

DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN PROTOTIPO DE GENERADOR HIDRÁULICO PARA ESTUDIO Y DESARROLLO DE ESTRATEGIAS DE CONTROL PARA LA GENERACIÓN ELÉCTRICA EN MINAS SUBTERRÁNEAS

(Design and construction of a prototype of hydraulic generator for study and development of control strategies for electric power generation in underground mines)

Fabián Higuera**, Edward Romero**, Juan España**, John Jairo Niño M. *, Juan Salamanca PhD***

*Escuela de Ingeniería de Minas, Uptc. Grupo de investigación DSP-Uptc. john.ninomerchan@uptc.edu.co **Escuela de Ingeniería Electrónica, Grupo de investigación DSP-Uptc. *** Docente Escuela de Ingeniería Electrónica, director Grupo DSP-Uptc. Juan.salamanca@uptc.edu.co

(Recibido: el 27 de Febrero de 2013 y aceptado 22 de Octubre de 2013)

<p>Resumen: Este trabajo presenta el diseño y control de un generador hidráulico para producir energía en la mina subterránea El UVO de la empresa Paz del Río S.A., aprovechando los caudales de agua que se generan en la explotación de mineral del hierro. El generador está constituido por una rueda Pelton que recibe el agua a través de una servo-válvula, y está conectada a un generador de corriente directa. Se desarrolló un controlador discreto por métodos algebraicos para el control de la servo-válvula con el objetivo de lograr un flujo constante de agua a la rueda Pelton, permitiendo una generación de voltaje constante.</p>	<p>Abstract: This paper presents the design and control of a hydraulic generator to produce energy in the underground mine EL UVO of the company Paz del Río S.A., taking advantage the water flows that are generated in the exploitation of iron ore. The generator is constituted of a Pelton wheel which receives water through a servo valve, and it is connected to a DC generator. It was developed a discrete controller by algebraic methods for controlling the servo valve with the aim of achieving a constant flow of water to the Pelton wheel, allowing a constant voltage generation.</p>
<p>Palabras clave: generador hidráulico, control mediante métodos algebraicos.</p>	<p>Keywords: hydraulic generator, mining, control by algebraic methods.</p>

1. INTRODUCCIÓN

Uno de los principales retos que presenta el mundo moderno es tener un mejor manejo del agua, un recurso que actualmente está en peligro, debido a diferentes factores como el cambio climático y la contaminación. Dentro de los principales usos que tiene el agua en el mundo está la generación de energía eléctrica, puesto que su demanda está creciendo con el incremento de la población y de sus necesidades (Lagos, 2007). La búsqueda y el desarrollo de nuevas técnicas para suministrar energía limpia y de calidad se ha convertido en una prioridad para la mayoría de las naciones. El agua está catalogada como una fuente principal de energía renovable y ocupa un lugar importante dentro de la generación eléctrica mundial.

La industria minera genera un grave impacto ambiental sobre los recursos hídricos cercanos al lugar de explotación. Este problema se conoce como drenaje ácido minero (DAM) (Mortor & Van Niekerk, 1994; National Science and Technology Forum [NSTF] & South African Agency for Science and Technology Advancement [SAASTA], 2011). Se considera como el segundo factor de riesgo ambiental después del calentamiento global. Los DAM son producidos en la medida que la explotación se hace más profunda y el agua en niveles freáticos inferiores se mezcla con el mineral extraído y con los materiales o insumos empleados en el proceso (Mortor & Van Niekerk, 1994; Miranda, Saber & Shinde, 2010). Lo anterior genera un alto grado de contaminación en el agua, haciéndola inútil para el consumo humano. Las minas en las que se producen grandes volúmenes de agua, deben realizar costosas inversiones para extraer y tratar los DAM (Gunson, 2013).

Los niveles de agua en la mina se incrementan debido al avance continuo en los frentes de trabajo y explotación y a la posibilidad de que estén por debajo de los niveles de fuentes hídricas adyacentes (Jornada Iberoamericana, 2011).

