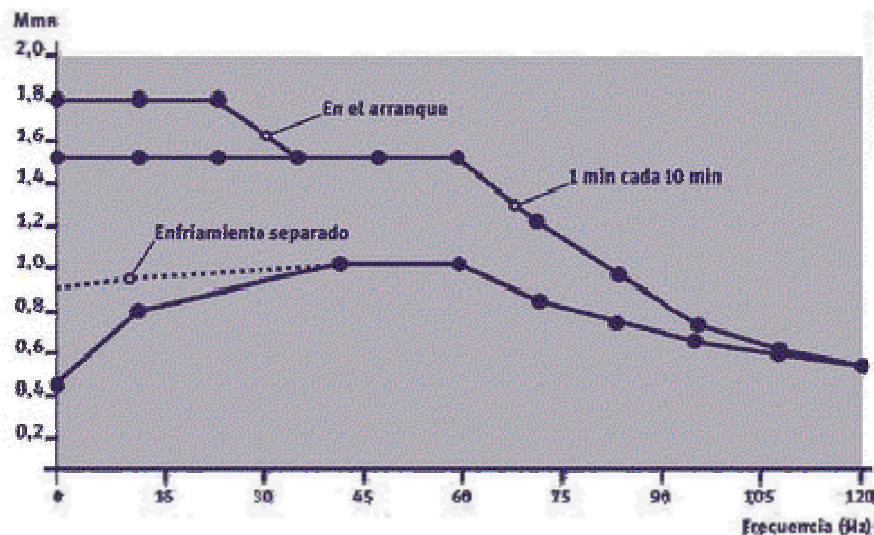
Por lo planteado por Percy R. y Viego Felipe (2011), con el estrangulamiento, la reducción de flujo se obtiene al precio de un incremento en las pérdidas, mientras que con el control por velocidad variable resulta posible ajustar las características de las bombas sin apenas incrementar las pérdidas; y los requerimientos de potencia son radicalmente reducidos según la velocidad disminuye, siempre y cuando se justifique la utilización de variadores para no incurrir en gastos innecesarios derivados de la nueva tecnología empleada y el tiempo de amortización sea bastante corto.

En la Grafica #1.1 se muestra una comparación aproximada entre el porcentaje de la potencia requerida para distintos porcentajes de flujo con diferentes tipos de control. Como puede observarse, el control por frecuencia resulta el más efectivo y la reducción que se logra en comparación con el estrangulamiento es sustancial.



Grafica 1.1 Consumo relativo de potencia en función del flujo con tipos diferentes de control.

Según Percy R. y Viego Felipe\* (2011) En la *Grafica #1.2* se aprecia una curva cargabilidad de un motor con un convertidor de velocidad. Este tipo de curva muestra el momento máximo continuo con respecto al momento nominal (*en unidades relativas: M/Mn*), para un motor totalmente cerrado con ventilación forzada (TEFC), en función de la frecuencia. Operando en las condiciones que establece esta curva, no se sobrepasa el calentamiento nominal que alcanza el motor cuando trabaja alimentado de una red a frecuencia y tensión sinusoidal nominales, y a plena carga. Además, en la gráfica se observa la zona de operación a bajas velocidades que requiere ventilación separada, así como los momentos que pueden desarrollarse en el proceso de arranque y las sobrecargas de corto tiempo permisibles.



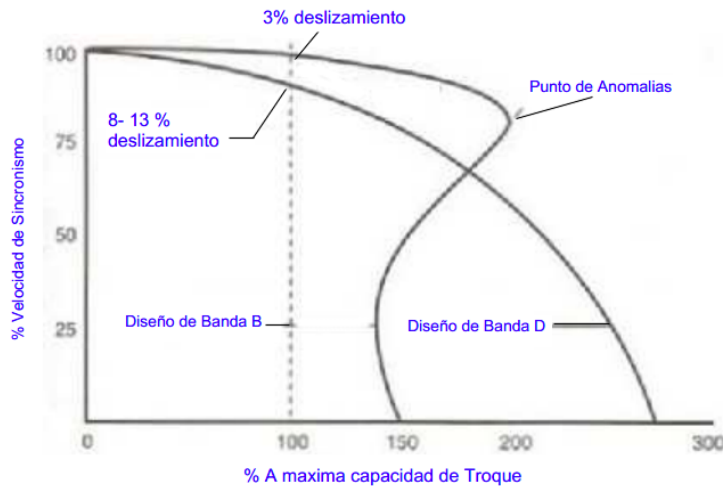
Grafica 1.2 . Cargabilidad de un motor con un convertidor de frecuencia.

### 1.5 Características de control del motor de CA.

La velocidad sincrónica del motor de inducción de CA es directamente proporcional a la frecuencia aplicada, según Voldek, A. I. Máquinas Eléctricas en el 1974, (Ver formula 1.1)

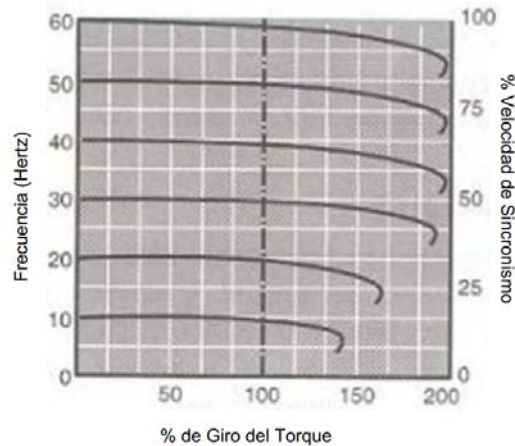
La diferencia entre dos velocidades se denomina deslizamiento, que normalmente se expresa en porcentaje. El porcentaje de deslizamiento está determinada por el diseño del motor, principalmente la resistencia del rotor.

NEMA ha asignado código de letras (A, B, C, D, etc.) para estandarizar las características del motor, incluyendo deslizamiento. El tipo más comúnmente utilizado es NEMA Diseño B con 3% de deslizamiento en condiciones nominales de funcionamiento. La figura #1.3 muestra la curva típica de velocidad / par para motores NEMA Diseño Banda D.



Grafica 1.3 – Típicos de par de velocidad en las características de voltaje y frecuencia

Como la frecuencia aplicada se cambia, el motor funcionará más rápido o lento, como se muestra en la Grafica # 1.4. El deslizamiento del motor (como porcentaje de la velocidad del motor síncrono) varía en proporción inversa a la frecuencia, donde un deslizamiento de 3% del motor a 60 Hz tendría un deslizamiento de 6% a 30 Hz o más pequeño en deslizamiento a 120 Hz. La velocidad del motor está limitada sólo por el convertidor de frecuencia de salida máxima, los requisitos de carga del par del motor, y la integridad mecánica del motor.



**Grafica 1.4** - Típicas curvas de velocidad contra par para diferentes frecuencias.

### 1.6 Método de control por frecuencia.

El método se fundamenta en que la velocidad sincrónica del campo magnético rotatorio de un motor asíncrono puede ser controlada por medio de la variación de la frecuencia de la línea, ya que:

$$N_s = \frac{120 * f}{p} \quad 1.1$$

**Dónde:**

**$N_s$**  → Velocidad Sincronica (RPM)

**$f$**  → Frecuencia de la línea (Hz)

**$p$**  → Números de polos.

A fin de mantener la densidad de flujo aproximadamente constante y que no haya afectaciones en el momento que desarrolla el motor, la tensión de línea debe variarse también proporcionalmente a la frecuencia, es decir, la relación entre  $U_n$  y la  $f$  debe ser aproximadamente constante.

A veces es aconsejable una desviación con respecto a esta regla en los casos en que el momento de la carga disminuya marcadamente con la reducción de la velocidad, por ejemplo, en los accionamientos de cargas centrífugas, como bombas y ventiladores.

En este caso, al disminuir la tensión en mayor proporción que la frecuencia, se produce una reducción del flujo y mejoran los indicadores energéticos del motor, al mismo

tiempo que la disminución del momento máximo no es peligrosa desde el punto de vista de la capacidad de sobrecarga.

En adición a su función de regular la velocidad, los convertidores de frecuencia actuales ofrecen otras características ventajosas. Una nueva generación de accionamientos de velocidad variable, que permite que los motores asíncronos sean tan controlables y eficientes como sus contrapartes de corriente directa, ha evolucionado rápidamente con los avances de la electrónica del estado sólido y sin los grandes costos que anteriormente implicaba. Los nuevos sistemas de accionamiento, como los que emplean control por modulación del ancho del pulso (PWM), permiten lograr la regulación de la velocidad con una alta eficacia y eficiencia. En la figura #1.1 se muestra un esquema modular de un sistema de este tipo.

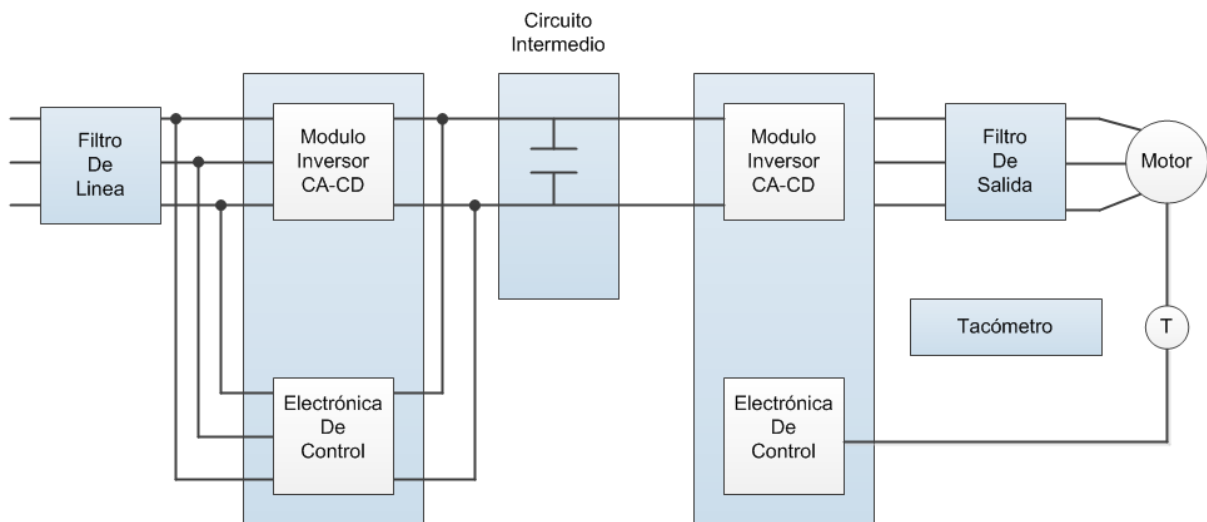


Fig. 1.1 - Esquema modular de un variador electrónico de velocidad tipo PWM.

Sin embargo, no siempre el variador y el motor se adquieren en el mercado como un todo, en el cual el fabricante ha compatibilizado adecuadamente los requerimientos, características y parámetros de cada uno de esos dos equipos. Es frecuente que se adquiriera un convertidor de frecuencia para aplicárselo a un motor convencional existente, con el propósito de controlar su velocidad para, por ejemplo, cumplir el mencionado objetivo de sustituir un sistema de control de flujo de agua que emplea válvulas de estrangulamiento.



En esos casos hay que tener en cuenta una serie de aspectos relacionados con las características del accionamiento y del motor, que de no hacerlo puede conducir a costosas fallas. A continuación se brindan algunas orientaciones que, aplicándolas, evitan que se presenten problemas operacionales y fallas.

## **1.7 Teoría para la regulación del flujo en ventiladores utilizando variador de Velocidad.**

Según Gutiérrez Arévalo, 1996, para mover el aire a través de una extracción localizada o un sistema de ventilación general de un local es necesario aportar energía para vencer las pérdidas de carga del sistema. En la gran mayoría de los casos el aporte de energía proviene de máquinas denominadas ventiladores aunque, en algunos casos, la ventilación se puede realizar por convección natural sin el uso de los ventiladores.

Los ventiladores son las máquinas más usadas para producir el movimiento del aire en la industria. Su funcionamiento se basa en la entrega de energía mecánica al aire a través de un rotor que gira a alta velocidad y que incrementa la energía cinética del fluido, que luego se transforma parcialmente en presión estática. Estos dividen en dos grandes grupos: los ventiladores axiales y los ventiladores centrífugos.

### *1.7.1 Ventiladores centrífugos.*

Según Escoda S en su “Manual práctico sobre ventiladores”, en el 2003, en estos ventiladores el aire ingresa en dirección paralela al eje del rotor, por la boca de aspiración, y la descarga se realiza tangencialmente al rotor, es decir, que el aire cambia de dirección noventa grados (90°). Este tipo de ventiladores desarrolla presiones mucho mayores que los ventiladores axiales, alcanzando presiones de hasta 1500 milímetros de columna de agua (mmcda) y son empleados, mayormente, en los sistemas de ventilación localizada.

El principio de funcionamiento de los ventiladores centrífugos es el mismo de los usados en bombas centrífugas. Están constituidos por un rotor que posee una serie de paletas o álabes, de diversas formas y curvaturas, que giran aproximadamente entre 200 y 5000 rpm dentro de una caja o envoltura.

Los sistemas de control de regulación de velocidad, o variadores de velocidad, son dispositivos que permiten controlar a voluntad la velocidad de funcionamiento de los motores de corriente alterna.

Los variadores de velocidad son mecanismos electrónicos que permiten variar en forma continua la velocidad y el par de los motores asíncronos trifásicos, convirtiendo la frecuencia y tensión de la red en magnitudes variables.

El uso de reguladores de velocidad permite mejorar el rendimiento de los motores, ajustando su funcionamiento al par y velocidad que requiere la aplicación en cada momento.

### **1.8 Reguladores electrónicos de velocidad.**

Las características que debe cumplir el regulador vendrán definidas por la precisión y prestaciones requeridas para el accionamiento de la aplicación y por tanto, determinará el tipo de control a realizar. Los sistemas de control de velocidad de motores de inducción se clasifican en tres tipos:

- *Sistemas de regulación con control escalar.* Permiten controlar las variables de control (tensión y frecuencia) en régimen permanente.
- *Sistemas de control de flujo en el entrehierro.* Para el funcionamiento de velocidades menores que la velocidad base, un motor puede dar el par nominal a cualquier velocidad, siempre que el flujo sea el nominal. Se compara el flujo medido con el de referencia, generándose la consigna de tensión para control de velocidad del motor.
- *Sistemas de control de intensidad del estator.* Son sistemas más complejos que los basados en el control de tensión, y necesitan siempre realimentación.

### **1.9 Aplicaciones más comunes de los reguladores de flujo.**

A continuación se tratan algunas aplicaciones de las más comunes dentro de la industria, comparando el uso de variadores electrónicos de frecuencia con otros

sistemas de regulación o el trabajo sin reguladores y explicando como se produce el ahorro energético en cada caso.

### *1.9.1 Ventiladores.*

Al igual que las bombas, se trata de equipos habituales en la industria en los que resulta muy ventajosa la aplicación de variación electrónica de velocidad, produciendo ahorros energéticos importantes. Existen las siguientes formas de regulación de velocidad

#### 1. Estrangulamiento mediante persianas

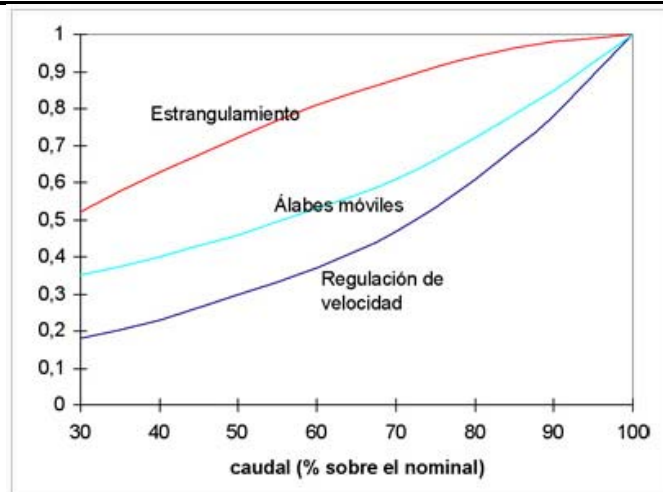
Es el método con peor resultado energético. El cierre de la persiana produce una mayor resistencia al paso de fluido, introduciendo una pérdida adicional a la instalación. Se tiene que generar una mayor presión en el caudal, no pudiendo llegar a suministrar el mismo caudal. Esto hace que el sistema consuma una energía mayor que la estrictamente necesaria, resultando en un bajo rendimiento de la instalación.

#### 2. Regulación mediante álabes móviles

Los álabes del ventilador tienen una posición variable, facilitando o entorpeciendo el paso de fluido y regulando así el caudal suministrado. No se suele utilizar debido a que es una solución mucho más cara, constructivamente, que el empleo de persianas y que requiere mayores costes de mantenimiento.

