



Ahorro de energía en una empresa minera implementando un variador de velocidad en un lazo de control en cascada

Ing. Manuel Humberto Luque Casanave, Consultor internacional en control automático
verman@terra.com.pe

Resumen—El presente proyecto a implementarse en una empresa minera tiene el objetivo general de lograr eficiencia energética y como objetivo específico el de optimizar la operación de una Planta de Chancado Primario al evitar por un lado sobrecargar la chancadora primaria y por otro lado evitar su operación sin carga o a baja carga. El sistema propuesto consiste en la implementación de un variador de velocidad (frequency driver) en el motor eléctrico de una faja transportadora que alimenta de mineral a una chancadora primaria del tipo cónica de alta potencia eléctrica (≥ 500 HP), el que representa el actuador final de un lazo de control PID en cascada. Como resultado se logran ahorros de 633685 kWh/año en energía eléctrica y de 31684 US\$/año anuales en costos operativos y se dejan de emitir 346,63 ton CO₂/año al ambiente.

Índices— Chancadora Primaria, Controlador, Controlador Lógico Programable, Eficiencia Energética, Encoder, Faja Transportadora, Lazo de Control, Set Point, Transmisor, Variador de Velocidad.

I. INTRODUCCIÓN

LA actividad minera en Perú es intensiva en el consumo de energía y las acciones que se adopten para mejorar la eficiencia energética en ellas logran resultados significativos en la reducción de consumos de energía y en los costos operativos. La implementación de nuevas tecnologías con sistemas de control automático en la plantas concentradoras de mineral, integrados en lazos de control que incorporan transmisores, controladores, encoders, variadores de velocidades, controladores lógicos programables (PLCs) y otros dispositivos, permiten una operación energéticamente más eficiente, más segura y más confiable de los equipos de planta. Asimismo la conectividad a redes de comunicación que ofrecen estas nuevas tecnologías -a través de protocolos estándares de comunicación industrial- favorecen la diseminación selectiva de la información de planta a las diversas áreas de la empresa, para mejorar la gestión energética, de calidad, de costos, logística y de gestión administrativa. Nuestra propuesta es una innovación en el sistema de control de la alimentación de mineral a una chancadora primaria mediante una faja transportadora en una planta concentradora de la empresa minera ABC ubicada a 4000 msnm en la sierra de Perú.

II. DESARROLLO DE LA PROPUESTA

El sistema consiste en la implementación de un variador de velocidad (frequency driver) en el motor eléctrico de una faja transportadora que alimenta de mineral a una chancadora primaria del tipo cónica de alta potencia eléctrica (≥ 500 HP), el que representa el actuador final de un lazo de control PID en cascada. El motor de la chancadora primaria es un motor antiguo de eficiencia estándar.

En el lazo de control el controlador primario (IC) recibe la señal de un transmisor de corriente (IT) (4-20 mA DC) que a través de un elemento primario (IE) detecta la corriente eléctrica -en tiempo real- que demanda el motor de la chancadora primaria y cuyo Set Point (SP) Local está fijado en el valor de la corriente eléctrica óptima del motor de la chancadora. La señal controlada de salida de este controlador (4-20 mA DC) se envía como Set Point Remoto (SP) al controlador secundario (SC), el cual recibe una señal del transmisor de velocidad (ST) de la faja integrado a un elemento primario que es un encoder incremental (SE) que detecta la velocidad de la faja en tiempo real.

La señal de salida del controlador secundario es enviada al variador de velocidad que controla automáticamente la velocidad de la faja transportadora. Se ha escogido el control con lazo en cascada en lugar del control con lazo simple para a través de la retroalimentación mejorar la estabilidad del sistema -ante súbitas perturbaciones operativas- logrando una óptima sintonización del controlador de velocidad (SC).

De esta forma se logra que la chancadora primaria opere en sus puntos de mayor eficiencia al operar su motor eléctrico en la corriente óptima.

El sistema de control considera la implementación de un Controlador Lógico Programable (PLC) para la operación del lazo de control en cascada, sin embargo el PLC ya no será necesario pues el variador de velocidad de ABB en el modelo seleccionado posee las funciones del PLC requeridas por el sistema, con bloques de programa para el algoritmo PID, asimismo dispone de entradas y salidas análogas. Para nuestra propuesta se ha seleccionado el variador de velocidad ABB de 200 HP a 440 VAC, $I_n=236$ A @ 4000 m.s.n.m., el que posee funciones de PLC.