Una propuesta para aprovechar el agua generada en la explotación minera consiste en el uso de microgeneradores hidráulicos que producirán electricidad que puede utilizarse para diferentes usos en la mina, como iluminación y comunicación. Para conseguir un funcionamiento eficiente del generador hidráulico, se diseña un sistema de control en el cual se pueden manejar las principales variables de un generador (Salamanca, 2014):

La velocidad de la turbina, la presión del agua y el flujo de agua (Lagos, 2007; Davis, Gifford & Krupa, 1999; Gand, Gengyin, Wei, Ming & Lo, 2009; Nichols & Loving, 2003).

En este artículo de investigación se presenta el diseño, construcción y control de un generador hidráulico movido por una rueda Pelton, el cual es alimentado por DAM. El prototipo se basó en las condiciones de la mina de hierro El UVO, en donde se bombea en promedio un caudal de agua de 150 gal/min y se desagua una corriente de agua de aproximadamente 2in³. Esta agua es tratada químicamente y luego retornada a las fuentes hídricas (Jornada Iberoamericana, 2011; Gunson, 2013). Las principales labores mineras se encuentran por debajo del nivel del río Soapaga, facilitando la filtración de agua. La mina de hierro El UVO tiene un consumo eléctrico muy alto, de 320000 kW, que se debe al gran número de equipos eléctricos que operan en su interior. El agua producida en la explotación minera representa sobrecostos a la empresa puesto que no se le da ningún uso.

El artículo se organiza de la siguiente forma: introducción, diseño y construcción, después se presenta el modelado matemático, diseño del controlador discreto por métodos algebraicos, análisis de resultados y conclusiones.

2. DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DEL PROTOTIPO

Para el diseño del generador se escogió la turbina Pelton, ya que esta opera con bajos caudales de agua y el manejo de este tipo de turbina es más sencillo (Mortor & Van Niekerk, 1994). Esta turbina tiene 27 cm de diámetro y consta de 14 cucharas igualmente distanciadas entre ellas. La turbina se encuentra encerrada en un recipiente de vidrio que almacena 7 litros de agua que serán recirculados, gracias a una bomba de 0.5 Hp que tiene una cabeza de presión de 35m. La bomba reemplaza, en este caso, la energía potencial que puede generar una diferencia de altura entre dos puntos. La bomba entrega el agua a la turbina Pelton a través de una tubería de 1/2". Se instala un manómetro de Bourdon que mide la presión del agua en la tubería y tiene una escala de 0 a 50 PSI. Para controlar el flujo de agua a través de la turbina se usó una electroválvula compuesta por un motor de 12V y un potenciómetro lineal de 10 KΩ y 10 vueltas.

El eje de la turbina Pelton se encuentra acoplado a un sistema de transmisión de engranajes para incrementar la velocidad angular con una relación de 4 a 1. Como generador se utilizó un dínamo de imanes permanentes que entrega un voltaje alterno de forma senoidal, donde su amplitud y frecuencia depende directamente de la velocidad a la que gira el rotor de éste. Se implementó un rectificador de onda completa tipo puente, con un filtro capacitivo para obtener a la salida un voltaje rectificado DC, y por último, se usó como carga una resistencia de 12KΩ.

Realizando pruebas con el generador se consiguió que para una apertura de la válvula del 100 % se obtuvo una presión de agua en la tubería de 5PSI y un voltaje generado de 7,8V, y para una apertura de la válvula del 10 %, el manómetro indicaba 20PSI de presión y un voltaje sobre la carga de 3,2V.

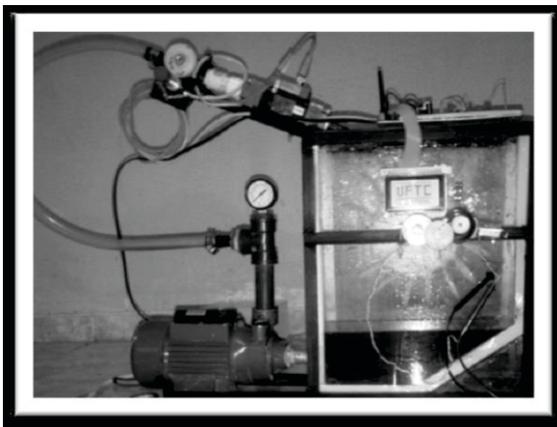


Imagen 1. Prototipo construido.