#### 3. Variación electrónica de velocidad

El caudal se regula ajustando la velocidad del motor a la requerida por el sistema, reduciéndose considerablemente la potencia consumida respecto a las opciones anteriores que trabajaban en todo momento con un sistema sobredimensionado. Se trata, por tanto, de un sistema mucho más eficiente energéticamente, por lo planteada por Raúl Cobo en el 2008.



Gráfica 1.6 Eficiencia en función del Caudal

### 1.10 Medidas de eficiencia.

La instalación de un sistema de regulación electrónica de velocidad representa en sí una importante medida de eficiencia energética.

A pesar del coste que supone la inversión en un sistema de ajuste electrónico de la frecuencia para controlar la velocidad de los motores, el desarrollo en precisión y fiabilidad ha alcanzado cotas tan elevadas que el coste inicial se justifica por la mejora sustancial de los resultados y por la bajada de costes debida a la reducción de pérdidas y en mantenimiento.

El valor del ahorro energético que se puede lograr con la instalación de regulación electrónica de velocidad depende principalmente, como se ha visto, del tipo de carga que esté acoplada al motor. Así, los motores con cargas con par proporcional al cuadrado de la velocidad, tales como bombas, compresores o ventiladores, son los susceptibles de un mayor ahorro energético.

Un aspecto a tener en cuenta en la valoración del consumo de energía ahorrado es la forma de regulación empleada hasta el momento en que se plantea la instalación de reguladores electrónicos. El control de la instalación de forma mecánica (por ejemplo mediante válvulas de estrangulamiento en bombas o persianas en ventiladores), o la ausencia de control, produce sobredimensión del mecanismo, dando lugar a un exceso

de potencia demandada. La instalación de reguladores electrónicos permite un ahorro importante de energía.

Por otra parte, la regulación electrónica de velocidad permite suavizar los críticos procesos de arranque y paradas (limitando las altas intensidades de arranque y evitando caídas de tensión), así como realizar un trabajo más continuo y suave del proceso. Se disminuye de esta forma el número de averías, las paradas del proceso y el coste en mantenimiento, además de prolongar la vida útil de la máquina. Por tanto, la aplicación será especialmente interesante en instalaciones envejecidas o que tienen que soportar grandes esfuerzos.

Un parámetro esencial a la hora de estimar el ahorro derivado de la instalación de la regulación electrónica de velocidad es el tiempo total de trabajo de la máquina y su régimen de trabajo. Cuanto mayor sea el tiempo de trabajo de la máquina, mayor será el ahorro producido y menor el tiempo de amortización de la inversión realizada.

La variación de frecuencia es especialmente atractiva en sistemas multimotor, cuando una gran cantidad de pequeños motores de corriente alterna son alimentados simultáneamente con la misma frecuencia y tensión. En tales instalaciones, el coste del convertidor de frecuencia se justifica por la reducción significativa del coste de la máquina debida al gran número de motores cubiertos.

La decisión de instalar un regulador de velocidad debe contemplar, además del ahorro energético y la rapidez en la amortización de la inversión realizada, otras ventajas de la regulación de velocidad como la reducción en averías, paradas y costes de mantenimiento o mejoras en la calidad y rentabilidad del sistema productivo.

La instalación de variadores electrónicos de frecuencia ofrece otras mejoras como la compensación del factor de potencia y disminuciones considerables del nivel de ruido generado.

### **1.11 Variador de velocidad.**

Un variador de frecuencia, VFD por sus siglas en inglés (Variable Frequency Drive) o bien AFD (Adjustable 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.

El principio de funcionamiento del variador de velocidad consiste en convertir el voltaje de CA a un voltaje de CD por medio de un puente rectificador trifásico compuesto por seis diodos para posteriormente convertir ese mismo voltaje de CD a un voltaje de CA por medio de un puente inversor trifásico compuesto por seis transistores de potencia IGBT, los cuales controlan el voltaje de CA variando su frecuencia.

La variación de velocidad se basa en la transformación de energía eléctrica a la frecuencia de la red eléctrica a frecuencia variable, utilizando para ello dispositivos de electrónica de potencia.

El convertidor es el elemento principal dentro de los reguladores de velocidad.

Los distintos tipos de convertidores existentes se caracterizan por el tipo de inversor utilizado, existiendo:

*Puente inversor de onda cuadrada (VSI):* se comporta frente a la máquina como una fuente de tensión. Ofrece las siguientes ventajas: precio bajo, alta fiabilidad, elevada frecuencia máxima de salida, posibilidad de control multimotor y control en bucle abierto o cerrado. Utilizado para potencias inferiores a 100 kW.

*Inversor PWM (modulación de ancho de pulso):* es una alternativa al inversor VSI que ofrece unas características distintas, como altas prestaciones dinámicas. Y es utilizado para potencias inferiores a 100 kW.

El inversor PWM con control de corriente se controla la tensión en todo momento para que la corriente consumida por el motor sea la dada por una referencia, forzando así a que se comporte como una fuente de intensidad (controlando así el par directamente).

*Inversor conmutado CSI:* Es un inversor con salida de corriente de forma cuadrada y frecuencia variable a voluntad. Presenta las ventajas como el control por

intensidad, la posibilidad del paso de energía del motor a la red, y además es un dispositivo robusto. Se utiliza para potencias superiores a los 200 kW.

La siguiente tabla muestra las características generales de los inversores.

Tabla # 1.1 – Características Generales de los Inversores.

	VSI	CSI	PWM	PWM control por Corrientes
<b>Armónicos en red y motor</b>	Grandes	Grandes	Pocos, red onda cuadrada	Pocos, red onda cuadrada
<b>Factor de potencia en red</b>	Malo	Malo	Bueno	Bueno
<b>Coste total equipo</b>	Alto	Alto	Alto	Alto
<b>Cuadrantes de trabajo</b>	2	4	2	2
<b>Eficiencia</b>	Medio	Buena	Buena	Buena
<b>Facilidad de mando y control</b>	Simple	Simple	Complicada	Complicada
<b>Robustez</b>	Alta	Muy alta	Media	Media

La tecnología más utilizada en el mercado es la basada en inversores PWM, dependiendo también de la aplicación a que vaya destinado.

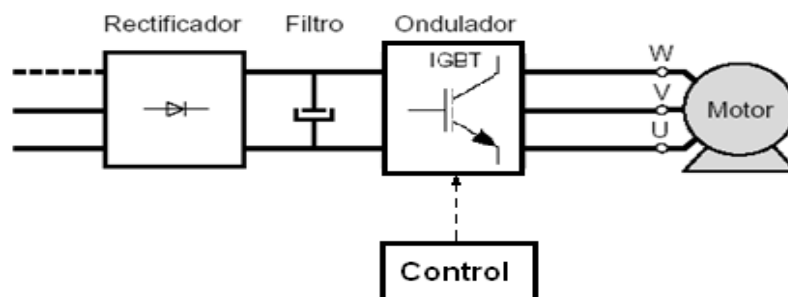


Figura. 1.2 Esquema simplificado de un VFD.



Figura 1.3 Variador de Velocidad ABB

### **1.12 Ventajas y desventajas del empleo de los variadores de velocidad en accionamientos electricos.**

En el Anexo # 3 se muestran las características de comparación entre los accionamientos de motores de uso estándar y con variadores de velocidad.

#### **Ventajas.**

- ✓ El variador de velocidad no tiene elementos móviles, ni contactos.
- ✓ La conexión del cableado es muy sencilla.
- ✓ Permite arranques suaves, progresivos y sin saltos.
- ✓ Controla la aceleración y el frenado progresivo del accionamiento.
- ✓ Limita la corriente de arranque.
- ✓ Permite el control de rampas de aceleración y deceleración regulables en el tiempo.
- ✓ Consigue un ahorro de energía cuando el motor funcione parcialmente cargado, con acción directa sobre el factor de potencia
- ✓ Puede detectar y controlar la falta de fase a la entrada y salida de un equipo. Protege al motor.
- ✓ Puede controlarse directamente a través de un autómatas o microprocesador.
- ✓ Se obtiene un mayor rendimiento del motor.
- ✓ Nos permite ver las variables (tensión, frecuencia, r.p.m, entre otras...).



## Desventajas.

- ✓ Es un sistema caro, pero rentable a largo plazo.
- ✓ Requiere estudio de las especificaciones del fabricante.
- ✓ Requiere un tiempo para realizar la programación al variador.

### 1.13 Analizador de redes PQM.

Para las pruebas realizadas se utilizó un analizador de redes (PQM), el cual fue el encargado de almacenar los diferentes valores eléctricos medidos, los cuales fueron de gran utilidad para la realización de esta tesis, del cual se hace una breve descripción de sus cualidades y su funcionamiento.



Figura 1.4 Vista del Power Quality Metering, PQM

#### 1.13.1 Características estándar.

El PQM (Power Quality Metering) es un dispositivo para realizar mediciones digital/analógicas, el dispositivo proporciona continuo seguimiento a un sistema de energía. Proporciona mediciones de corriente, tensión, potencia activa, reactiva y energía, así como su costo, del factor de potencia y frecuencia. Cuando se quiere realizar un monitoreo de un sistema trifásico una PQM portátil es una elección ideal. La

PPQ adicionalmente actúa como una herramienta de gestión de energía y una herramienta de solución de problemas.

El PQM puede proporcionar a los usuarios avanzadas características para el seguimiento y medición que incluye la versatilidad de montaje y visualización en panel, con ofertas de interfaz local. Además tiene implícito puerto RS485 Modbus para la comunicación y para la programación.

Cada valor medido es muestreado 64 veces por ciclo para 0,2% de precisión verdadera True RMS o el desplazamiento (fundamental).

- **Alarmas.**

Cualquiera de las salidas asignables se puede utilizar para activar una alarma para aplicaciones específicas para mostrar simples mensajes de alarma de formas fáciles.

- **Comunicaciones.**

La versión estándar viene equipada con un puerto RS232 frontal, que puede ser usado para extraer los datos medidos, facilidad de impresión e informes o análisis de los problemas sin interferir en la acción principal de la comunicación. El PQM pueden ser utilizado como unidades independiente o en forma de cascada, permitiendo comunicarse hasta un total de 32 equipos, independiente o formando parte de un sistema de SCADA.

- **Transductor.**

Este presenta cuatro salidas analógicas: estas se pueden utilizar para reemplazar transductores analógicos. Las señales de salida se pueden seleccionar a partir de cualquiera de los parámetros medidos para interfaz directa a un PLC u otro equipo. Además presenta tres relés de salida y cuatro entradas digitales: los parámetros medidos a partir de la PQM pueden ser combinado con puntos de referencia y E / S para aplicaciones de control, los relés de salida también pueden ser controlados a través del puerto de comunicación.

- **Captura de forma de onda.**

---

La tensión y la forma de onda de corriente pueden ser capturadas y se muestra en un PC utilizando el programa PQMPC suministrado con el PQM o utilizando software de terceros.

- **Registro de eventos.**

Los eventos de entrada y salida pueden ser almacenados en un registro de eventos hasta 40, mostrados con la hora y la fecha del reloj interno. Esto es útil para el diagnóstico de problemas y sistema de actividad.

### **1.14 Conclusiones.**

En el capítulo se realiza un minucioso estudio del estado del arte donde se exponen las teorías más relevantes en el mundo en cuanto al transporte de mineral y a la regulación del flujo con la utilización de accionamientos mecánicos y de cómo los automatizados pueden llegar a ser mucho más efectivos. Se exponen los elementos y partes fundamentales de los accionamientos a variadores de velocidad y las características de los instrumentos de medición.

---

## **CAPÍTULO 2. “MATERIALES Y MÉTODOS”.**

### **2.0 Introducción.**

En el presente capítulo se describe el funcionamiento técnico de la sección de molienda de la planta piloto Moa, con el objetivo caracterizar el flujo tecnológico de esta parte de la planta, además se caracterizan técnicamente una serie de variadores de velocidad para luego de someterlos a una comparación con base a las necesidades del sistema poder elegir una posible variante que cumpla con los requerimientos del sistema.

### **2.1 Descripción del flujo tecnológico de planta piloto Moa.**

La Planta Piloto de Moa, CEDINIQ, se ocupa de procesar mineral laterítico para la extracción de níquel más cobalto a escala semi-industrial, el objetivo fundamental de esta entidad es la realización de pruebas y experimentos para las industrias del níquel de la zona oriental del país según *‘Operador de secado y molienda en la planta piloto Moa’*.

El mineral objeto de investigaciones es extraído de la mina y tratado planificadamente para facilitar su homogeneización, luego es transportado por camiones para una plazoleta a cielo abierto que existe en la planta, la transportación ayuda a la homogeneización y luego en la plazoleta se completa este proceso.

El cargador frontal alimenta el mineral al Tolvete (CF-1, con capacidad de 1.6 tonelada t), que posee dos cribas fijas; la primera de 100 mm y la segunda de 50 mm, puede adicionarse a solicitud de clientes otra malla del tamaño que se solicite. En el Tolvete se produce un cribado preliminar: Las partícula de mineral fraccionada a más de 100 mm se reducen en el Triturador de Quijadas (BJ-1, con capacidad de 4 tonelada hora t/h) hasta - 50 mm y son descargadas junto a los -50 mm que vienen del material inicial. El mineral atraviesa la parrilla y cae en la Banda Transportadora (CB-1, cap. 5 t/h). En caso de que se disponga de una tercera criba entonces las fracciones mayores de la nueva clase se sacan del proceso o son reducida manualmente e incorporada al proceso según contrato con los clientes. La banda transporta el mineral hasta el Alimentador de Esteras (CA-1, cap. 3 t/h), cuya capacidad está regulada por una chaveta colocada en la parte inferior de la Tolva del Secador (TB-3, con capacidad de 2.4 tonelada t) la cual está situada sobre él y dosifica la carga al Secador Rotatorio (DR 1/1, con capacidad de 1.5 tonelada hora t/h),

donde es secado desde un 30 - 36 % hasta un contenido de 3 - 5 % de humedad. Para proporcionar el secado está instalado un quemador en la cámara de combustión, que bajo determinadas condiciones produce los gases con la temperatura requerida para ello.

El mineral atraviesa el secador y sale por la zona de descarga al Transportador Vibratorio (CV-1, cap. 1.5 t/h), que descarga, a su vez, en el Elevador de Cangilones (CE-1, cap. 1,5 t/h), que lo conduce a la Zaranda Vibratoria (SS-1, cap. 2,5 t/h), del área de molienda.

Al ser succionados por el Ventilador Centrifugo (PF-1 cap. 8000 m<sup>3</sup>/h, los gases de combustión del secador pasan por un sistema de limpieza, consistente en: Un Ciclón (GD-1, recupera 1,5 t/h), un Filtro de Pantalones (FB-1, recupera 0.5 t/h) y un lavador tipo Venturi Scrubber (SQ-1 cap. 3682 m<sup>3</sup>/h). El mineral (polvo) recuperado en el ciclón y el filtro es descargado por dos Alimentadores Rotatorios (CG-1 para el ciclón, con cap. 1,5 t/h y CG-2 para el filtro, con cap. de 0,5 t/h), que están colocados en sus descargas, a un Transportador Sinfín (CS-1, cap. 3 t/h), que lo conduce al Elevador de Cangilones (CE-2, cap. 3 t/h) y de aquí a los Silos de Almacenaje (TB- 6 ó 7, con capacidad ambos de 35 t), en el lavador el flujo es tratado con agua y las partículas van al drenaje de la planta y el flujo limpio es enviado a la atmósfera por el Ventilador Centrifugo PF-2, a través de la Chimenea NP-1.

El mineral seco llega a la Zaranda (SS-1, cap. 2,5 t/h); Aquí se produce una clasificación de control del mineral a molienda. El equipo posee un paño de abertura de 6 mm; al producirse la clasificación se obtiene dos fracciones granulométricas.

- Mas 6 mm: Esta fracción se envía al Molino de Martillos (*BH-1 cap. 2,5 t/h*) y se reduce su tamaño a menos de 3 mm y cae al Molino de Bolas *BB-1 cap. 3,5 t/h*).

Existe la posibilidad de enviar directamente al molino estas fracciones a través de un tubo, sin ser reducido su tamaño.

- Menos 6 mm: Caen directamente a la Tolva (*TB-4 cap. 7 t*) para la molienda.

El objetivo de la molienda es reducir el tamaño de las fracciones para obtener en el producto final el mineral con las condiciones adecuadas para el proceso posterior además se tiene en cuenta lo contratado con los clientes.

El molino en su interior posee 2,6 t de bolas, con diámetro de 25 y 30 mm, que realizan la reducción del tamaño del mineral y luego de estar el tiempo de retención necesario es descargado en el circuito que eleva el mineral hasta el Clasificador Mecánico (SP-1, cap. 3,5 t/h), el que hace una segunda clasificación de control, esta vez del mineral molido, donde las partículas gruesas son retornadas al molino y las preparadas con las exigencias requeridas, se recuperan en el Ciclón (GD-2, cap. 2,5 t/h) en el recorrido del flujo. El circuito de la molienda lo cierra el Ventilador Centrifugo (PF-4, cap. 7000 m<sup>3</sup>/h) y con su ayuda es que el mineral puede elevarse al descargar el molino. Este producto terminado cae por gravedad al Elevador de Cangilones CE-2) y de aquí a los Silos de Almacenaje.