Al variador de velocidad llegarán las señales de los transmisores de corriente (IT) y de velocidad (ST), se tendrá un programa de configuración con bloques de programa para manejar las señales análogas.- Los dos controladores -primario y secundario- del lazo en cascada operarán con el bloque de

programación del algoritmo PID que posee el variador. Mediante los buses de campo, en el caso de la presente implementación con el módulo de comunicaciones Profibus, implementado en el variador de velocidad, se tendrá conectividad remota al Centro de Control de la empresa minera para que a través de un programa de supervisión se monitoree y controle la operación de la Planta Concentradora, sistema que podrá incluir a futuro monitoreo y control en red de otros equipos de la planta y de la empresa en un sistema SCADA que puede integrar el monitoreo vía Internet a través de un Webserver. Ver Figura 1

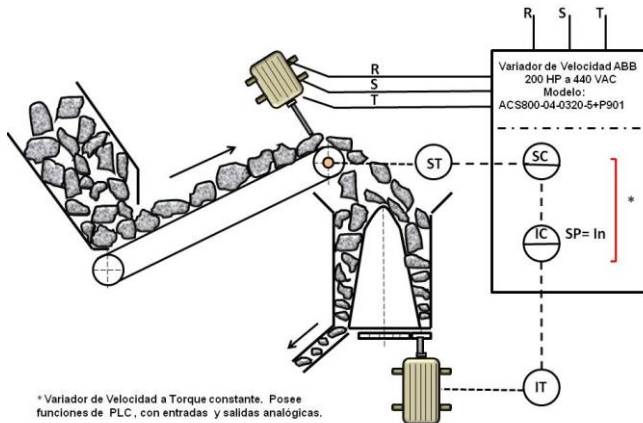


Fig.1. Esquema de la instalación propuesta

Aspectos a destacar con la implementación del variador de velocidad son la selección de rampa de aceleración y de parada, importante para mantener la tensión adecuada en la faja transportadora, optimización del consumo de energía eléctrica, mejora en el factor de potencia.

El arranque de la faja transportadora se hará con una señal de salida controlada en una rampa suave seleccionada en el variador de velocidad, ello evitará inestabilidad en la velocidad de la faja a causa de la magnitud del error entre la baja corriente inicial del motor de la chancadora y el set point (corriente óptima) del controlador primario (IC). Igualmente se dispondrá de señal de salida controlada para la rampa seleccionada para la parada suave de la faja transportadora.

A. Condiciones Operativas

En la Figura 2 se observa la curva de eficiencia para varias potencias de motores eléctricos (AE= alta eficiencia y Std= eficiencia estándar). El motor de la chancadora primaria de la instalación es de eficiencia estándar, observándose que la máxima eficiencia 90,6 % se presenta cuando la chancadora opera a un 75 % de carga.

En la planta concentradora evaluada, la chancadora primaria opera un 30 % del tiempo a 50 % de carga, un 50 % del tiempo a 25 % de carga y un 20 % del tiempo a 70 % de carga. La chancadora primaria opera 7200 horas anuales.

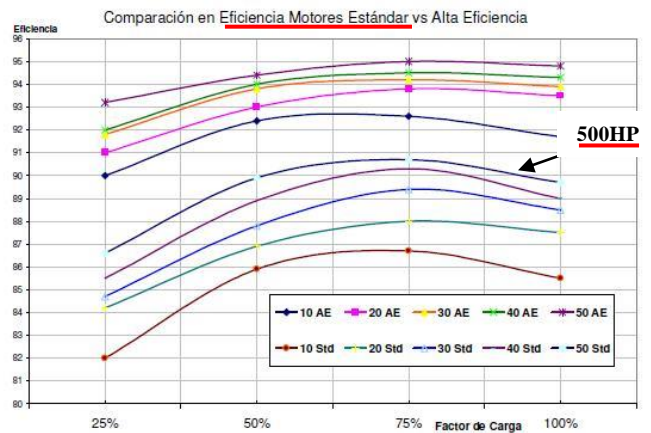


Fig. 2. Curva de eficiencia vs carga del motor de la chancadora primaria de 500 HP -440 VAC- 60 Hz [1]

De lo observado en la Figura N° 2 se tiene que para 50 % de carga la eficiencia es 89,8 %, para 25 % de carga la eficiencia es 82 % y para 70 % de carga la eficiencia es 90,4 %.