En la Imagen 1 se observa el prototipo construido.

3. MODELAMIENTO MATEMÁTICO

Para iniciar el modelamiento matemático de nuestro generador hidráulico, en la Figura 2 se muestra un diagrama que representa la interacción de las fuerzas que actúan en el sistema. Este consta de una turbina Pelton que es impulsada por un flujo de agua a través de ella, que produce un torque y hace girar la turbina a una velocidad angular como se analiza en Lagos (2007) y Nichols y Loving (2003). Realizando numerosas pruebas con el generador, no se consiguieron velocidades angulares suficientes en la turbina para generar energía eléctrica considerable, por lo que fue necesario implantar un sistema de transmisión de engranajes para incrementarla, obteniendo a la salida una velocidad angular en el generador que es N veces mayor a la velocidad angular de la turbina ω_r .

$$\omega_g = N\omega_r \quad (1)$$

Como generador eléctrico se utilizó una dínamo de imanes permanentes. Este entrega un voltaje que depende directamente de la velocidad a la que gira el rotor del generador.

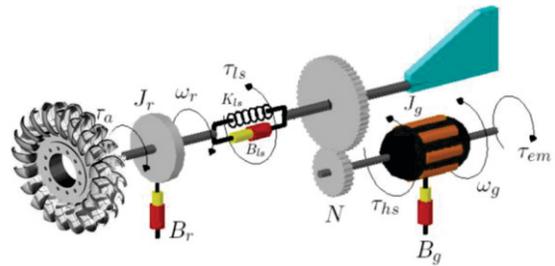


Figura 1. Mecanismo de rotación del generador hidráulico.

En la Figura 1 se muestra el diagrama de fuerzas que intervienen en el mecanismo de rotación. El sistema se divide en dos partes, de alta y baja velocidad.

Sección de baja velocidad:

La sumatoria de torques en esta sección se expresa en la ecuación 2.

$$\tau_a - B_r\omega_r - \tau_f - N\tau_h = J_r\dot{\omega}_r \quad (2)$$

Donde τ_a es el par generado por la fuerza del paso de agua, B_r es el coeficiente de fricción de los rodamientos, ω_r es la velocidad angular de la turbina, τ_h es el par requerido en la parte de alta velocidad para hacer girar el eje del generador eléctrico, que proyectado en la parte de baja velocidad se comporta como una carga y se opone a $\tau \cdot \omega_r J$. Es la inercia del sistema. La varilla posee una rigidez suficientemente grande para evitar su torsión, luego $\tau=0$ la expresión queda definida como se muestra en la ecuación 3.

$$\tau_a - B_r\omega_r - \tau_f - N\tau_h = J_r\dot{\omega}_r \quad (3)$$

Sección de alta velocidad:

El momento de inercia en el eje del generador eléctrico está dado por:

$$\tau_a - B_g \omega_g - \tau_{ind} = J_g \dot{\omega}_g \quad (4)$$

Donde es el coeficiente de fricción en el rotor del dínamo, la velocidad angular del eje del dínamo y la inercia del sistema. El flujo de corriente eléctrica a través de la carga produce un campo magnético que se opone al flujo magnético de los imanes permanentes de la dínamo y genera un par inducido en contra al movimiento.

Generador eléctrico:

Como se dijo anteriormente, el voltaje generado es proporcional a la velocidad angular a la que gira el rotor del dínamo.

$$E_g = K\phi\omega_r \quad (5)$$

Donde K es una constante que depende del generador eléctrico y es el flujo magnético para este caso constante. Para una carga resistiva, la potencia desarrollada está definida por la ecuación 6.

$$P_d = \frac{E_g^2}{R_L} \quad (6)$$

Para nuestro sistema, la potencia desarrollada se encuentra por el orden de los mW y según la ecuación 7 se puede despreciar el torque inducido

$$\tau_{ind} = \frac{P_d}{\omega_g} \quad (7)$$

Simplificando la ecuación 4, se tiene:

$$\tau_h = J_g \dot{\omega}_g + B_g \omega_g \quad (8)$$

Mecanismo completo:

Uniendo las secciones de baja y alta velocidad y reemplazando 1 en 8 y 8 en 3, se obtiene la ecuación 9, que describe el mecanismo de rotación completo.

$$\tau_a - \omega_r [B_r - N^2 B_g] = \dot{\omega}_r [J_r + N^2 J_g] \quad (9)$$

Para encontrar la relación entre el flujo de agua (apertura de la válvula) y el par producido por la fuerza de la misma, se tomaron datos que relacionaron la presión del agua en relación con la apertura de la válvula, obteniendo un comportamiento lineal descrito por la ecuación 10.

$$P(t) = -103.4X(t) + 137.9 \text{ Kpa} \quad (10)$$

Donde P (t) es la presión del agua en Kilo Pascales y X (t) la apertura de la válvula, que varía de 0 a 1, siendo 0 cuando está cerrada y 1 cuando está totalmente abierta.

De acuerdo con la ecuación 11, se puede calcular la fuerza que ejerce el agua sobre las cucharas de la turbina (ecuación 12).

$$P = \frac{F}{A} \quad (11)$$

$$F(t) = -103.4\pi r^2 X(t) + 137.9\pi r^2 \text{ KN} \quad (12)$$

Siendo el radio de la tubería en metros. Ahora calculamos el par que produce el agua sobre el mecanismo de rotación descrito en la ecuación 13.

$$\tau_a = -103.4\pi r^2 R X(t) + 137.9\pi r^2 R \text{ Nm} \quad (13)$$

Siendo R la distancia desde el eje de la turbina hasta el punto de contacto del agua con las cucharas de la turbina.

Reemplazando las ecuaciones 1 y 13 en 9, además de aplicando transformada de Laplace, obtenemos el modelo matemático de nuestro generador, mostrado en la ecuación 14.

$$\frac{E_g(s)}{X(s)} = \frac{\frac{15\pi r^2 K\phi}{J_r + N^2 J_g}}{S + \frac{B_r - N^2 B_g}{J_r + N^2 J_g}} \quad (14)$$

Donde Eg(s) es el voltaje generado y X(s) es la apertura de la servo válvula.

4. OBTENCIÓN CURVA DE REACCIÓN

Para regular este caudal es importante diseñar y aplicar una estrategia de control de carácter óptimo como la de muerte súbita. Para aplicar esta estrategia, que es de carácter discreto, es necesario obtener la curva de reacción que relaciona cambios en el flujo aplicado a la rueda Pelton, con cambios en la apertura de la válvula en torno a las condiciones nominales de operación.

Para obtener la curva de reacción del proceso se estudió el sistema en lazo abierto. Con ese propósito se estabilizó el sistema para una apertura de la válvula del 20 %, luego se aplicó un cambio a la entrada, para lo cual se modificó la apertura al 80 % y se observó el comportamiento del voltaje generado.

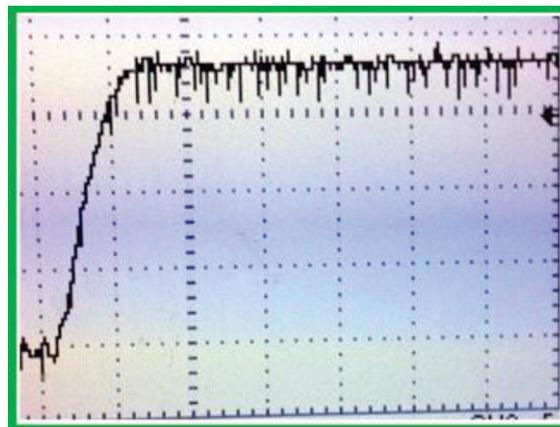


Figura 2. Curva de reacción del sistema.

En la Figura 2 se encuentra el comportamiento de la planta. Se puede observar que se puede modelar como un sistema de primer orden con retardo, para ello se utiliza el método de los dos puntos de Smith y se obtiene la ecuación 15 que describe el comportamiento del sistema.

$$Gp(s) = \frac{0.75}{0.45s + 1} e^{-0.05s} \quad (15)$$

La función continua no tiene ceros y posee un único polo en $S=-2.22$, luego el sistema es estable, ya que el polo se ubica en el eje real negativo.