Existe una cantidad de mineral fino, preferentemente de 0,044 mm, que por su tamaño no es recuperado en el Ciclón y se mantienen en el circuito para ser obtenido en el sistema de limpieza de la unidad de molienda, en éste el encargado de la succión de los gases es el Ventilador Centrifugo (PF-5, cap. 1700 m<sup>3</sup>/h) y pasa por un sistema de limpieza consistente en un Filtro de Pantalones (FB-2, cap. 0,5 t/h) y un lavador tipo Vénturi-Scrubber (SQ-4, cap. 3060). El recuperado en el Filtro es descargado por el Alimentador Rotatorio (CG-4, cap. 0,5 t/h), colocado en su descarga, al Elevador de Cangilones (CE-2) que lo lleva a los Silos de Almacenaje, luego los gases se tratan con agua salen limpios y son enviados a la atmósfera por el Ventilador Centrifugo (PF-10, cap. 3475 m<sup>3</sup>/h), a través de la Chimenea NP-2. Existen sistemas de recuperación del polvo que se genera por la dinámica de los equipos (llamados de Despolvoración), el primero está formado por el Ventilador Centrifugo (PF-6 cap. 1775 m<sup>3</sup>/h), y un Filtro de Pantalones (FB-3 cap. 1770 m<sup>3</sup>/h), este succiona desde la Zaranda y los Elevadores 2 y 3. El recuperado en el filtro es descargado por una Válvula Rotatoria (CG-5 cap. 0,5 t/h), al Elevador de Cangilones CE-2 y de éste a los Silos, mientras que los gases se introducen en el Venturi Scrubber de molienda para su limpieza antes de enviarse a la atmósfera. Otro ventilador esta en el elevador CE-1 cuya succión está colocada en la línea de los ventiladores 1 y 2, y por último en la Zaranda existe una línea de succión que se introduce al Venturi de molienda, como se muestra en la figura 2.1.

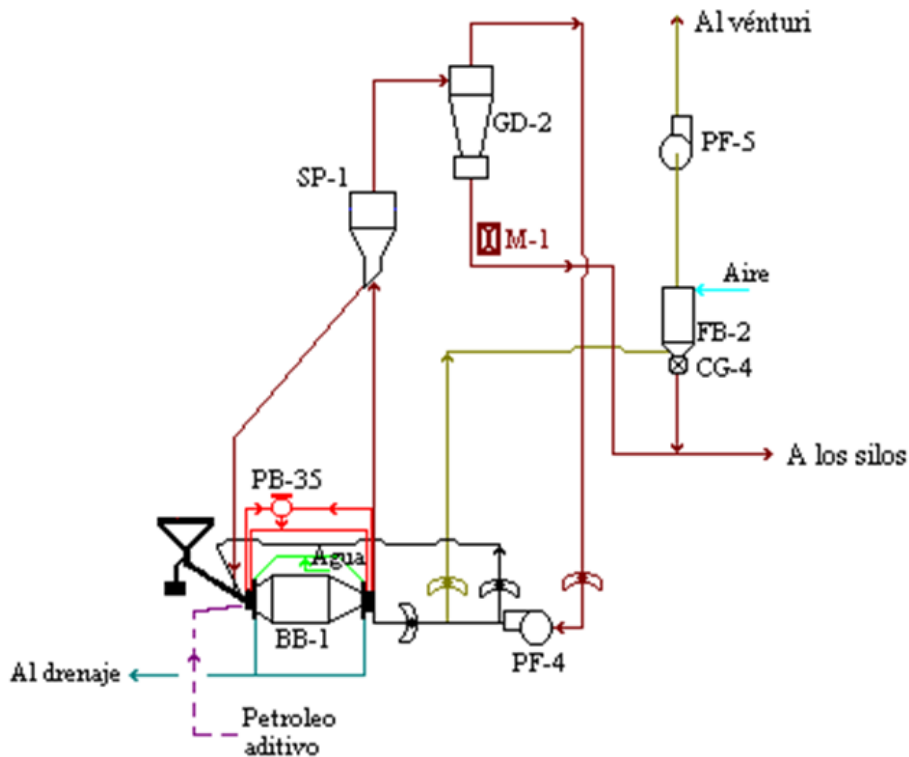


Figura 2.1 - Circuito de circulación de mineral por sección de molienda, CEDINIQ

## 2.2 Características del ventilador centrífugo PF- 4.

Está constituido por una turbina de acero con paletas planas y radiales situadas en un envoltorio de chapa, el rodete va montado sobre un dispositivo mecánico constituido por un eje de acero montado sobre dos soportes, el eje le transmite el movimiento a través del accionamiento por poleas y correas. Puede ser también conectado directamente en dependencia de las exigencias tecnológicas. Su función es garantizar el régimen aerodinámico necesario en el circuito de molienda para el transporte neumático de mineral.

Características técnicas del Ventilador centrífugo PF- 4.

- Presión estática, 450 mm col H<sub>2</sub>O.
- Velocidad del rodete, (1800 rpm).
- Capacidad flujo de diseño, 7000 m<sup>3</sup>/h.

- Suministrador, España.
- Características eléctrica del motor, 440 V; 25 A; 1740 rpm, 15 kW.
- Construcción, Acero regular.
- La transmisión del Motor por polea-correa.

### **2.3 Descripción del Equipamiento de medición.**

Para la toma de las mediciones se utilizó el PQM (*Power Quality Meter*), es una opción ideal cuando el control continuo de un sistema trifásico lo requiere. Proporciona la medición para la toma de mediciones de la corriente, del voltaje, de la potencia activa, reactiva y aparente, coste de la energía, del factor de potencia y de frecuencia, así como otras las cuales son imprescindibles para el buen análisis de un sistema.

Este consta con 4 relays (*salidas digitales*) asignables y programables que permiten que las funciones de control sean agregadas para los usos específicos. Esto incluye sobre / bajos niveles de alarma o disparos, ya sean ocasionados por valores de corriente o voltaje, desequilibrio, y control de la corrección de factor de energía. Además posee entradas digitales programables, una entrada analógica (*4-20 mA*), dos salidas analógicas, y comunicación vía SR-485 Profibus.

En este caso se utilizó para las mediciones de las variables en la salida del variador de velocidad, el PQM de uso portátil. Este presenta ganchos de medición (transformadores de corrientes), de 1000/5 A, y puntas para la medición de tensión, hasta los 600 Voltio (V).

Las mediciones se realizaron puntuales cada 1 minuto y capturas de forma de onda por cada experimento, la información registrada se guarda en su memoria interna y luego de culminar el experimento se extrae y procesa la información, como se muestra en el **anexo #**.



---

### 2.3.1 Programación de la PQM

La programación de este equipo de forma general es muy sencilla, solo basta con conocer los niveles de tensión, corriente y valores a medir, los cuales eran declarados al equipo vía comunicación con una PC a través del software.

En este caso se utilizaron los ganchos de corriente que trae la PQM, los cuales tienen una relación de transformación de 1000/5 amperes y la medición de tensión se realizó sin transformador de voltaje, ya que el equipo tiene un rango de medición hasta los 600V como se muestra en la figura 2.2.

Tabla 2.1 Programación de la PQM.

N°	Datos	Ajuste
1	Corriente primaria TC.	1000 A
2	Voltaje nominal directo	600 V
3	Tipo de conexión.	Directo
4	Relación de transformación del TP	1
5	Frecuencia del sistema	60 Hz

Además de esta programación base, se realizaron las programaciones pertinentes para realizar la captura de las mediciones, la cual se hizo a través del software del analizador de redes (espacio donde se ajustan las variables a medir así como donde se establecen los tiempos de las respectivas mediciones).

#### **Variables de mediciones declaradas.**

1. Potencia activa trifásica ( $P$ ).
2. Potencia reactiva trifásica ( $Q$ ).
3. Potencia aparente trifásica ( $S$ ).
4. Corriente por cada fase ( $I_a$ ,  $I_b$  y  $I_c$ ).
5. Voltaje de fase y línea ( $U_{ab}$ ,  $U_{bc}$ ,  $U_{ca}$ ,  $U_{an}$ ,  $U_{bn}$  y  $U_{cn}$ ).
6. Factor de potencia ( $\cos \Phi$ ).

## 7. Frecuencia (Hz).

Estos parámetros fueron ajustados según se muestra en la siguiente figura 2.3, donde las variables a medir se van activando en cada ventana del software, y posteriormente se activa la medición a través del botón de arranque.

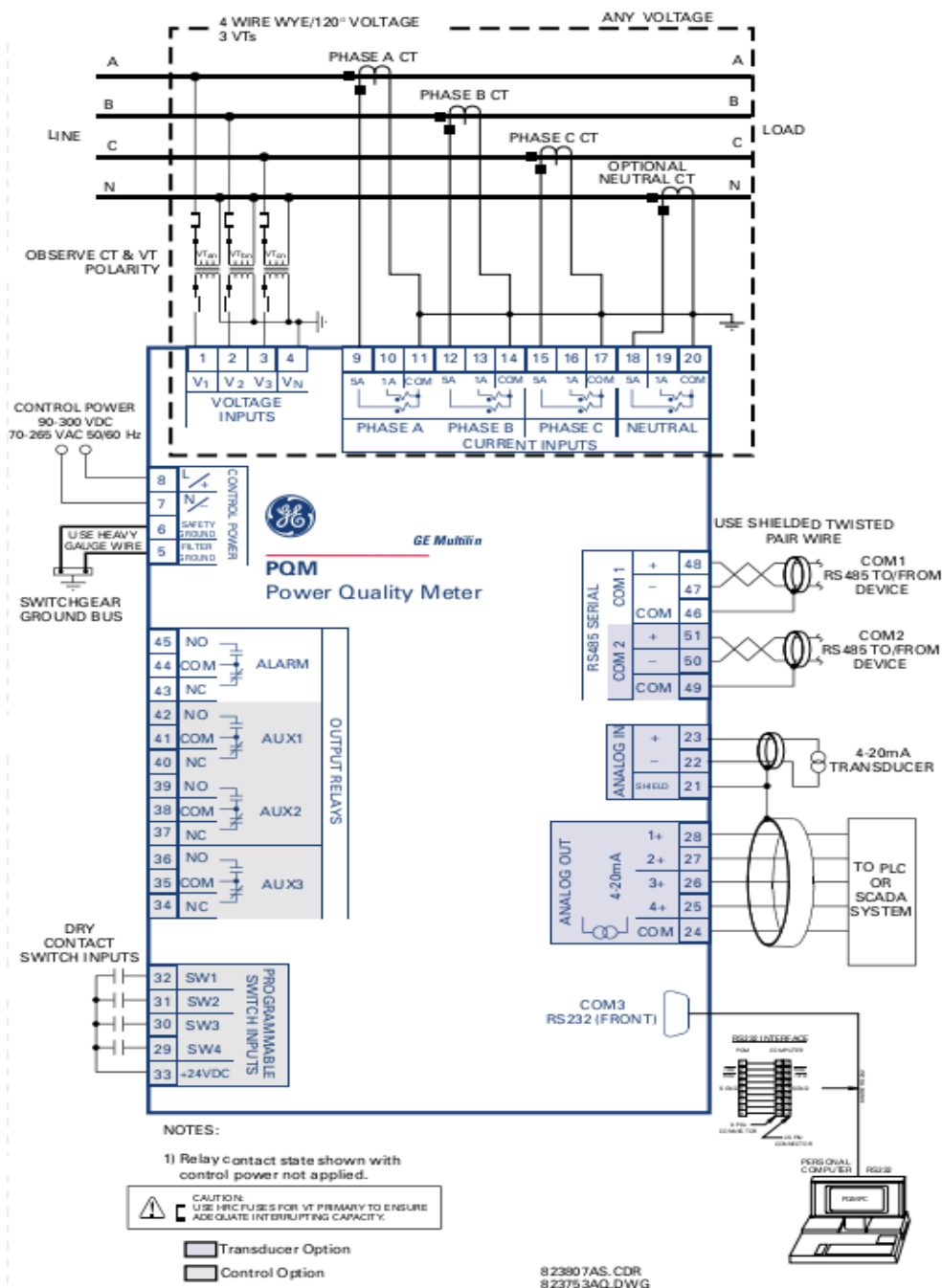


Figura 2.2 Esquema completo del alambraje físico del equipamiento PQM.

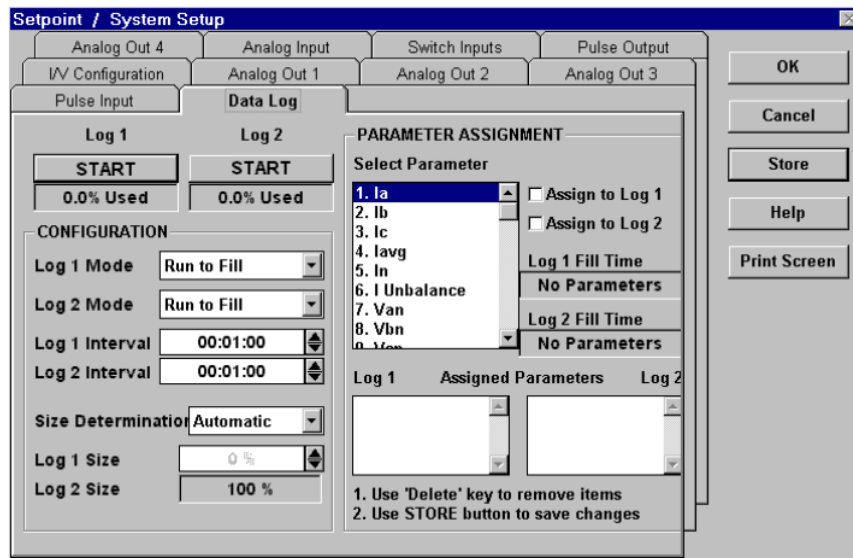


Figura 2.3. Representación del software, activación de la Data Logger.

El software utilizado es el perteneciente a la GE Power manager/PQM, el cual es parte de la Multilin, a través del cual se pueden realizar varias operaciones del equipamiento, así como análisis de la calidad de la energía y otros.

### 2.3 Planificación de los experimentos.

Con la realización de estos experimentos comprobaremos la de la fiabilidad de la operación del variador de velocidad en el proceso de molienda de mineral en la empresa “Planta piloto Moa, CEDINIQ” y el posible ahorro energético, para cada una de las posibles variantes de molienda: para los diferentes niveles de alimentación fresca de mineral, por ciento de bolas del molino y flujo de aire.

Programa de trabajo

Realizar un experimento factorial en planta piloto con los siguientes objetivos:

1. Demostrar confiabilidad del equipamiento montado.

El objetivo de este grupo de experimentos es demostrar la confiabilidad de la continuidad del proceso de molienda al usar el variador de velocidad seleccionado. Se realizar una serie de experimentos con el objetivo de simular cada una de las

condiciones posibles de trabajo de la planta, actuando en tres variables que son: la carga de bolas del molino M (t), Flujo de alimentación fresca  $Q_e$  (t/h) y velocidad del ventilador centrífugo, como se muestra en tabla 2.2.

## 2. Demostrar ahorro energético.

Del análisis de los valores de potencia para cada experimento y de la correspondencia de estos valores con los niveles de regulación de revoluciones por minuto, se determinara la influencia del resto de las variables del sistema sobre los valores de potencia consumidos.

Tabla 2.2. Cantidad de variables y sus escalones.

No. Exp.	Carga de bolas baja		
	$\varphi\%$ ,	$Q_e$ , t/h	$Q_a$ , m <sup>3</sup> /h
<b>27*3=81</b>	25	2,1	0,8
	35	2,8	0,87
	45	3.5	0.92

Cada una de estas variables se expresan en tres porcentajes, determinados según los márgenes habituales de trabajo de la planta. Al hacer el análisis factorial de las tres variables con sus tres escalones resultan 27 experimentos con tres réplicas cada uno para garantizar un margen de error mínimo en un total de 81 experimentos.

Con la realización de estas 27 combinaciones se garantizó cada uno de los casos de funcionamiento en régimen normal de la planta, si el variador es capaz de mantener el régimen aerodinámico para el transporte de mineral, demostrándose la fiabilidad del equipamiento montado para cada uno de los casos de estudio.

Las corridas para cada uno de estos experimentos se deben realizar durante 30 minutos y tomar como valores útiles los últimos 10 minutos donde el proceso se encuentra estable.

## **2.4 Análisis de posibles Variadores de velocidad.**

A continuación describiremos una serie de Variadores de Velocidad que se encuentran en nuestro entorno tecnológico de tres proveedores diferentes, con el fin de aportar elementos para poder realizar una correcta selección y elegir la variante que sea mas factible para la alimentación del motor de inducción que acciona el ventilador centrifugo de tiro forzado de mineral en la planta piloto Moa.