B. Ahorros en energía logrados con la propuesta

Los ahorros de energía a lograr con el sistema de control planteado se deben a dos aspectos. El primero es por reducción en la cantidad de horas de operación anual en un 45 %. Se observa que la chancadora primaria está trabajando a un bajo índice de carga, por ello se reducirán sus horas de operación y se acumulará diariamente la carga en tolvas de recepción que recibirán el mineral que viene de la mina en camiones, de modo que a través de este “buffer” de acumulación de mineral se trabaje en forma continua a la carga óptima (75% de carga según la curva de eficiencia del motor) y con un menor número de horas de operación anuales.

El segundo aspecto es que mediante el lazo de control en cascada teniendo al variador como actuador final sobre el motor de la faja transportadora, se mantendrá la operación en el punto óptimo de eficiencia.

Determinación de la reducción de horas de operación total de la chancadora para operar constantemente al % óptimo de carga. Para el cálculo se tendrán en cuenta los % de carga operativa del motor y los tiempos de operación asociados a dichas cargas:

$$t = \frac{(0.30 \times 50\%) + (0.50 \times 25\%) + (0.20 \times 70\%)}{75\%} \quad (1)$$

$$t = 0,5533$$

donde:

t = Periodo de operación equivalente en tanto por uno del tiempo total anual actual al que operará el motor en forma constante a la carga óptima de 75 % para la misma producción de la chancadora.

$$t = 0.5333 \times 7200 \frac{\text{horas}}{\text{año}} = 3840 \frac{\text{horas}}{\text{año}} \quad (2)$$

Determinación de los ahorros en energía por operación en el punto de óptima eficiencia con la carga óptima de 75 % del motor de la chancadora primaria durante las 3840 horas/año :

$$\sum_{i=1}^3 A_i = P_0 \times 0.746 \frac{kW}{HP} \times \left(1 - \frac{E_0}{E_F}\right) \times h_i \quad (3)$$

donde:

- A_i = Ahorro de energía anual en el % de carga específico.
- P_0 = Potencia nominal del motor eléctrico (500 HP).
- E_0 = Eficiencia del motor en el % de carga específico.
- E_F = Eficiencia del motor en el % de carga óptimo.
- h_i = Horas de operación anual en el % de carga específico.

Determinación de la energía ahorrada :

$$\begin{aligned} \sum_{i=1}^3 A_i &= \left(500 \times 0.746 \frac{kW}{HP} \times \left(1 - \frac{0.898}{0.906}\right) \times (0.3 \times 3840)\right) + \\ &\left(500 \times 0.746 \frac{kW}{HP} \times \left(1 - \frac{0.820}{0.906}\right) \times (0.5 \times 3840)\right) + \\ &\left(500 \times 0.746 \frac{kW}{HP} \times \left(1 - \frac{0.904}{0.906}\right) \times (0.2 \times 3840)\right) \\ &= 3794 + 67978 + 630 = 72402 \frac{kWh}{año} \end{aligned}$$

Determinación de la energía ahorrada al dejar de operar la chancadora primaria en el 0,4467 del tiempo total anual actual, como consecuencia de la nueva operación a carga óptima del motor de la chancadora primaria en un menor periodo operativo anual :

$$A_e = \frac{\left(500 \times 0.746 \frac{kW}{HP} \times C_p \times (0.4467 \times 7200)\right)}{E_p}$$

donde:

- A_e = Energía anual dejada de consumir al dejar de operar la chancadora primaria en el lapso especificado.
- C_p = Carga ponderada media a la que opera actualmente el motor, en tanto por uno : 0,415
(0.30 × 0.50) + (0.50 × 0.25) + (0.20 × 0.70)
- E_p = Eficiencia del motor a la carga ponderada : 88,7 %

$$A_e = \frac{\left(500 \times 0.746 \frac{kW}{HP} \times 0.415 \times (0.4467 \times 7200)\right)}{0.887}$$

$$A_e = 561283 \frac{kWh}{año}$$

Luego la energía total ahorrada es:

$$72402 \frac{kWh}{año} + 561283 \frac{kWh}{año} = 633685 \frac{kWh}{año}$$

C. Ahorros en costos operativos

Considerando un costo medio de la energía eléctrica en el sector industrial en Perú en 0,05 US\$/kWh, los ahorros en costos operativos serían:

$$633685 \frac{kWh}{año} \times 0.05 \frac{US\$}{kWh} = 31684 \frac{US\$}{año}$$

D. Emisiones de CO2 equivalente evitadas

Las emisiones evitadas se logran con los ahorros de energía en base a las mejoras de eficiencia energética propuestas. Se ha considerado los factores de emisión nacionales según el “Modelo de Cálculo del Factor de Emisiones de CO2 de la Red Eléctrica Peruana- Año 2007” del FONAM, elaborado con el apoyo del Banco Mundial, basado en los procedimiento estándar del Intergovernmental Panel on Climate Change - IPCC [2]

El Factor de Emisión a considerar es 0,5470 tCO2/MWh y representa la cantidad de CO2 que se genera por MWh de electricidad producida para la Red de Energía Eléctrica (SEIN).

$$633.69 \frac{MWh}{año} \times 0.547 \frac{tCO2}{MWh} = 346.63 \frac{tCO2}{año}$$

Esta energía ahorrada permitirá que la empresa contribuya con el planeta con una significativa reducción de emisiones de 346,63 ton CO2/año. Los árboles son sumideros de CO2, como promedio un árbol captura entre 16 y 20 kg de CO2 por año, dependiendo de la especie. Por lo tanto las emisiones evitadas con la implementación propuesta liberan al planeta la disponibilidad para captura de CO2 de no menos de 17 mil árboles aproximadamente.

E. Inversiones a realizar

- (4) Para la implementación de la propuesta se realizarán las siguientes inversiones:

Un variador de velocidad para la faja transportadora, Marca : ABB de 200 HP a 440 VAC, In= 236 A @ 4000 m.s.n.m; Modelo : ACS800-04-0320-5+P901, con tarjetas barnizadas, reactancia en línea, filtro de armónicos. Con E/S análogas y salida de relés, con módulo de interfaz para encoder. Con funciones de PLC, programable para realizar funciones de control con algoritmo PID. Ver Figura 3.

Precio : 18408 US\$ (incluido IGV)



Fig.3. Variador de velocidad ABB ACS800-04-0320-5+P901

Un módulo de comunicaciones Profibus: RPBA-Profibus DP Adapter 64606859

Precio : 342,20 US\$ (incluido IGV)

Un gabinete con sistema de protección y ventilación para instalar el variador de velocidad

Precio : 3550,00 US\$ (incluido IGV)

Un encoder incremental 600 PPR, marca Delta, Modelo ES3-06CN6841

Precio : 550,00 US\$ (incluido IGV)



Fig.4. Encoder incremental 600 PPR Delta

Un transmisor de corriente, con señal de salida estándar de 4-20 mA DC, marca Mod-Tronic, modelo CTX-ACR-3S, AC Current Transmitter.

Precio : 690,00 US\$ (incluido IGV)

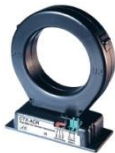


Fig.5. Transmisor de corriente Mod-Tronic, CTX-ACR-3S, AC

Costos de instalación (adaptaciones mecánicas y eléctricas, materiales complementarios, mano de obra y dirección técnica)

Precio : 7200,00 US\$ (incluido IGV)

Inversión Total : 30740 US\$

F. Evaluación Económica VAN, TIR

A una tasa de descuento comercial de 12,5 %, con una inversión de 30740 US\$ se logra un Valor Actual Neto (VAN) de 20853 US\$.- La rentabilidad de la inversión es alta con una Tasa Interna de Retorno (TIR) de 67 % .

El periodo de recuperación de la inversión (NPER) es de un año y un mes.