5. DISEÑO DEL CONTROLADOR DISCRETO POR MÉTODOS ALGEBRAICOS

El esquema del controlador para implementar es el siguiente (Nichols & Loving, 2003).

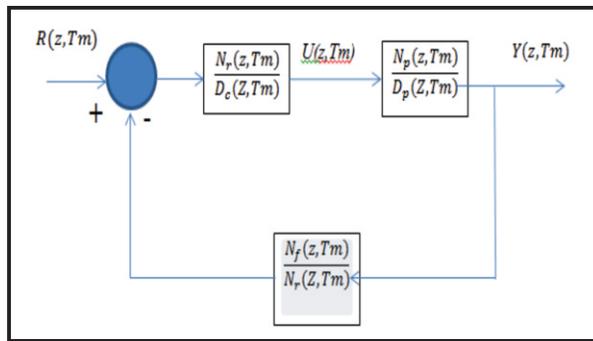


Figura 3. Diagrama de bloques controlador algebraico.

En la Figura 3 se observa el esquema del controlador. Partiendo de la función de transferencia, se debe obtener el modelo en espacio de estados en tiempo continuo.

$$Gp = \frac{X(s)}{Eg(s)} = \frac{K_c}{\tau s + 1} e^{-\theta s} \quad (16)$$

$$\tau s X(s) + X(s) = K_c e^{-\theta s} Eg(s)$$

Aplicando la transformada inversa de Laplace, obtenemos la ecuación diferencial con retardo en la señal de entrada.

$$\theta = (d-1)T_m + \Delta T_m \quad (21)$$

A partir de esta ecuación obtenemos el modelo en espacio de estados de tiempo continuo:

$$\dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t - \theta) \quad (18)$$

$$A = -\frac{1}{\tau}; B = -\frac{K_c}{\tau}; C = 1; D = 0 \quad (19)$$

Para el diseño de la estrategia de control se debe discretizar el modelo en espacio de estados de tiempo continuo. El modelo equivalente en espacio de estados en tiempo discreto con entrada generada mediante ZOH, es el siguiente:

$$\begin{aligned} x(k+1 T_m) &= A_d x(k T_m) \\ &+ B_{d0} u(k-d T_m) \\ &+ B_{d1} u(k-d-1 T_m) \end{aligned} \quad (20)$$

Dónde:

$$\theta = (d-1)T_m + \Delta T_m \quad (30)$$

Espacio de estados discretos:

$$\varphi(t) = l^{-1} [SI - A]^{-1}$$

$$\varphi(t) = e^{t/\tau}$$

$$A_d = e^{-\frac{T_m}{\tau}}$$

$$B_{d0} = \int_0^{T_m - \Delta\theta} \varphi(\gamma) B \partial\gamma$$

$$B_{d0} = K_c \left[1 - e^{-\frac{T_m - \Delta\theta}{\tau}} \right] \quad (21)$$

$$B_{d1} = \int_0^{\Delta\theta} \varphi(T_m, \gamma) B \partial\gamma$$

$$B_{d1} = \int_0^{\Delta\theta} \varphi(T_m, \gamma) B \partial\gamma$$

Tomando un periodo de muestreo múltiple del retardo ($\Delta\theta=0$)

$$B_{d0} = K_c \left[1 - e^{-\frac{T_m - \Delta\theta}{\tau}} \right]$$

$$B_{d1} = 0 \quad (22)$$

$$C_d = C$$

$$D_d = D$$

El modelo discretizado queda

$$Gp(z, T_m) = z^{-d} c_d (zI - A_d)^{-1} (B_{d0} z + B_{d1})$$

$$Gp(z, T_m) = \frac{K_c \left[1 - e^{-\frac{T_m}{\tau}} \right]}{z^d - z^{d-1} e^{-\frac{T_m}{\tau}}} \quad (23)$$