### **2.4.1 Variador de velocidad Yaskawa F7.**

El F7 es un poderoso controlador para motores de C.A. trifásicos, que se caracteriza por desarrollar múltiples acciones, desde las más sencillas aplicaciones industriales como pueden ser bombas y ventiladores hasta los más sofisticados y extremos requerimientos como comunicación en red e izaje de cargas, respectivamente.

Todo esto es posible gracias a la flexible e inteligente plataforma del F7, desarrollado para servicio normal y pesado, cuatro modos de control, opciones de comunicación en red, programa de aplicaciones específicas y una gran variedad de posibilidades de entradas/salidas estándar u opcionales.

El F7 se presenta programado de fábrica y listo para funcionar. Para una mayor simplicidad y claridad, el indicador alfanumérico es de 5 líneas por 16 caracteres con lectura seleccionable entre 7 idiomas. El teclado es intuitivo y dispone de función para copia de parámetros mediante la cual se pueden repetir parámetros de un equipo a otro. Para simplificar la programación los parámetros se han separado en dos grupos, inicio rápido y funciones avanzadas. Mediante el programa Drive Wizard, disponible sin costo, es posible comandar el F7 desde una PC, programar, monitorear, y graficar. (*Ver figura 2.4 a y b*)

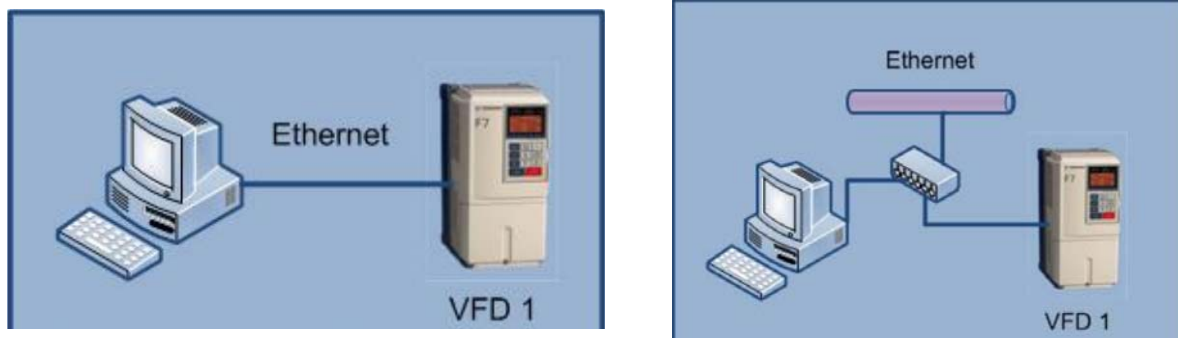


Figura A

Figura B

Figura 2.4 A y B Comunicación del Variador de Velocidad Yaskawa.

El F7 se ha diseñado para soportar ambientes industriales, es muy sólido y confiable, con la utilización de accesorios opcionales permiten su funcionamiento en ambientes agresivos. Esta es la generación más reciente de este producto a nivel mundial, presentando varias innovaciones como por ejemplo el HSB (Frenado por alto resbalamiento), sistema inventado y patentado por Yaskawa, que permite desacelerar cargas de elevada inercia sin necesidad de utilizar el frenado mediante resistencias.

El F7 tiene múltiples aplicaciones deseables como pueden ser: control V/f, V/f a lazo cerrado, vectorial a lazo abierto y vectorial a lazo cerrado, autosintonía, conectividad, coordinación con otros equipos y un amplio rango de opciones configurables.

El Inversor F7 usa la tecnología PWM (Modulación del ancho del pulso) para motores de inducción trifásicos de corriente alterna. Este tipo de Inversores son conocidos como Inversores de Frecuencia Ajustable o Inversores de Frecuencia Variable. En la figura 2.5 se muestra una vista frontal del variador Yaskawa F7, serie 4011.



Figura 2.5 - Vista del Yaskawa F7, serie 4011

El operador digital figura 2.5 tiene la función Local / Remoto, función de Copiado, 7 Idiomas a seleccionar y Display de pantalla de cristal líquido (LCD) de 5 líneas, 16 caracteres por línea. Se puede recuperar la configuración del usuario habilitando "inicialización del usuario". EL Software Drive Wizard permite subir y bajar, así como graficar y monitorear los parámetros del Inversor desde una PC, facilitando el manejo del Inversor. Presenta entradas de control analógicas de 4 – 20 mA y de -10 a 10 V de corriente directa. Las características técnicas se muestran a continuación en la tabla 2.3.

Tabla 2.3 Características técnicas de VFD F7 Yaskawa, modelo 4011.

Modelo	Potencia kW	Potencia HP	Corriente nominal (A)	Voltaje nominal (V)	Frecuencia máxima (Hz)
<b>F7- 4011</b>	11	15.0	24.0	480.0	300.0
<b>Trabajo en sobrecarga de un 150% de sus parámetros hasta 60 segundos.</b>					

Los variadores de velocidad YASKAWA, serie F7, presentan un operador digital los cuales generalmente vienen configurados por el fabricante a sistema de dos vías, donde el terminal #1 viene configurado como Forward-Run-Stop (marcha – adelante -

paro) y el terminal #2 en Reverse Run-Stop. (Marcha en reversa/paro), en el anexo # 1 se muestra el diagrama general de programación.



Figura. 2.6 - Vista del operador digital del VFD Yaskawa

En la mayoría de las instalaciones, el sistema de control utilizado es el de tres vías, por lo que el variador debe ser programado para trabajar en sistema de tres hilos, donde convierte el terminal #1 en comando de RUN (marcha), el terminal #2 en comando de STOP (paro) y el terminal #5 en selección forward (adelante) o reverse (reversa), este último forma parte de unos de los terminales programables del tres al ocho, el cual debe ser modificado y programado según nuestras condiciones necesarias de operación.

El esquema actual del variador de velocidad en el accionamiento del dâmpner en estudio, además de poseer las características anteriores, también presenta un sistema de señalización a través de una salida digital denominada M1 y M2, las cuales están programadas para la activación con el comando de arrancada del accionamiento, que energiza un relé del tipo DIL R22, el cual a través de sus contactos auxiliares indica la condición de marcha o parada del mismo en el panel frontal, los terminales (salidas digitales) M3 y M4 están alambradas para el interlock eléctrico de todo el accionamiento.



Presenta dos salidas analógicas programadas, de las cuales la FM está destinada y alambrada para el % de velocidad (rpm) del motor en un instrumento analógico, a través de una señal de 0 hasta 10 VDC.

El control de la velocidad se realiza a través de un potenciómetro de 2.4 KΩ a través de la entrada analógica A1, destinada a el control en modo local del VFD.

Presenta un sistema de enfriamiento a través de ventiladores acoplados en el disipador que se encuentran fijados los módulos de fuerza a través de IGBT y un reactor de entrada y uno de salida, para amortiguar los armónicos.

- **Alarma y fallas más comunes del variador de velocidad YASKAWA F7.**

Esta sección describe las funciones de fallo y alarma del convertidor. Incluyendo la detección de alarmas, de errores de programación del operador y de errores de auto-chequeo. Cuando el convertidor detecta un fallo, se opera la salida de contacto de fallo y la salida del convertidor se pone en OFF, lo que causa que el motor marche libre hasta su detención. El método de detención puede ser seleccionado para algunos fallos. Se visualiza un código de fallo en el Operador Digital, el cual brinda la información necesaria para la búsqueda de la misma.

Cuando el inversor detecta una falla, la información de la falla se despliega en el operador digital del inversor, el contacto de falla se cierra, y el motor para con giro libre, a continuación en el anexo # 2 se detallan las posibles fallas más comunes para este tipo de variador

#### *2.4.2 Variador de velocidad ABB.*

Los convertidores de frecuencia industriales ABB se han diseñado para aplicaciones industriales, y en especial para aplicaciones en industrias de procesos como las industrias de la pulpa y el papel, metalúrgica, minera, cementera, energética, química, petrolífera y del gas. Los convertidores de frecuencia industriales ABB son variadores de gran flexibilidad que pueden configurarse para satisfacer las necesidades específicas de estas aplicaciones, por lo que la configuración ajustada a cada pedido constituye una parte integrante de la oferta. Estos convertidores de frecuencia cubren una amplia gama

de potencias y tensiones, incluyendo tensiones máximas de 690 V. Los convertidores de frecuencia industriales ABB se entregan con una amplia gama de opciones integradas. Una característica clave de estos convertidores es su capacidad de programación, que facilita la adaptación a distintas aplicaciones.

Los convertidores de frecuencia industriales ABB se han diseñado con unas especificaciones de intensidad que permiten utilizarlos en entornos industriales con aplicaciones que requieran una elevada capacidad de sobrecarga. En el centro del convertidor figura el DTC, (Control Directo del Par), que aporta un rendimiento elevado y ventajas significativas: por ejemplo, un control estático y dinámico preciso de la velocidad y el par, un elevado par de arranque y cables a motor largos. Las opciones integradas del convertidor de frecuencia facilitan y agilizan las tareas de instalación.

Uno de los criterios de diseño más significativos de los convertidores de frecuencia industriales ABB es su prolongada vida de servicio. De esta manera, las piezas sometidas a desgaste como los ventiladores y los condensadores se han seleccionado en consonancia. En combinación con las amplias características de protección, ello aporta una excelente fiabilidad en un mercado tan exigente como el industrial.

Puntos fuertes del convertidor de ABB estándar.

- Precisión en la entrega
- Instalación fácil.
- Puesta en marcha rápida.
- Manejo sencillo
- Panel de control con asistente para un uso intuitivo del convertidor
- Reactancia de autoinductancia variable, pendiente de patente, para la reducción de los armónicos superiores
- Control vectorial sin sensor
- Tarjetas barnizadas para entornos difíciles
- Filtro RFI integral de serie para primer y segundo entorno.

- Sistema de bus de campo flexible con Modbus integrado y numerosos adaptadores de bus de campo que se pueden montar internamente.
- Convertidores de frecuencia industriales

## Variador de velocidad ABB

**Tabla 2.4** Características técnicas de ABB ACS800-01-0020-3.

Modelo	Potencia kW	Potencia HP	Corriente nominal (A)	Voltaje nominal (V)	Frecuencia máxima (Hz)
<b>ACS800-01-0020-3</b>	11	15.0	24.0	480.0	300.0
<b>Trabajo en sobrecarga de un 150% de sus parámetros hasta 60 segundos.</b>					

En la tabla 2.5 se muestran las características de la serie del variador ABB que se está analizando, las ventajas de esta variante son mostradas y sobre la base de estas se realiza la comparación.

**Tabla 2.5** Análisis de las características técnicas de ABB ACS800-01-0020-3.

Características	Ventajas	Notas
Compacto y completo Tamaño compacto, todo esta integrado	Precisa menos espacio y tareas de instalación.	No deben instalarse componentes adicionales como reactancias de entrada o un filtro EMC.
Filtro de armónicos integrado en todos los accionamientos ACS800	Armónicos reducidos, lo que significa menos interferencias y un menor calentamiento de los cables y los transformadores.  El filtro también protege al accionamiento de los transitorios en la parte de la red.	Para obtener el menor nivel de armónicos posible, los ACS800-31/-37/-37LC ofrecen una solución casi libre de armónicos.
Amplia gama de opciones disponible	Soluciones estándar ofrecidas por ABB que satisfacen la mayoría de las necesidades de los clientes.	Las soluciones adaptadas están disponibles en los ACS800-07/-17/-17LC/-37/-37LC.
Opciones de frenado versátiles	Siempre se dispone de la opción de frenado optima.  No se requiere un chopper de frenado externo, con lo que se reduce el tamaño y el coste de la instalación.	Chopper de frenado integrado en todos los bastidores (estándar/opcional).  Frenado regenerativo en los ACS800-11/-17/-17LC.
<b>Interfaz de usuario</b>		

Interfaz de cliente accesible	Puesta en marcha y manejo sencillos y rápidos.	Pantalla alfanumérica clara con un Asistente de Puesta en Marcha que le guía por el procedimiento de arranque.  Herramientas para PC fáciles de utilizar disponibles para la puesta en marcha, el mantenimiento, la monitorización y la programación.
Conexiones y comunicaciones versátiles	Las E/S estándar cubren la mayoría de los requisitos.  Puede conectarse a los buses de campo utilizados comúnmente.	E/S amplias, opcionales y estándar.  Las E/S cumplen la norma PELV (EN 50178).
Amplia capacidad de programación	Flexibilidad. Es posible sustituir reles o incluso PLC en algunas aplicaciones.	Dos niveles de capacidad de programación:  1. Programación de parámetros (estándar) 2. Programación adaptativa (programación de bloques libres) - característica estándar - mas bloques disponibles como opciones - todas las E/S son programables
<b>Diseño industrial</b>		
Amplio rango de potencia y tensión	Basta una sola serie de producto para todo, lo que conlleva menos formación y recambios y una interfaz estandarizada para los accionamientos.	
Amplia gama de armarios robustos disponible	Soluciones adecuadas disponibles para distintos entornos.	IP21 - IP54.
Resistente diseño del circuito principal	Adecuado para uso industrial intensivo.	Componentes dimensionados para un trabajo pesado y una larga vida de servicio.
	Fiable.  Pueden usarse cables de motor largos sin filtros de salida adicionales.	El avanzado modelo térmico permite una elevada capacidad de sobrecarga.

### 2.4.3 Variador de velocidad Altivar 21

En la tabla 2.6 se muestran los valores nominales del Altivar 21 modelo HD11N4 para su posterior análisis.

Tabla 2.6 Características técnicas de Altivar ATV 21HD11N4

Modelo	Potencia kW	Potencia HP	Corriente nominal (A)	Voltaje nominal (V)	Frecuencia máxima (Hz)
ATV 21HD11N4	11	15.0	16.7	480.0	300.0
<b>Trabajo en sobrecarga de un 150% de sus parámetros hasta 60 segundos.</b>					

## **Terminal de visualización remoto**

El variador Altivar 21 se puede conectar a un terminal de visualización remoto este visualización se puede montar en la puerta de una envolvente con protección IP50 en el panel frontal. La temperatura máxima de funcionamiento es de 40 °C.

Existen dos tipos de funcionamiento:

- MODO DE TECLADO REMOTO: proporciona acceso a las mismas funciones que el terminal integrado de 7 segmentos y se puede utilizar:
  - Para controlar, configurar y ajustar el variador de forma remota.
  - Para la visualización remota.
- MODO DE COPIA: las configuraciones se pueden guardar y descargar (se pueden guardar tres archivos de configuración).

En función del modo de funcionamiento seleccionado, las siguientes teclas tendrán funciones distintas:

“local”, la referencia de velocidad se puede modificar utilizando las teclas; el LED situado entre estas teclas se enciende.

Pantalla:

- Cuatro pantallas de 7 segmentos visibles a 5 m.
- Visualización de códigos y valores numéricos.
- La pantalla parpadea cuando se guarda un valor.
- Especificación de la unidad del valor mostrado.
- La pantalla parpadea para indicar un fallo en el variador.

Pantalla de estado del variador:

- RUN: el comando RUN está activo o referencia de velocidad presente.
- PRG: variador en modo automático.
- MON: variador en modo de supervisión.
- LOC: variador en modo local.
- COPY MODE: MODO DE COPIA seleccionado.

Utilización de las teclas:

- LOC/REM: cambio del mando del variador, local o remotamente como mando
- LOC/REM: cambio del mando del variador, local o remotamente como mando



Panel frontal del terminal de visualización remoto

Fig 2.7 Visualización del panel frontal del ATV 21HD11N4

- Acceso a las funciones para gestionar los parámetros (copia, comparación, protección) o para ver las memorias del terminal.
- MODE/ESC, en función del modo de funcionamiento seleccionado:
- Para ajustar y programar los parámetros del variador, acceso al modo de supervisión.
- Para cancelar un valor o parámetro y volver al estado anterior.  
v RUN/A, en función del modo de funcionamiento seleccionado:
- Comando de funcionamiento del motor local; el LED indica que la tecla RUN está activa.
- Copia de la memoria de terminal "A".
- v STOP/B, en función del modo de funcionamiento seleccionado:

- Control local de la parada del motor/eliminación de fallo del variador.
- Copia de la memoria de terminal “B”.

### **Presentación**

- El variador Altivar 21 se ha desarrollado para responder a las configuraciones que se encuentran en las instalaciones de comunicación dedicadas al edificio. Integra de serie el protocolo de comunicación Modbus<sup>(1)</sup>.

La toma Modbus de tipo RJ45 está situada en el bornero de control del variador. Se asigna para el control mediante un parámetro programable o mediante otro tipo de controlador. Permite asimismo la conexión:

Del terminal remoto.