G. Resultados y Conclusiones

La implementación de variadores de velocidad incorporados en un sistema de control automático con lazos de control PID, sensores, transmisores, con módulos adaptadores para conectividad a redes industriales (Profibus, DeviceNet, Fieldbus, Modbus, Hart, etc.) o a redes comerciales como Ethernet. Ofrece a la actividad industrial y minera oportunidades de eficiencia energética y de reducción significativa de costos operativos, dado los altos consumos de energía que se presentan en estas actividades.

Con la presente propuesta se obtiene ahorros de 633685 kWh/año en energía eléctrica y de 31684 US\$/año anuales en costos operativos y se dejan de emitir 346,63 ton CO₂ /año al ambiente. Complementariamente como consecuencia de la implementación del sistema, los mismos equipos para la misma capacidad productiva trabajarán ahora en sus puntos óptimos de operación solo el 55,33 % del tiempo, dejando el

44,67 % de tiempo restante para aprovechar en incrementar la capacidad operativa de la planta concentradora.

La minería nacional a través de esta propuesta tiene la oportunidad de reducir sus costos de energía por el uso de tecnologías apropiadas -aún en instalaciones antiguas-, lo que reducirá sus costos operativos, con el beneficio adicional de reducir el impacto ambiental en sus operaciones por las emisiones evitadas de CO₂ por la menor energía eléctrica consumida. Por su efectividad este proyecto puede ser replicado en la minería peruana con gran suceso.

En caso que la alimentación a la chancadora primaria se realice a través de fajas transportadoras instaladas en serie, se implementarían variadores de velocidad en cada faja funcionando en cascada, en los que la velocidad de unos dependerán de la señal de otro que sería el variador “maestro”. Al cambiar la velocidad de una faja transportadora, automáticamente variará la velocidad de las otras fajas que están en serie con ella. Para mantener la continuidad y seguridad en el transporte del mineral -evitando indeseadas caídas de mineral fuera de las fajas, el sistema de control “maestro” a implementar tendrá enclavamientos para permitir el arranque y parada de las fajas en serie solo bajo determinada condición. El arranque en secuencia se inicia con el arranque de la chancadora primaria, arrancando luego la faja que alimenta a la chancadora primaria y así sucesivamente en secuencia las fajas sucesivas aguas arriba. La parada se realiza con la secuencia exactamente en sentido contrario, para ello la señal de parada del operador a través de las funciones de control (de PLC) del variador de velocidad “maestro” iniciará la parada del sistema, parando primero la faja que está localizada en la parte más extrema aguas arriba de la chancadora primaria; la parada de cada faja_i sucesiva se hará en base a la condición concurrente siguiente : a) faja_{i-1} anterior ha parado y b) sensor instalado en la cabecera de la faja_i detecta que terminó de vaciar el mineral que transporta, ello para evitar derramamientos por vaciar mineral en faja parada y para que las fajas paren sin dejar mineral sobre ellas. El último equipo en parar en esta secuencia automática será la chancadora primaria, luego de la condición concurrente de que la faja que la alimenta haya parado y que la chancadora haya terminado de triturar mineral.

III. AGRADECIMIENTOS

El autor agradece a Verónica Galindo, Carlos Ortiz, y Christopher Robilliard por su apoyo para la revisión de los conceptos y esquemas vertidos en este documento.

IV. REFERENCIAS

Reportes Técnicos:

- [1] Programa de eficiencia energética regional en los sectores industrial y comercial en Centroamérica, “Manual Técnico Motores Eléctricos”, pp25.
<http://www.bun-ca.org/publicaciones/manuales/espanol/ManualMotores30nov09.pdf>
- [2] Luque Casanave Manuel Humberto ; “Automation: Opportunity for Reducing Energy and Operating Costs”; Magazine edited by Fondo Nacional del Ambiente (National Environmental Fund), Lima, Peru; Revista editada por FONAM/BID; Año 2 N° 3, Enero 2012 ;

- [3] Luque Casanave Manuel Humberto, "New Regulation System for Turbogenerators in Small Hydroelectric Plants"; IX Latin American Meeting of Small Energy Systems (IX ELPAH); edited by Universidad del Comahue, Neuquen, Argentina; November 2001;
<http://www.bsrec.bg/opet/new/cronograma.pdf>