Tomando un periodo de muestreo de 0.05s

$$\theta = (d-1)T_m$$

$$d=2$$

$$Gp(z, T_m) = \frac{0.0788}{z^2 - 0.894z} \quad (24)$$

$$Np(z, T_m) = 0.0788 ; mp = 0$$

$$Dp(z, T_m) = z^2 - 0.894z ; np = 2$$

Por lo tanto, el modelo de referencia debe tener las siguientes condiciones:

$$gd [Dp(z, T_m)] - gd [Nm(z, T_m)] \geq 2 \quad (25)$$

Modelo de referencia discreto:

$$Gm(z, Tm) = \frac{0.1535}{z^2 - 0.8465z} \quad (26)$$

$$Nm(z, Tm) = 0.1535; \quad (27)$$

$$Dm(z, Tm) = z^2 - 0.8465z$$

Grado de $Nf(z, Tm)$

$$mf \geq np - 1 \quad (28)$$

$$mf \geq d - 1$$

$$mj = 1$$

$$Nf(z, Tm) = b_{f0}z + b_{f1}$$

Grado de $T(z, Tm)$

$$l \geq np - n + mf \quad (29)$$

$$l \geq d - d + d - 1$$

$$l / 1$$

$$T(s, Tm) = z + \gamma_0$$

Se asume

$$T(z, Tm) = z \quad (30)$$

Cálculo de $Nr(z, Tm)$

$$Nr(z, Tm) = \frac{Nm(z, Tm)T(z, Tm)}{Np(z, Tm)} \quad (31)$$

$$Nr(z, Tm) = \frac{0.1535z}{0.0788}$$

$$Nr(z, Tm) = 1.948z \quad (23)$$

Grado de $Dc(z, Tm)$

$$nc = d + (d - 1) - d \quad (32)$$

$$nc = d - 1$$

$$nc = 1$$

$$Dc(z, Tm) = z + a_0$$

Ecuación diofántica

$$Dp(z, Tm)Dc(z, Tm) + Np(z, Tm)Nf(z, Tm) = T(z, Tm)Dm(z, Tm) \quad (33)$$

$$(z^2 - 0.894z)(z + a_0) + 0.0788(b_{f0}z + b_{f1}) = (z)(z^2 - 0.8465z)$$

$$a_0 - 0.894 = -0.8465$$

$$a_0 = 0.0475$$

$$-0.894 a_0 + 0.0788 b_{f0} = 0$$

$$b_{f0} = 0.5389$$

$$b_{f1} = 0$$

$$Dc(z, Tm) = z + 0.0475 \quad (34)$$

$$Nf(z, Tm) = 0.5389z \quad (35)$$

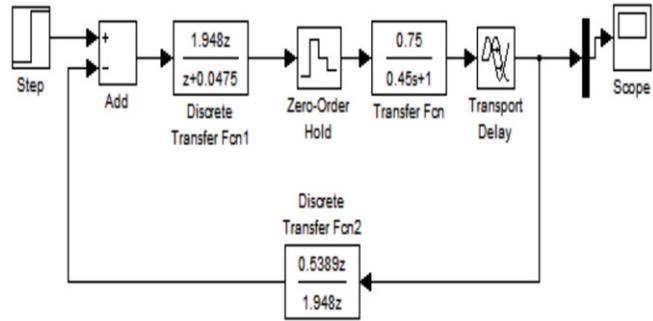


Figura 4. Implementación del controlador discreto en MatLab Simulink

En la Figura 4 se encuentra el diagrama de bloques implementado en Simulink para el control discreto de la planta.

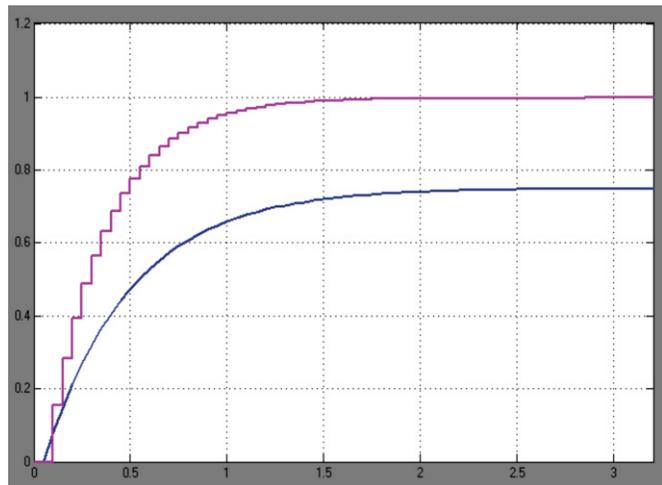


Figura 5. Curvas del sistema.