De un terminal de diálogo industrial tipo Magelis.

### **Tarjetas de comunicación dedicadas de la instalación (HVAC):**

- LONWORKS.
- METASYS N2.
- APOGEE FLN.
- BACnet.

**Nota:** la conexión a una red o a un bus de comunicaciones a través de una de las tarjetas opcionales de comunicación es incompatible con la utilización del software PCSOFT o el display remoto. Para poder utilizar el PCSOFT o el display remoto es necesario desconectar el bus de comunicaciones.

- **Modo de visualización estándar**

Este modo se activa automáticamente cuando se conecta, permite la visualización de una variable del variador (corriente, velocidad...) de las alarmas y los fallos.

- **Modo de ajustes de los parámetros**

Este modo permite conectar fácilmente un variador mediante el acceso directo a los parámetros básicos:

- Aceleración.
- Deceleración.
- Macro-configuración.
- Modo de control.
- Placa del motor.

Estos parámetros básicos se representan mediante un código alfanumérico (*ACC, dEC...*).

Este modo permite igualmente acceder a los parámetros avanzados necesarios para la instalación de las funciones avanzadas y para su optimización.

Estos parámetros se representan mediante un código numérico (*F100 a F900*).

- **Modo de control de estado**

Este modo permite visualizar todas las variables del variador, como el estado de las entradas/salidas, los últimos fallos...

## **2.5 Selección de la variante de Variador de Velocidad.**

Las tecnologías que se analizaron anteriormente en los subepígrafes: Yaskawa, ABB y Altivar, se escogieron sobre la base de que estuvieran cada una de las series analizadas en el mismo rango de potencia que demanda la carga a conectar, que es aproximadamente de 15 kW y de suministradores con los cuales la Unión del Níquel tuviera relaciones, para que el análisis de selección fuera sobre la base de sus características y aplicaciones de control y programación.

1. El Variador de velocidad F7 4011 presenta la posibilidad de control a lazo cerrado con entradas analógicas de 4 a 20 mA, que es imprescindible para lograr el correcto funcionamiento del proceso de molienda, para poder implementar la aplicación de control a lazo cerrado, para colocar sensores en el proceso y mediante las variaciones del flujo de mineral introducirle al variador mediante el



lazo cerrado los valores a los cuales el motor debe variar su velocidad para cada una de las condiciones cambiantes del sistema. En la tabla 2.7 se muestra los métodos de control del Yaskawa F7 4011.

Tabla 2.7 Método de control del parámetro A del Yaskawa F7 4011

Método de control	Parámetro	Control básico	Aplicaciones principales
Control vectorial de lazo abierto	A1-02 = 2	Control vectorial de corriente sin PG	Control de velocidad variable, aplicaciones que requieren precisión de velocidad y par
Control vectorial de lazo cerrado	A1-02 = 3	lazo de control vectorial a lazo cerrado	Control de muy alto rendimiento con un PG (servocontroladores simples, control de velocidad de alta precisión, control de par y limitación de par)

- El variador F7 modelo 4011, tiene la ventaja de construir la curva de la relación de tensión sobre frecuencia del variador – motor, el cual es un punto muy importante para lograr una buena eficiencia del accionamientos donde la carga puede ser de componente centrípeta. Es aconsejable una desviación con respecto a la regla  $U_1 / f = \text{constante}$ , en los casos en que el momento de la carga disminuye rápidamente con la reducción de la velocidad, por ejemplo, en los accionamientos de cargas centrífugas donde  $M \propto n^2$ , como se muestra en la gráfica 2.9. En este caso, para el segmento de E1-11 a E1-04 la disminución mucho más rápida de la tensión en comparación con la frecuencia, provoca una reducción del flujo y aunque disminuye el rendimiento del motor por salirse de los parámetros nominales de este, mejora el rendimiento del accionamiento. Esto se realiza a través de los parámetros de programación E1-01 hasta los E1-13, como se muestra a continuación en la siguiente tabla.

Tabla 2.8 Método de control del Yaskawa F7 4011

Método de control	Parámetro	Control básico	Aplicaciones principales
Control V/f	A1-02 = 0	Control de la relación fija de tensión/ frecuencia	Control de velocidad variable, especialmente control de motores múltiples con un convertidor y sustitución de convertidores existentes.
Control V/f con PG	A1-02 = 1	Control de relación fija de tensión/ frecuencia con compensación de velocidad utilizando un PG	Aplicaciones que requieren un control de velocidad de alta precisión utilizando un PG en el lado de la máquina

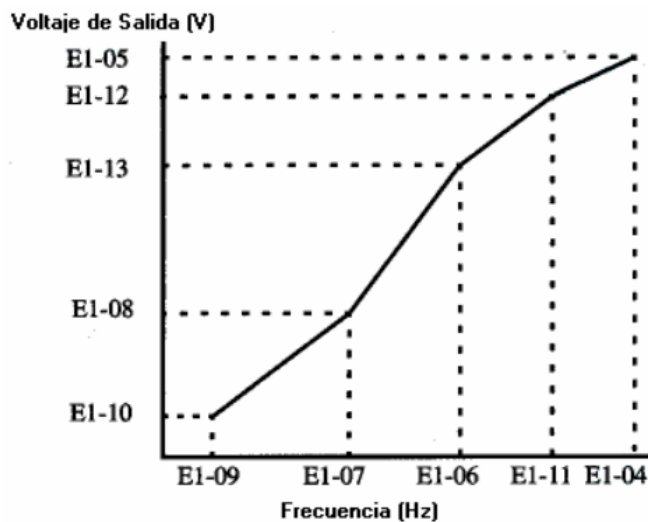


Figura 2.9 Gráfica de la relación V/ F

## **2.4 Conclusiones.**

En el capítulo se comenzó describiendo el objeto de estudio, cada una de las partes por donde circula el mineral en el proceso de molienda y sus peculiaridades. Se analizó la programación del software de la unidad de medición PQM que nos servirá para el análisis de los experimentos que se le realizaran al equipamiento luego de montado. Por último se realiza un análisis de tres posibles variantes o tecnologías de vaciadores de velocidad de existencia en el entorno metalúrgico y luego de caracterizar cada opción se decide críticamente que la variante a monta que es el Yaskawa F7 modelo 4011.

---

## **CAPÍTULO 3. ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS.**

### **3.0 Introducción.**

En el presente capítulo se propone analizar las evaluaciones y los resultados del montaje del Variador de Velocidad Yaskawa F7 modelo 4011 en el proceso de transporte de mineral de la planta piloto Moa. Se llevan a cabo los experimentos planteados anteriormente, analizando críticamente el funcionamiento del sistema y se le realizara la valoración económica.

### **3.1 Montaje Variador de Velocidad F7.**

Para el montaje del convertidor Yaskawa F7 se utilizó un gabinete con característica de diseño apropiado para la intemperie y buen enfriamiento, se conectaron 2 reactores para disminuir los armónicos, uno en la entrada de voltaje del Variador y el otro en la salida para el motor, un rele para la señalización frontal (arrancado / parado) con una estación de botones con el fin de que el operario trabaje de forma más simplificada y así permitir el manejo del VFD de forma remota, además un operador digital colocado en la puerta para que el operario pueda conocer todos los datos y ajuste como son: velocidad del motor en rpm, corriente, tensión y frecuencia, se diseñó un cableado interno en el gabinete protegido por canales plástica y puntos terminales con regletas eléctricas . Fue necesario utilizar 100mts de cable #.14 de 2 conductores para incluir al Variador en la cascada de arranque de la planta, programando un contacto para este fin ya que el Ventilador PF4 debe dar permiso a los demás equipos para el arranque de la planta. Los valores de por cientos de las revoluciones totales son ajustados por un mando a distancia que está colocado cerca del motor para esto se utilizó un cable multicontuctor de 8 vías con un potenciómetro de fácil ajuste, todo el cableado externo se realizó con cable TECK los cuales utilizan conectores para mejorar el sello de los cables en el gabinete y el motor, los cables fueron sujetos con amarras plásticas y

clavos impulsores logrando que la nueva instalación fuera adecuada al entorno de la planta, en la imagen 3.1 se muestra como quedo el montaje del variador de velocidad 4011.

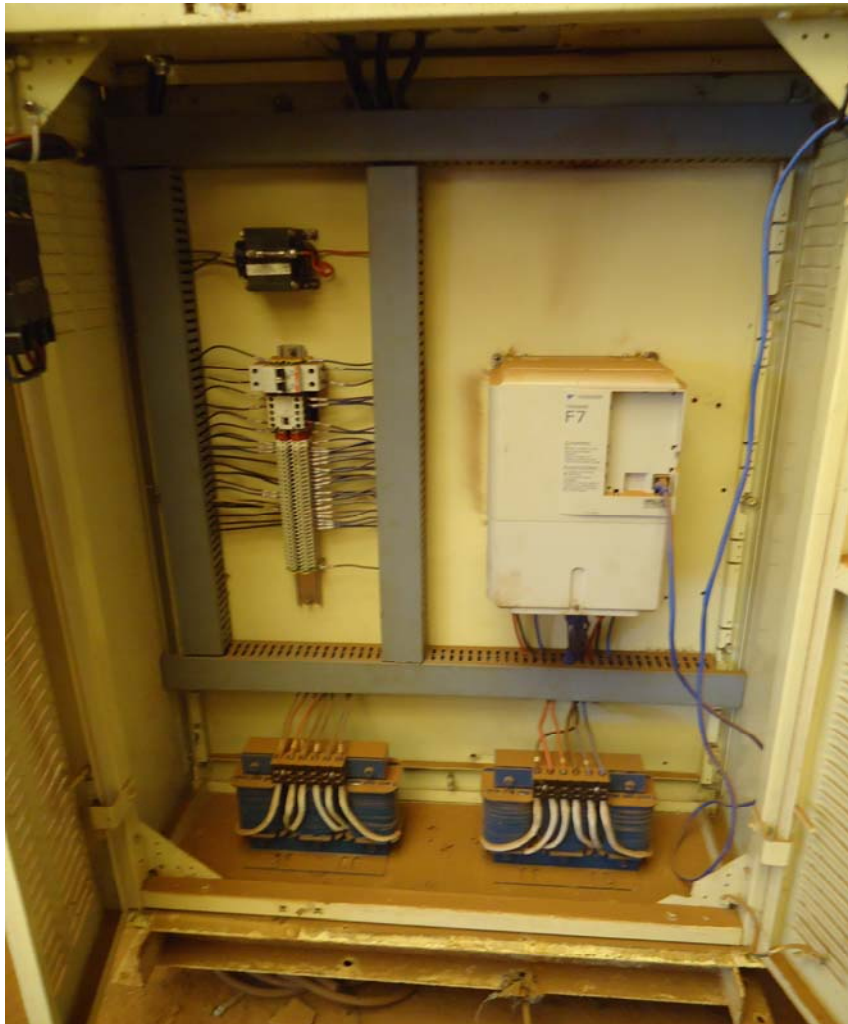


Figura 3.1 montaje de variador F7 4011 en gabinete cerrado.

### **3.2 Ajustes de programación del variador de velocidad F7 4011.**

El F7 4011 se presenta programado de fábrica y listo para funcionar. Para una mayor simplicidad y claridad, el indicador alfanumérico es de cinco líneas por dieciséis caracteres con lectura seleccionable entre siete idiomas. El teclado es intuitivo y dispone de función para copia de parámetros mediante la cual se pueden repetir

parámetros de un equipo a otro. Para simplificar la programación de los parámetros se han separado en dos grupos, inicio rápido y funciones avanzadas. Mediante el programa Drive Wizard, disponible sin costo, es posible comandar el F7 desde una PC, programar, monitorear, y graficar.

Esta es la generación más reciente de este producto a nivel mundial, presentando varias innovaciones, sistema inventado y patentado por Yaskawa, que permite desacelerar cargas de elevada inercia sin necesidad de utilizar el frenado mediante resistencias.

En la tabla 3.1 se muestran algunos de los parámetros más importantes de la programación del variador de frecuencia, los cuales definen en gran medida su modo de operación así como los parámetros nominales del accionamiento en cuestión. Los parámetros mostrados son ajustados específicamente para el accionamiento de transporte de mineral.

Tabla 3.1 parámetros de ajuste y programación del F7, modelo 4011

<b>Parámetros</b>	<b>Nombre</b>	<b>Ajuste</b>
<b>A1-00</b>	<b>Lenguaje</b>	<b>Español</b>
<b>A1-01</b>	Nivel de acceso	2 (Avanzado)
<b>A1-02</b>	<b>Método de control.</b>	<b>0 (V/F)</b>
<b>B1-01</b>	Fuente de referencia	1 (terminal)
<b>B1-03</b>	Método de parada	0 (parada con rampa)
<b>B1-04</b>	Reversible	1 (Deshabilitado)
<b>C1-01</b>	Tiempo de aceleración.	10
<b>C1-02</b>	Tiempo de desaceleración.	20
<b>D2-01</b>	Límite superior de rpm.	100%
<b>D2-02</b>	Límite inferior de rpm.	0%
<b>E1-01</b>	Tensión de entrada.	480
<b>E1-03</b>	Configuración de curva V/f.	F(V/F)
<b>E1-04</b>	Frecuencia máxima.	60
<b>E1-05</b>	Tensión de salida máxima.	460

<b>E1-06</b>	Frecuencia base.	60
<b>E1-07</b>	Frecuencia media 1.	3.0
<b>E1-08</b>	Tensión de salida media 1.	25.3
<b>E1-09</b>	Frecuencia de salida mínima.	0.5
<b>E1-10</b>	Tensión de salida mínima.	4.6
<b>E1-11</b>	Frecuencia de salida 2.	0
<b>E1-12</b>	Tensión de salida media 2.	0
<b>E1-13</b>	Tensión base.	0
<b>E2-01</b>	Corriente nominal del motor.	27
<b>E2-03</b>	Corriente de vacío del motor.	9
<b>E2-04</b>	Numero de polos	4
<b>E2-11</b>	Potencia (kW)	15
<b>H1-03</b>	Terminal S5	C
<b>H2-01</b>	Terminal M1-M2	0 (Cerrado con arranque)
<b>H2-02</b>	Terminal M3-M4	0 (Cerrado con arranque)
<b>H3-01</b>	Señal del terminal A1	0 (0-10 Vdc)
<b>H3-02</b>	Ganancia del terminal A1	100%
<b>H4-01</b>	Terminal FM	2(salida de frecuencia)
<b>H4-02</b>	Ganancia del terminal FM	100%
<b>H4-07</b>	Señal del terminal FM	0 (0-10 Vdc)
<b>H3-02</b>	Ganancia del terminal A1	100%
<b>L1-02</b>	Tiempo de sobrecarga del motor.	8 min.
<b>L2-05</b>	Disparo de tensión mínima por DC.	190
<b>L8-05</b>	Pérdida de fase de entrada.	1 (Habilitado)
<b>L8-07</b>	Pérdida de fase a la salida.	1 (1 fase perdida)
<b>L8-09</b>	Disparo por protección de tierra.	1 (Habilitado)
<b>O1-03</b>	Visualización del display	4 (Hz)
<b>O2-04</b>	Modelo del inversor	28 (4011)

### 3.3 Evaluación técnica de los experimentos.

Las tablas que se muestran a continuación: la 3.2, 3.3 y 3.4, son el resultado de los 81 experimentos realizados en el proceso de molienda, donde en cada tabla se describe la cantidad de mineral de alimentación fresca al molino  $Q_e$ , el por ciento del volumen total de bolas dentro del molino  $\varphi\%$ , y el por ciento del total de las revoluciones por minuto del ventilador  $Q_a$  y por último la potencia promedio consumida por el variador de velocidad que alimenta el ventilador de tiro forzado de mineral PF4 para cada experimento, cada fila de las tablas muestran tres réplicas de cada experimento, en el Anexo # 5 se muestra el informe del cumplimiento de cada experimento.

Tabla 3.2 - Grupo de experimentos 1

No exp	Carga de bolas baja		Qa, m <sup>3</sup> /h	P(kW) PF4		
	$\varphi\%$ ,	Qe, t/h		Réplica 1	Réplica 2	Réplica 3
1. 2. 3	25	2,1	0,80	9.92	9.76	10.63
4. 5. 6	25	2,1	0,87	12.53	12.65	12.36
7. 8. 9	25	2,1	0.92	14.71	14.60	14.65
10. 11. 12	25	2,8	0,80	9.93	10.87	9.65
13. 14. 15	25	2,8	0,87	11.76	11.68	11.69
16. 17. 18	25	2,8	0.92	14.69	14.43	14.19
19. 20. 21	25	3.5	0,80	9.06	10.10	9.80
22. 23. 24	25	3.5	0,87	11.33	11.04	10.78
25. 26. 27	25	3.5	0.92	13.89	13.75	13.77

Tabla 3.3 - Grupo de experimentos 2

No exp	Carga de bolas media		Qa, m <sup>3</sup> /h	P(kW) PF4		
	$\varphi\%$ ,	Qe, t/h		Réplica 1	Réplica 2	Réplica 3
28. 29. 30	35	2,1	0,80	9.97	9.51	9.4
31. 32. 33	35	2,1	0,87	11.61	11.35	11.38
34. 35. 36	35	2,1	0.92	13.66	13.59	15.8
37. 38. 39	35	2,8	0,80	10.02	9.65	9.59
40. 41. 42	35	2,8	0,87	11.66	11.70	11.73



43. 44. 45	35	2,8	0.92	14.08	14.26	14.22
46. 47. 48	35	3.5	0,80	9.10	9.22	9.40
49. 50. 51	35	3.5	0,87	11.6	11.76	11.90
52. 53. 54	35	3.5	0.92	13.81	14.14	14.76

Tabla 3.4 - Grupo de experimentos 3

Carga de bolas alta			P(kW) PF4			
No exp	$\phi\%$ ,	Qe, t/h	Qa, m <sup>3</sup> /h	Réplica 1	Réplica 2	Réplica 3
55. 56. 57	45	2,1	0,80	10.27	10.02	9.87
58. 59. 60	45	2,1	0,87	11.93	11.78	11.81
61. 62. 63	45	2,1	0.92	15.18	14.59	14.30
64. 65. 66	45	2,8	0,80	9.38	9.29	9.35
67. 68. 69	45	2,8	0,87	11.56	11.47	12.38
70. 71. 72	45	2,8	0.92	14.53	14.22	14.01
73. 74. 75	45	3.5	0,80	13.37	13.40	13.20
76. 77. 78	45	3.5	0,87	9.38	12.45	11.57
79. 80. 81	45	3.5	0.92	14.81	14.03	13.30

Con la realización al análisis de los resultados de estos experimentos podemos llegar a dos conclusiones fundamentales:

- La primera referida a que se probaron 27 combinaciones diferentes con las tres variables posibles a sufrir cambio en el proceso de molienda: flujo de alimentación, carga de bolas y velocidad del aire, estas tres variables así como los escalones escogidos fueron sobre el criterio de experto de los operarios y técnicos de la planta. En ningunas de estas combinaciones el sistema presento problemas en la molienda, el mineral circuló por cada uno de los ductos sin ninguna dificultad, demostrándose la efectividad del variador de velocidad seleccionado.

- Como segunda tenemos del análisis realizado de la potencia consumida por el variador de velocidad, que el comportamiento es proporcional a la velocidad que impone en el motor de inducción. Del análisis del gráfico 3.1 podemos extraer que la variación de potencia consumida en el ventilador de tiro forzado PF4 solo depende de los grados de regulación que se le programe al variador, los cambios en las otras dos variables (Número de bolas y Alimentación del molino) influyen en un grado mínimo sobre el consumo del ventilador. Por lo antes planteado podemos expresar que al trabajar en régimen inferior al nominal en cuanto a las revoluciones por minuto se está dejando de consumir energía eléctrica proporcional al valor seleccionado de dichas rpm.

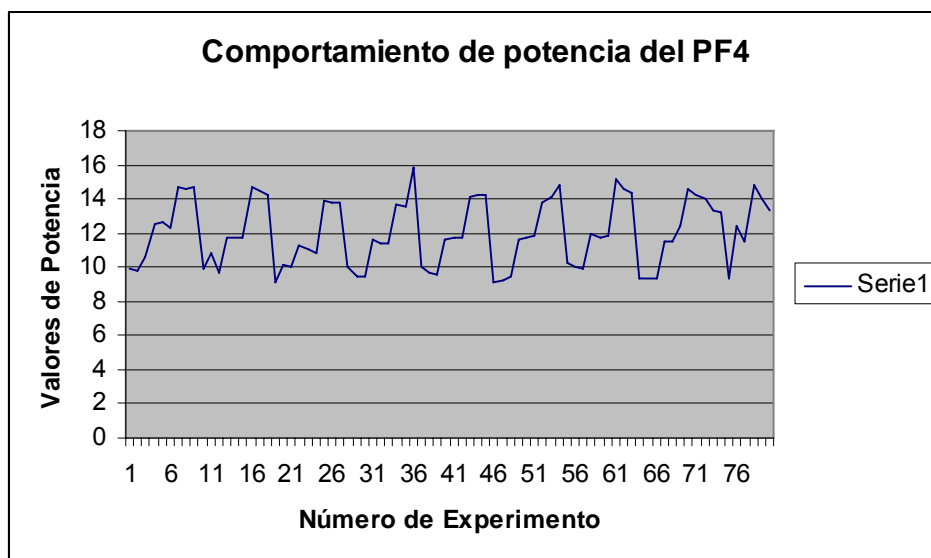


Gráfico 3.1 comportamiento de la potencia consumida por el Variador de velocidad.

### 3.3 Valoración económica.

Actualmente los sistemas a través de variadores de velocidad están dejando atrás a los sistemas que trabajan con estrangulación mecánica, teniendo en cuenta que los métodos a través de VFD poseen una regulación más suave y con un consumo de energía mínima. En esencia, la introducción de estas mejoras al accionamiento eléctrico del tiro forzado (PF4) de la empresa CEDINIQ con variador de velocidad, está avalada mediante un estudio económico del proceso para mejorar la eficiencia de este

accionamiento, estas mejoras permitirán la disminución de las pérdidas de energía y aumentara el tiempo de vida útil o empleo del sistema.

Los resultados de los principales indicadores tomados en cuenta en la determinación de los gastos de explotación de la instalación actual, trabajando en condiciones de régimen normal de trabajo, se muestran a continuación.

Tabla 3.5 - Costos de los dispositivos

<b>Costos de los dispositivos del accionamiento eléctrico actual (USD)</b>				
<b>Dispositivos</b>	<b>Cantidad</b>	<b>Unidad de medidas</b>	<b>Precio por unidad</b>	<b>Precio total (USD)</b>
Cable de 2 conductores royalcoll, #.14	90	mts	4.30	387
Cable Teck de 6 vías, #.14	8	mts	9.80	78.4
Cable de control azul #.16	30	Mts	0.32	9.6
Cable de fuerza (alimentación al motor) #.10 3C	20	mts	6.50	130
Cable ethernet	2	mts	1.38	2.76
Variador de velocidad Modelo. F7	1	EA	4122.08	4122.08
Control a distancia	1	EA	587	587
Riel metálico	0.5	mts	5.70	2.85
Bloques	15	EA	1.14	17.1
Contactador magnético DIL22	1	EA	54.92	54.92
Estación de botones (arranque/ parada)	1	EA	364.16	364.16
Lámpara de encendido	1	EA	33.47	33.47
Lámpara de apagado	1	EA	33.47	33.47
Canal plástica	4	mts	22.69	90.76
Tornillos de fijación #. 1/4	20	EA	0.09	1.80
Conectores eléctricos para cables	4	EA	41.12	164.48
Interruptor de fuerza 75 Amps	1	EA	956	956
Interruptor de control 5 Amps	2	EA	15.6	31.2
Transformador de control 50 VA	1	EA	110	110
El costo total de la instalación actual en USD es de				7177.05
Mano de obra (MNL)	11.79 por día (5 días)			58.95 MN

### *3.5.1 Cálculo de la valoración económica.*

Se pretende realizar un análisis económicos donde se valora económicamente desde el punto de vista energético para determinar en qué tiempo se puede recuperar la inversión teniendo en cuenta el ahorro por concepto de energía eléctrica.

Cálculo de consumo y costo de la energía con VFD.

Datos:

$P_{Promedio} = 12.0155 \text{ kW} \rightarrow$  Este es el promedio de potencia sacado del comportamiento de la potencia en las distintas pruebas realizadas al 80% de la Revoluciones.

$P_{Motor} = 15 \text{ kW}$

$Costo \text{ de la energía por kWh} = 0.2017 \text{ \$/kWh}$

- **Desarrollo del Análisis.**

$Consumo \text{ 1 Hora (VFD)} = 12.0155 \text{ kWh}$

$Consumo \text{ 1 Día (VFD)} = 288.372 \text{ kWh}$

$Consumo \text{ 1 Año (VFD)} = 105\ 255.78 \text{ kWh}$

$Consumo \text{ 2 Año (VFD)} = 210\ 511.56 \text{ kWh}$

$Costo \text{ 1D (VFD)} = 288.372 \text{ kWh} \times 0.2017 \text{ \$/kWh}$

$Costo \text{ 1Año (VFD)} = 105\ 255.75 \text{ kWh} \times 0.2017 \text{ \$/kWh}$

$Costo \text{ 1Año (VFD)} = \$ 21\ 230.09$

$Costo \text{ 2 Años (VFD)} = 210\ 511.56 \text{ kWh} \times 0.2017 \text{ \$/kWh}$

$Costo \text{ 2 Años (VFD)} = \$ 42\ 460.18$

Cálculo de consumo y costo sin VFD.

$Consumo \text{ 1 Hora (Sin VFD)} = 15 \text{ kWh}$

$Consumo \text{ 1 Día (Sin VFD)} = 360 \text{ kWh}$

$Consumo \text{ 1 Año (Sin VFD)} = 131\ 400 \text{ kWh}$

$Consumo \text{ 2 Año (Sin VFD)} = 262\ 800 \text{ kWh}$

$Costo \text{ 1D (Sin VFD)} = 360 \text{ kWh} \times 0.2017 \text{ \$/kWh}$

$Costo \text{ 1D (Sin VFD)} = \$ 72.61$

$Costo \text{ 1Año (Sin VFD)} = 131\ 255 \text{ kWh} \times 0.2017 \text{ \$/kWh}$

$Costo \text{ 1Año (Sin VFD)} = \$ 26\ 474.13$

$Costo \text{ 2 Años (Sin VFD)} = 262\ 800 \text{ kWh} \times 0.2017 \text{ \$/kWh}$

$Costo \text{ 2 Años (Sin VFD)} = \$ 53\ 006.76$

Para determinar el ahorro por concepto de energía eléctrica, debemos restar Costo de la energía en 2 años sin VFD menos el Costo de la energía con VFD.

$$\text{Ahorro en 2 años} = \text{Costo 2 Años (Sin VFD)} - \text{Costo 2 Años (VFD)}$$

$$\text{Ahorro en 2 años} = \$ 53\ 006.76 - \$ 42\ 460.18$$

$$\text{Ahorro en 2 años} = \$ 10\ 546.58$$

Para analizar el tiempo en que se recupera la inversión se debe calcular cuánto se ahorra diariamente, con este valor se divide el costo de la inversión entre la diferencia del costo diario sin VFD menos el Costo diario con VFD. Este cálculo dará el ahorro diario con Variador de Velocidad funcionando.

$$\text{Ahorro diario} = \text{Costo diario (Sin VFD)} - \text{Costo diario con (VFD)}$$

$$\text{Ahorro diario} = \$72.612 - \$58.1646$$

$$\text{Ahorro diario} = \$14.45$$

$$\text{Tiempo de recuperacion} = \frac{7177.05}{14.45} = 496.68.$$

Lo que significa que se tiene un periodo 496.68 días de amortización de la inversión. Es válido resaltar que este cálculo se realizó teniendo en cuenta solo el ahorro energético a esto se debiera considerar las otras variables mecánicas, químicas-metalúrgicas, galunométria del producto resultante luego de los experimentos.

### **3.4 Conclusiones**

En este capítulo se realizó el análisis del montaje físico del variador de velocidad F7 modelo 4011, demostrándose el correcto funcionamiento en cada uno de los 81 experimentos correspondientes a las 27 combinaciones, del análisis de estos se puede desprender varias conclusiones: como primera es que el sistema se mantuvo operativo para cada caso de estudio y como segundo que el consumo de energía del PF4 prácticamente depende de la velocidad del motor, no de los parámetros de funcionamiento del resto del sistema.

## **CONCLUSIONES GENERALES**

Con la realización de este trabajo de diploma “*Selección y montaje de Variador de Velocidad para transporte neumático de mineral laterítico en planta piloto CEDINIQ.*”, se pueden llegar a las siguientes conclusiones:

- Se seleccionó y monto el Variador de Velocidad Yaskawa F7 4011 para el accionamiento de transporte de mineral laterítico de la empresa Planta piloto Cediniq.
- Se le realizaron 27 experimentos con tres replicas cada uno, donde se demostró el correcto funcionamiento de la instalación para cada una de las posibles combinaciones de procesos.
- Se demostró que el consumo eléctrico de le PF4 solo depende de la las revoluciones del motor, independientemente de los grados de carga que presente el sistema.
- Se redujo en el motor las RPM a valores entre 80, 87 y 92 por ciento lo que reduce el consumo energético de la inhalación considerablemente.

## **RECOMENDACIONES**

Después del análisis de los resultados debemos plantear las siguientes recomendaciones para las investigaciones futuras:

- Determinar la relación voltaje sobre frecuencia óptima para este tipo de accionamiento, mediante pruebas de laboratorio.
- Analizar la posibilidad de mejorar las condiciones del ambiente de trabajo del Variador de velocidad.
- Realizar el estudio para sustituir el motor de inducción por uno de menor potencia.

## **BIBLIOGRAFÍA**

1. Alberti, E. Advanced Design of Pneumatic Conveying Systems. Bulk solids handling. 11(1): 103 – 110,1991.
2. Arnold, P.C; P.W. Wipych. The development of pneumatic conveying in Australia. Bulk solidshandling .11(1): 85 - 91, 1991.
3. Aróstegui, J. M. Metodología del Conocimiento Científico. La Habana: Editorial de Ciencias Sociales, 1978. 445 p.
4. Bodson, 1996 Product Manager de Danfoss. cseron@danfoss.com
5. Bradley, M. Pressure losses caused by bends in pneumatic conveying pipelines. Powder handling processing. 2(4), 1990.
6. Darren, T. Pneumatic conveying, basic design and component options. <http://www.Powderandbulk.com>. July, 2000.
7. Dynamic Air. Sistemas de transporte neumático en fase densa. <http://www.dinamicair.com> .July, 2002.
8. Escoda S “Manual práctico sobre ventiladores”, catalogo técnico, segunda edición, 2003, Madrid, España.
9. Farnish R. Wear in lean – pha se pneumatic conveying pipelines. <http://www.powderanbulk.com>. September, 2002.
10. Gutiérrez Arévalo, 1996, ‘Factibilidad del uso de variadores de velocidad en sustitución de ventiladores de tiro forzado.’ Universidad de San Carlo de Guatemala.’
11. Guzman D. Modelación, simulación y control del tanque de contacto y los enfriadores de licor en el proceso de lixiviación carbonato amoniacal. Tesis doctoral. ISMMANJ, Moa, Cuba. 2001. 124p.
12. Kusko y Galler, 1983 AUTOMATIZACIÓN, PRODUCTIVIDAD Y CALIDAD S.A DE C.V. 16 SUR 2122 Col. Bellavista Puebla, Pue (222) 243 5437



apc@mail.precitool.com.mx

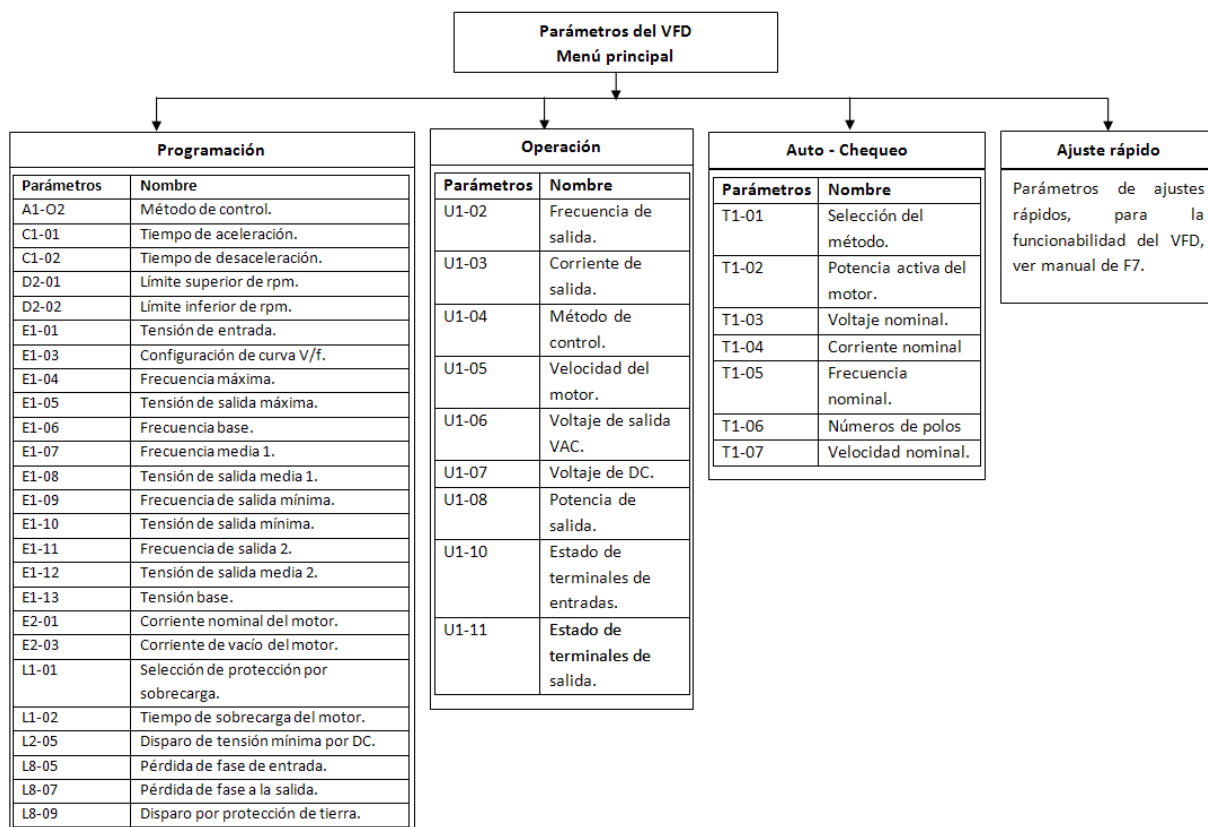
13. LABORDE, R. *Modelación y simulación del proceso de molienda del mineral laterítico con composición sustancial variable*. [Documento de word]. Tesis de doctorado. ISMM, Moa, 2005
14. Lampinen, M. Calculation Methods for Determining the pressure Loss of Twophase Pipe Flow and Ejectors in Pneumatic Conveying Systems. Actapolytechnicascandinavica . Mechanical Engineering series No 99, 1991.
15. Lesme J. R. Modelación del movimiento de las partículas y pérdidas en codos durante el transporte neumático del bagazo. Tesis doctoral. Universidad de Oriente, Santiago de Cuba. 1996. 112p.
16. Mason, D; P. Marjanovic; A. Levy. A simulation system for pneumatic conveying systems. Powder Technology. 95 (1): 7 – 14, 1998.
17. Neidigh S. Introduction to the theoretical and practical principles of pneumatic conveying. <http://www.porttechnology.org/journals/ed12/pdfs/pt12-235.pdf>. November, 2002.
18. *Operador de secado y molienda en la planta piloto Moa* [Documento de Word]. 5 ed. Feb 2007. 36p
19. Pacheco Berlot, P. Ecuaciones para el diseño de instalaciones a transporte neumático por tuberías verticales de materiales polvorientos, granulados, polimorfos y polidispersos. Tesis doctoral. Universidad de Oriente, Santiago de Cuba. 1984. 120p.
20. Pan, R; P. Wypych. Scale – up procedures for pneumatic conveying design. Powder handling processing. 4(2): 167 – 172, 1992.
21. Percy R. Viego Felipe, Motores con variadores de frecuencia, 2011
22. Pérez Abril, 2010, VARIACIÓN DE VELOCIDAD EN VENTILADOR DE AIRE DE COMBUSTIÓN
23. Ramos P. “Bombas, ventiladores y compresores”. ISPJAE, La Habana, 1995
24. Raúl Cobo, DRIVES o variadores de velocidad o Convertidores de frecuencia (VDF), 2008.
25. Reed, R; Bradley, M. Advances in the Design of Pneumatic Conveying Systems. Bulk solids handling . 11(1): 93 – 98, 1991
26. Rodes, M. Pneumatic Transport of Powders. <http://www.erpt.org>. Octubre 2001.

27. Schneider, Catálogo de soluciones, 2010
28. Taylor, T. Specific energy consumption and particle attrition in pneumatic conveying. Powder Technology . 95(1): 1-6, 1998.
29. Voldek, A. I. Máquinas Eléctricas. Tomo II. La Habana. Editorial Pueblo y Educación. 1974.
30. Weber, M. Friction of the Air and the Air/Solid Mixture in Pneumatic Conveying. Bulk solids handling. 11(1): 99 – 102, 1991.

## ANEXOS

### Anexo # 1

Diagrama con los parámetros más importantes para la programación del F7.



Anexo # 2 Fallas del Yaskawa F7 modelo 4011

Visualización de Fallas y Procesamiento			
Visualización el Operador Digital	Descripción	Causa	Acción correctiva
BUS Option Com Err	<b>Error de la Tarjeta de Comunicación Opcional</b> Después de que la comunicación inicial fue establecida, la comunicación se pierde.	La conexión esta rota y/o el control maestro detuvo la comunicación.	Verifique todas las conexiones y verifique la configuración del software por parte del usuario.
CE Memobus Com Err	<b>Error de Comunicación Modbus</b> Los datos de control no han sido recibidos correctamente por 2 seg. Esta falla es detectada cuando H5-05=1 y H5-04=0 o 2.	La conexión esta rota y/o el maestro ha detenido la comunicación.	Verifique todas las conexiones y verifique la configuración del software por parte del usuario.
CF Out of Control	<b>Falla de Control</b> El limite de Par se ha alcanzado en forma continua por mas de 3seg. Durante la rampa de paro mientras esta en Vector lazo Abierto.	Los parámetros del motor no están propiamente configurados.	Verifique los parámetros del motor .Realice el Auto Ajuste.
CPF00 COM-ERR(OP&INV)	<b>Falla de Comunicación del Operador Digital</b> La transmisión entre el Inversor y el Operador digital no se ha establecido en 5 seg. Después de energizar.	El cable del Operador digital no se conecto firmemente, Operador Digital defectuoso, y/o tarjeta de control defectuosa.	Quite el operador digital, y reinstálelo.
	La RAM de la CPU esta defectuosa.		
CPF01 COM-ERR(OP&INV)	<b>Falla de Comunicación del Operador Digital</b> Después de iniciar la comunicación con el operador digital, se detiene la comunicación por mas de 2 seg.	El circuito de control esta dañado.	Apague y encienda el Inversor.
			Reemplace la tarjeta de Control.
CPF02 BB Circuit Err	<b>Falla del circuito de Bloqueo de Base</b> Falla del circuito de Base Bloqueada al energizar.	Falla en el arreglo de compuertas durante el encendido.	Realice una inicialización de fábrica.
			Apague y encienda el Inversor.
			Reemplace la tarjeta de Control
CPF03 EEPROM Err	<b>Falla de la EEPROM</b> El Chequeo no fue valido.	Ruido o picos en las terminales de entrada del circuito de control.	Realice una inicialización de fabrica
			Apague y encienda el Inversor
			Reemplace la tarjeta de Control.

<p>EF0 Opt Estérenla Flt</p>	<p><b>Falla Externa de la Tarjeta Opcional.</b></p>	<p>Se presenta una condición de falla externa.</p>	<p>Verifique las condiciones externas. Verifique los parámetros. Verifique las señales de comunicación.</p>
<p>EF3 Ext Fault S3</p>	<p><b>Falla Externa de la terminales S3-S8.</b> Detectada cuando las terminales S3-S8 (H1-01 a H1-06) son programadas para la función de falla externa para que pare el Inversor usando la rampa de paro, paro con giro libre, o paro rápido.</p>	<p>Se presenta una condición de falla externa que esta conectada en las entradas digitales de multifunción.</p>	<p>Elimine la causa de condición de falla externa.</p>
<p>EF4 Ext Fault S4</p>			
<p>EF5 Ext Fault S5</p>			
<p>EF6 Ext Fault S6</p>			
<p>EF7 Ext Fault S7</p>			
<p>EF8 Ext Fault S8</p>			
<p>E-15 SI/F/G Com Err</p>	<p><b>Detección de Error de Comunicación SI-F/G.</b> Un error de comunicación es detectado cuando el comando de arranque o la frecuencia de referencia son configurados desde la tarjeta opcional SI-F/G (b1-01=3, b1-02=3) y la comunicación se pierde.</p>	<p>Esta perdida la comunicación con la tarjeta opcional conectada SI-F/G y b1-01=3 y/o b1-02=3.</p>	<p>Verifique las señales de comunicación. Verifique la configuración de b1-02 y b1-02. Verifique la configuración de F6-01. Verifique la configuración de comunicación del Maestro.</p>
<p>FBL Feedback Loss</p>	<p><b>Perdida de la retroalimentación del PID.</b> Esta falla ocurre cuando se programa una falla en la detección de pérdida de retroalimentación del PID (b5-12=2) y la retroalimentación de PID&lt; Nivel de pérdida de retroalimentación de PID (b5-13) para un tiempo de detección de pérdida de retroalimentación de PID (b5-14).</p>	<p>Fuente de retroalimentación del PID (Transductor, sensor, señal de edificio inteligente) no esta instalada correctamente o no esta trabajando.</p>	<p>Verifique si el inversor esta programado para recibir la señal de retroalimentación de PID. Verifique para asegurarse que la fuente de retroalimentación del PID esta instalada y trabaja apropiadamente.</p>

GF Ground Fault	<b>Falla a Tierra de la Salida</b> La Corriente de Salida a Tierra del Inversor excede del 50% de la corriente nominal de salida del Inversor y L8-09 = 1 (Habilitado).	Los cables del motor están en cortocircuito a tierra y/o el DCCT esta defectuoso.	Quite el motor y arranque el Inversor sin el motor.
			Verifique el motor por un cortocircuito entre fase y tierra.
			Verifique la corriente de salida con un amperímetro y verifique la lectura del DCCT.
LF Output Phase Loss	<b>Fase de Salida Abierta</b> Cuando ocurre una fase de salida abierta en el Inversor. Esta falla es detectada cuando la corriente de salida excede de un desequilibrio del 5% y L8-07=1 (Habilitado).	Hay un alambre roto en el cableado de salida. Hay un alambre roto en embobinado del motor. Las terminales de salida están sueltas.	Verifique el alambrado de el motor. Verifique el motor por un cortocircuito entre fase y tierra.
			La capacidad del motor esta siendo usado menos del 5% de la capacidad máxima del motor.
		Es usada una baja impedancia en el motor	Agregue mas impedancia.
OC Over Current	<b>Sobre corriente</b> Cuando la salida del Inversor se excede del nivel de detección de sobre corriente (aproximadamente del 200% de la corriente nominal de salida del Inversor).	Cortocircuito entre fase y fase a la salida del Inversor, cortocircuito del motor, rotor bloqueado, carga demasiado grande, tiempo de aceleración y desaceleración demasiado corto, el contactor en la salida del inversor es abierto o cerrado, motor especial o motor con alto rango de FLA que el rango de corriente de salida del Inversor.	Quite el motor y arranque el Inversor sin el motor.
			Verifique el motor por un cortocircuito entre fase y fase..
			Verifique el Inversor por un cortocircuito entre fase y fase a la salida.
			Verifique que la configuración de C1-01 y C1-02 es correcta.
			Verifique las condiciones de carga.

OL1 Motor Overloaded	<b>Sobre Carga de Motor</b> Detectado cuando L1-01=1 o 3 y la corriente de salida del Inversor excede la curva de sobrecarga del motor. La curva de sobrecarga es ajustable usando el parámetro E2-01, L1-01, Y L1-02.	La carga era demasiado grande. El tiempo del ciclo era demasiado corto en el tiempo de aceleración y desaceleración.	Verifique nuevamente el tiempo del ciclo y el tamaño de la carga así como la configuración de los tiempos en C1-01 y C1-02.
		El voltaje del patrón de V/F es incorrecto para la aplicación.	Verifique nuevamente los parámetros del patrón V/F, E1-01 hasta E1-13.
		El configuración de la corriente nominal del motor es inapropiada.	Verifique nuevamente el valor de la corriente nominal del motor (E2-01).
OL2 Invr Overload	<b>Sobre Carga del Inversor</b> La corriente de salida del inversor excede la curva de sobrecarga del Inversor.	La carga era demasiado grande o el tiempo de aceleración y desaceleración es demasiado corto.	Verifique nuevamente el tiempo del ciclo y el tamaño de la carga así como la configuración de los tiempos en C1-01 y C1-02.
		El voltaje del patrón de V/F es incorrecto para la aplicación.	Verifique nuevamente los parámetros del patrón V/F, E1-01 hasta E1-13.
		El tamaño del Inversor es demasiado pequeño.	Cambie el inversor a un tamaño mas grande.
OL3 Overtorque Det1	<b>Detección de Sobre Par 1</b> La corriente de salida del Inversor > L6-05 por mas del tiempo configurado en L6-06 y L6-04 = 3 o 4.	Sobre carga de motor.	Asegúrese que el valor in L6-02 y L6-03 sea el apropiado Verifique el estado y la aplicación de la maquina para eliminar fallas.
OL4 Overtorque Det2	<b>Detección de Sobre Par 2</b> La corriente de salida del Inversor > L6-05 por mas del tiempo configurado en L6-06 y L6-04 = 3 o 4.	Sobre carga de motor.	Asegúrese que el valor in L6-05 y L6-06 sea el apropiado Verifique el estado y la aplicación de la maquina para eliminar fallas.
OL7 HSB OL	<b>Sobre Par del Frenado de Alto Deslizamiento.</b> La frecuencia de salida se mantiene constante por un tiempo largo que el configurado en n3-04 durante el frenado de alto deslizamiento.	La inercia de la carga es demasiado grande.	Asegúrese que la carga sea inercial. Si es posible, reduzca la inercia de la carga.

PF Input Pha Loss	<b>Perdida de Fase a la Entrada</b> El suministro de energía al Inversor tiene una fase abierta o tiene un desequilibrio grande de voltaje. Es detectado cuando L8-05 = 1 (Habilitado).	Fase abierta en la entrada del Inversor.	Verifique el voltaje de entrada.
		Terminales Flojas en R/L1, S/L2, y T/L3.	Apriete la terminales.
		Ocorre cuando hay una pérdida momentánea de energía	Verifique el voltaje de entrada.
		Fluctuación del voltaje de entrada demasiado grande.	Verifique el voltaje de entrada.
PGO PG Open	<b>Desconexión del GP</b> Es detectado cuando F1-02= 0 o 2 y A1-02 = 1 o 3. Es detectado cuando no hay recepción de pulsos del GP (encoder) durante un tiempo largo que esta configurado en F1-14.	Hay un alambre roto en el alambrado del GP.	Arregle el alambre roto/desconectado
		El GP ha sido alambrado incorrectamente.	Arregle el alambrado.
		La energía no esta alimentando el GP.	Suministre energía al GP apropiadamente.
		El mecanismo de frenado esta posiblemente activado.	Verifique que abra el circuito cuando se usa el freno (motor).
PUF DC Bus Fuse Open	<b>Fusible del Bus de DC.</b> Es detectado si el fusible del Bus de DC esta abierto.  <b>Precaución:</b> Nunca arranque el inversor después de remplazar el fusible del Bus de CD sin verificar un corto en los componentes.	Transistor (s) de salida o las terminales están en cortocircuito.	Quite la energía del Inversor.
			Desconecte el motor.
			Realice la verificación la tabla 6.6 sin energía.
			Remplace los componentes en corto circuito.
			Remplace el fusible defectuoso.



**Anexo # 3 Característica de comparación entre los accionamientos de motores de uso estándar y con variadores de velocidad.**

<b>Motor asincrónico</b>	<b>Uso estándar</b>	<b>Con variador de velocidad</b>
Corriente de arranque	Muy elevada, del orden de 6 a 8 veces la corriente nominal.	Limitado en el motor (en general cerca de 1.5 veces la corriente nominal).
Par de arranque	Elevado y no controlado, del orden de 2 a 3 veces el par nominal.	Del orden de 1.5 veces el par nominal y no controlado durante toda la aceleración.
Arranque	Brutal, cuya duración solo depende de las características del motor y de la carga arrastrada.	Progresivo, sin saltos y controlado con rampa lineal de velocidad.
Velocidad	Variando ligeramente según la carga, próxima de la velocidad de sincronismo $N_s$ .	Variación posible a partir de cero hasta un valor superior a la velocidad de sincronismo $N_s$ .
Frenado eléctrico	Relativamente complejo, necesita protecciones y un esquema particular	Fácil
Inversion del sentido de marcha	Relativamente fácil, después de parado el motor con inversión de cableado de fuerza	Fácil a través de programación
Funcionamiento del motor en el plano par - velocidad		

## Anexo # 4 Imágenes de variadores de velocidad

Varidor de Velocidad Altivar



Variador de Velocidad ABB



Variador de Velocidad ABB



## **Anexo # 5 INFORME DE LOS EXPERIMENTOS**

<b># Exp.</b>	<b>D - M - A</b>	<b>Inicio</b>	<b>Fin</b>	<b>Carga de Bolas (%)</b>	<b>(V. PF - 4) / (Flujo de aire) / (Presión)</b>	<b>(V. CS - 2) / (Flujo de mineral)</b>
1	23 - 4 - 2012	2:30 PM	3:29 PM	25 %	(1440 r/min.) / (0.8 m <sup>3</sup> /h) / (170 mm de agua)	(438 r/min.) / (2.1t/h)
2	25 - 4 - 2012	10:30 AM	11:29 AM	25 %	(1440 r/min.) / (0.8 m <sup>3</sup> /h) / (170 mm de agua)	(438 r/min.) / (2.1t/h)
3	26 - 4 - 2012	2:15 PM	3:14 PM	25 %	(1440 r/min.) / (0.8 m <sup>3</sup> /h) / (170 mm de agua)	(438 r/min.) / (2.1t/h)
4	26 - 4 - 2012	4:00 PM	4:59 PM	25 %	(1550 r/min.) / (0.87 m <sup>3</sup> /h) / (180 mm de agua)	(438 r/min.) / (2.1t/h)
5	27 - 4 - 2012	10:20 AM	11:19 AM	25 %	(1550 r/min.) / (0.87 m <sup>3</sup> /h) / (180 mm de agua)	(438 r/min.) / (2.1t/h)

**Título:** Selección y montaje de Variador de Velocidad para transporte neumático de mineral laterítico en planta piloto CEDINIQ.

6	27 - 4 - 2012	11:20 AM	12:19 PM	25 %	(1550 r/min.) / (0.87 m <sup>3</sup> /h) / (180 mm de agua)	(438 r/min.) / (2.1t/h)
7	27 - 4 - 2012	12:40 PM	1:39 PM	25 %	(1652 r/min.) / (0.92m <sup>3</sup> /h) / (190 mm de agua)	(438 r/min.) / (2.1t/h)
8	27 - 4 - 2012	2:40 PM	3:39 PM	25 %	(1652 r/min.) / (0.92m <sup>3</sup> /h) / (200 mm de agua)	(438 r/min.) / (2.1t/h)
9	27 - 4 - 2012	3:40 PM	4:39 PM	25 %	(1652 r/min.) / (0.92m <sup>3</sup> /h) / (200 mm de agua)	(438 r/min.) / (2.1t/h)
10	28 - 4 - 2012	9:20 AM	10:19 AM	25 %	(1439 r/min.) / (0.8m <sup>3</sup> /h) / (150 mm de agua)	(609r/min.) / (2.8t/h)
11	28 - 4 - 2012	10:20 AM	11:19 AM	25 %	(1439 r/min.) / (0.8m <sup>3</sup> /h) / (150 mm de agua)	(609r/min.) / (2.8t/h)
12	28 - 4 - 2012	11:20 AM	12:19 PM	25 %	(1439 r/min.) / (0.8m <sup>3</sup> /h) / (150 mm de agua)	(609r/min.) / (2.8t/h)
13	28 - 4 - 2012	12:40 PM	1:39 PM	25 %	(1550 r/min.) / (0.87 m <sup>3</sup> /h) / (180 mm de agua)	(609r/min.) / (2.8t/h)

# Exp.	D - M - A	Inicio	Fin	Carga de Bolas (%)	(V. PF - 4) / (Flujo de aire) / (Presión)	(V. CS - 2) / (Flujo de mineral)
14	28 - 4 - 2012	1:40 PM	2:39 PM	25 %	(1550 r/min.) / (0.87m <sup>3</sup> /h) / (180 mm de agua)	(609r/min.) / (2.8t/h)
15	28 - 4 - 2012	2:40 PM	3:39 PM	25 %	(1550 r/min.) / (0.87m <sup>3</sup> /h) / (180 mm de agua)	(609r/min.) / (2.8t/h)
16	5 - 5 - 2012	11:45 AM	12:44 PM	25 %	(1650r/min.) / (0.92m <sup>3</sup> /h) / (200 mm de agua)	(609r/min.) / (2.8t/h)
17	5 - 5 - 2012	12:45 PM	1:44 PM	25 %	(1650r/min.) / (0.92m <sup>3</sup> /h) / (200 mm de agua)	(609r/min.) / (2.8t/h)
18	5 - 5 - 2012	1:45 PM	2:44 PM	25 %	(1650r/min.) / (0.92m <sup>3</sup> /h) / (200 mm de agua)	(609r/min.) / (2.8t/h)
19	11 - 5 - 2012	10:40 AM	11:39 AM	25 %	(1438r/min.) / (0.8m <sup>3</sup> /h) / (170 mm de agua)	(771r/min.) / (3.6t/h)
20	11 - 5 - 2012	11:40 AM	12:39 AM	25 %	(1438r/min.) / (0.8m <sup>3</sup> /h) / (170 mm de agua)	(771r/min.) / (3.6t/h)
21	-	-	-	-	-	-
22	8 - 5 - 2012	1:00 PM	1:59 PM	25 %	(1550r/min.) / (0.87m <sup>3</sup> /h) / (200	(771r/min.) / (3.6t/h)

					mm de agua)	
23	8 – 5 – 2012	2:00 PM	2:59 PM	25 %	(1550r/min.) / (0.87m <sup>3</sup> /h) / (180 mm de agua)	(771r/min.) / (3.6t/h)
24	8 – 5 – 2012	3:00 PM	3:59 PM	25 %	(1550r/min.) / (0.87m <sup>3</sup> /h) / (180 mm de agua)	(771r/min.) / (3.6t/h)
25	7 – 5 - 2012	12:15 PM	1:14 PM	25 %	(1652r/min.) / (0.92m <sup>3</sup> /h) / (210 mm de agua)	(771r/min.) / (3.5t/h)
26	7 – 5 - 2012	1:15 PM	2:14 PM	25 %	(1652r/min.) / (0.92m <sup>3</sup> /h) / (200 mm de agua)	(771r/min.) / (3.6t/h)
27	7 – 5 - 2012	2:15 PM	3:14 PM	25 %	(1652r/min.) / (0.92m <sup>3</sup> /h) / (200 mm de agua)	(771r/min.) / (3.6t/h)
28	12 – 5 – 2012	8:25 AM	9:24 AM	35 %	(1439r/min.) / (0.8m <sup>3</sup> /h) / (180 mm de agua)	(438r/min.) / (2.1t/h)
29	12 – 5 – 2012	9:25 AM	10:24 AM	35 %	(1437r/min.) / (0.8m <sup>3</sup> /h) / (160 mm de agua)	(438r/min.) / (2.1t/h)
30	12 – 5 – 2012	10:25 AM	11:24 AM	35 %	(1437r/min.) / (0.8m <sup>3</sup> /h) / (160 mm de agua)	(438r/min.) / (2.1t/h)
31	12 – 5 – 2012	12:40 PM	1:39 PM	35 %	(1550r/min.) / (0.87m <sup>3</sup> /h) / (200 mm de agua)	(438r/min.) / (2.1t/h)
32	12 – 5 – 2012	1:40 PM	2:39 PM	35 %	(1550r/min.) / (0.87m <sup>3</sup> /h) / (180 mm de agua)	(438r/min.) / (2.1t/h)
33	12 – 5 – 2012	2:40 PM	3:39 PM	35 %	(1550r/min.) / (0.87m <sup>3</sup> /h) / (190 mm de agua)	(438r/min.) / (2.1t/h)
34	12 – 5 – 2012	3:55 PM	4:54 PM	35 %	(1652r/min.) / (0.92m <sup>3</sup> /h) / (210 mm de agua)	(438r/min.) / (2.1t/h)
35	12 – 5 – 2012	4:55 PM	5:54 PM	35 %	(1652r/min.) / (0.92m <sup>3</sup> /h) / (210 mm de agua)	(438r/min.) / (2.1t/h)
36	14 – 5 – 2012	8:10 AM	9:09 AM	35 %	(1651r/min.) / (0.92m <sup>3</sup> /h) / (230 mm de agua)	(438r/min.) / (2.1t/h)
37	15 – 5 - 2012	12:10 PM	1:09 PM	35 %	(1438r/min.) / (0.8m <sup>3</sup> /h) / (140	(609r/min.) / (2.8t/h)

					mm de agua)	
38	15 – 5 - 2012	1:10 PM	2:09 PM	35 %	(1438r/min.) / (0.8m <sup>3</sup> /h) / (160 mm de agua)	(609r/min.) / (2.8t/h)
39	15 – 5 - 2012	2:10 PM	3:09 PM	35 %	(1438r/min.) / (0.8m <sup>3</sup> /h) / (160 mm de agua)	(609r/min.) / (2.8t/h)
40	14 – 5 - 2012	4:10 PM	5:09 PM	35 %	(1550r/min.) / (0.87m <sup>3</sup> /h) / (180 mm de agua)	(609r/min.) / (2.8t/h)
41	14 – 5 - 2012	3:10 PM	4:09 PM	35 %	(1550r/min.) / (0.87m <sup>3</sup> /h) / (180 mm de agua)	(609r/min.) / (2.8t/h)
42	14 – 5 - 2012	2:10 PM	3:09 PM	35 %	(1550r/min.) / (0.87m <sup>3</sup> /h) / (180 mm de agua)	(609r/min.) / (2.8t/h)
43	14 – 5 - 2012	11:40 AM	12:39 PM	35 %	(1650r/min.) / (0.92m <sup>3</sup> /h) / (200 mm de agua)	(609r/min.) / (2.8t/h)
44	14 – 5 - 2012	10:40 AM	11:39 AM	35 %	(1650r/min.) / (0.92m <sup>3</sup> /h) / (200 mm de agua)	(609r/min.) / (2.8t/h)
45	15 – 5 - 2012	3:25 PM	3:39 PM	35 %	(1650r/min.) / (0.92m <sup>3</sup> /h) / (200 mm de agua)	(609r/min.) / (2.8t/h)
46	23 – 5 – 2012	1:20 PM	2:00 PM	35 %	(1438 r/min.) / (0.8m <sup>3</sup> /h) / (160 mm de agua)	(771r/min.) / (3.5t/h)
47	23 – 5 – 2012	12:20 PM	1:19 PM	35 %	(1438 r/min.) / (0.8m <sup>3</sup> /h) / (160 mm de agua)	(771r/min.) / (3.5t/h)
48	23 – 5 – 2012	11:20 AM	12:19 PM	35 %	(1438 r/min.) / (0.8m <sup>3</sup> /h) / (160 mm de agua)	(771r/min.) / (3.5t/h)
49	22 – 5 - 2012	4:10 PM	5:09 PM	35 %	(1550 r/min.) / (0.87m <sup>3</sup> /h) / (185 mm de agua)	(771r/min.) / (3.5t/h)
50	22 – 5 - 2012	3:10 PM	4:09 PM	35 %	(1550 r/min.) / (0.87m <sup>3</sup> /h) / (185 mm de agua)	(771r/min.) / (3.5t/h)
51	22 – 5 - 2012	10:10 AM	11:09 AM	35 %	(1550 r/min.) / (0.87m <sup>3</sup> /h) / (195 mm de agua)	(771r/min.) / (3.5t/h)
52	21 – 5 - 2012	12:40 PM	1:39 PM	35 %	(1652 r/min.) / (0.92m <sup>3</sup> /h) / (190	(771r/min.) / (3.5t/h)

					mm de agua)	
53	21 – 5 - 2012	11:40 AM	12:39 PM	35 %	(1652 r/min.) / (0.92m <sup>3</sup> /h) / (190 mm de agua)	(771r/min.) / (3.5t/h)
54	21 – 5 - 2012	10:40 AM	11:39 AM	35 %	(1652 r/min.) / (0.92m <sup>3</sup> /h) / (200 mm de agua)	(771r/min.) / (3.5t/h)
55	5 – 6 – 2012	9:10 AM	10:09 AM	45 %	(1438 r/min.) / (0.8m <sup>3</sup> /h) / (170 mm de agua)	(438r/min.) / (2.1t/h)
56	5 – 6 – 2012	10:10 AM	11:09 AM	45 %	(1438 r/min.) / (0.8m <sup>3</sup> /h) / (170 mm de agua)	(438r/min.) / (2.1t/h)
57	5 – 6 – 2012	11:10 AM	12:09 PM	45 %	(1438 r/min.) / (0.8m <sup>3</sup> /h) / (175 mm de agua)	(438r/min.) / (2.1 t/h)
58	5 – 6 – 2012	12:30 PM	1:29 PM	45 %	(1550 r/min.) / (0.87m <sup>3</sup> /h) / (190 mm de agua)	(438r/min.) / (2.1 t/h)
59	5 – 6 – 2012	1:30 PM	2:29 PM	45 %	(1550 r/min.) / (0.87m <sup>3</sup> /h) / (170 mm de agua)	(438r/min.) / (2.1 t/h)
60	5 – 6 – 2012	2:30 PM	3:29 PM	45 %	(1550 r/min.) / (0.87m <sup>3</sup> /h) / (190 mm de agua)	(438r/min.) / (2.1 t/h)
61	6 – 6 – 2012	8:10 AM	9:09 AM	45 %	(1652 r/min.) / (0.92m <sup>3</sup> /h) / (220 mm de agua)	(438r/min.) / (2.1 t/h)
62	6 – 6 – 2012	9:10 AM	10:09 AM	45 %	(1652 r/min.) / (0.92m <sup>3</sup> /h) / (200 mm de agua)	(438r/min.) / (2.1 t/h)
63	6 – 6 – 2012	10:10 AM	11:09 AM	45 %	(1652 r/min.) / (0.92m <sup>3</sup> /h) / (190 mm de agua)	(438r/min.) / (2.1 t/h)
64	6 – 6 – 2012	11:30 AM	12:29 PM	45 %	(1438 r/min.) / (0.8m <sup>3</sup> /h) / (140 mm de agua)	(609r/min.) / (2.8 t/h)
65	6 – 6 – 2012	12:30 PM	1:29 PM	45 %	(1438 r/min.) / (0.8m <sup>3</sup> /h) / (140 mm de agua)	(609r/min.) / (2.8 t/h)
66	6 – 6 – 2012	1:30 PM	2:29 PM	45 %	(1438 r/min.) / (0.8m <sup>3</sup> /h) / (170 mm de agua)	(609r/min.) / (2.8 t/h)
67	6 – 6 – 2012	2:50 PM	3:49 PM	45 %	(1550 r/min.) / (0.87m <sup>3</sup> /h) / (190	(609r/min.) / (2.8 t/h)

					mm de agua)	
68	6 – 6 – 2012	3:50 PM	4:29 PM	45 %	(1550 r/min.) / (0.87m <sup>3</sup> /h) / (150 mm de agua)	(609r/min.) / (2.8 t/h)
69	8 – 6 – 2012	8:20 AM	9:19 AM	45 %	(1550 r/min.) / (0.87m <sup>3</sup> /h) / ( mm de agua)	(609r/min.) / (2.8 t/h)
70	8 – 6 – 2012	9:30 AM	10:29 AM	45 %	(1650 r/min.) / (0.92m <sup>3</sup> /h) / ( mm de agua)	(609r/min.) / (2.8 t/h)
71	8 – 6 – 2012	10:30 AM	11:29 AM	45 %	(1650 r/min.) / (0.92m <sup>3</sup> /h) / ( mm de agua)	(609r/min.) / (2.8 t/h)
72	8 – 6 – 2012	11:30 AM	12:29 PM	45 %	(1650 r/min.) / (0.92m <sup>3</sup> /h) / ( mm de agua)	(609r/min.) / (2.8 t/h)
73	8 – 6 – 2012	12:30 PM	1:30 PM	45 %	(1438 r/min.) / (0.8m <sup>3</sup> /h) / (160 mm de agua)	(771r/min.) / (3.5t/h)
74	8 – 6 – 2012	1:30 PM	2:30 PM	45 %	(1438 r/min.) / (0.8m <sup>3</sup> /h) / (160 mm de agua)	(771r/min.) / (3.5t/h)
75	8 – 6 – 2012	2:30 PM	3:30 PM	45 %	(1438 r/min.) / (0.8m <sup>3</sup> /h) / (160 mm de agua)	(771r/min.) / (3.5t/h)
76	8 – 6 – 2012	3:30 PM	4:30 PM	45 %	(1550 r/min.) / (0.87m <sup>3</sup> /h) / ( mm de agua)	(771r/min.) / (3.5t/h)
77	8 – 6 – 2012	4:30 PM	5:30 PM	45 %	(1550 r/min.) / (0.87m <sup>3</sup> /h) / ( mm de agua)	(771r/min.) / (3.5t/h)
78	9 – 6 – 2012	9:50 AM	11:50 AM	45 %	(1550 r/min.) / (0.87m <sup>3</sup> /h) / ( mm de agua)	(771r/min.) / (3.5t/h)
79	9 – 6 – 2012	10:50 AM	11:50 AM	45 %	(1650 r/min.) / (0.92m <sup>3</sup> /h) / ( mm de agua)	(771r/min.) / (3.5t/h)
80	9 – 6 – 2012	11:50 AM	12:50 PM	45 %	(1650 r/min.) / (0.92m <sup>3</sup> /h) / ( mm de agua)	(771r/min.) / (3.5t/h)
81	9 – 6 – 2012	12:50 PM	1:49 PM	45 %	(1650 r/min.) / (0.92m <sup>3</sup> /h) / ( mm de agua)	(771r/min.) / (3.5t/h)