En la Figura 5 se observa la curva de reacción de la planta en lazo abierto (azul) y la curva del sistema controlado (morado).

5. ANÁLISIS DE RESULTADOS

El sistema de control funcionó satisfactoriamente, tanto en simulación como en la práctica. En las gráficas se observa el alcance de la referencia perseguida.

La señal de control generada por la estrategia se caracteriza por un pico alto al comienzo y luego se reduce a un valor muy pequeño. Los rangos están dentro de los valores permitidos para la señal de control de acuerdo con las fuentes de poder.

La generación de voltaje se da según la relación de generación de la rueda Pelton. Al principio es muy baja, pero se puede elevar con un mejor y más eficiente diseño de la rueda Pelton.

6. CONCLUSIONES

En la explotación minera, especialmente del hierro y del carbón (Gunson, 2013), se puede generar una gran cantidad de agua, la cual se debe evacuar de manera permanente. Esta agua, que generalmente es de carácter ácido, se arroja a las fuentes hídricas exteriores, con o sin ningún tratamiento, desperdiciando su potencial energético.

Se puede utilizar el agua generada por la explotación minera para generar electricidad, para iluminación interna o incluso para ventilación auxiliar de pequeños frentes de trabajo.

Para optimizar la generación de energía eléctrica, por el agua generada en la explotación minera mediante el uso de una rueda Pelton, es importante asegurarle un buen caudal constante de agua a la rueda (Lagos, 2007; Nichols & Loving, 2003).

Para regular este caudal es importante diseñar y aplicar una estrategia de control como se ve en Salamanca (2014), de carácter óptimo como la de muerte súbita. Para aplicar esta estrategia, que es de carácter discreto, es necesario obtener la curva de reacción que relaciona cambios en el flujo aplicado a la rueda Pelton con cambios en la apertura de la válvula, en torno a las condiciones nominales de operación.

Aunque la eficiencia mostrada por este prototipo es aun baja para pensar en una aplicación real, se demostró la posibilidad de utilizar este recurso hídrico que normalmente se desperdicia. La eficiencia del sistema se puede aumentar con un mejor diseño de la rueda Pelton, como se ve en (Lagos, 2007; Davis, Gifford & Krupa, 1999; Gand, Gengyin, Wei, Ming & Lo, 2009; Nichols & Loving, 2003), lo cual constituye el trabajo futuro de este proyecto.

7. REFERENCIAS

Akcil, A. & Koldas, S. (2006). Acid Mine Drainage (AMD): Causes, Treatment and Case Studies. *Journal Cleaner Production*, 14, 1139-1145.

Davis, M. W., Gifford, A. H. & Krupa, T. J. (1999). Microturbines an Economic and Reliability Evalaution for Commercial Residential and Remote Load Applications. *IEEE Trans on Power Systems*, 14(4), 1556-1562.

Gand, L., Gengyin, L., Wei, Y., Ming, Z. & Lo, K. L. (2009). *Modeling and Simulation of a microturbine Generation System Based on PSCAD/EMTDC*. China: National Natural Science Foundation of China.

Gunson, A.J. (2013). *Quantifying, Reducing and Improving Mine Water Use*. Vancouver: The University of British Columbia UBC Library.

Gunson, A.J., Klein, B., Veiga, M. & Dunbar, S. (2012). Reducing Mine Water Requirements. *Journal of Cleaner Production*, 21(1), 71-82.

Jornada Iberoamericana de Medio Ambiente Subterráneo. (2011). *Tratamiento de drenajes ácidos de mina*.

Lagos, J.I.A. (2007). *Diseño montaje y pruebas de un prototipo de micro-central hidroeléctrica con turbina Pelton*. Santiago de Chile: Universidad de Chile Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas Departamento de Ingeniería Mecánica.

Miranda, M, Saver, A. & Shinde, D. (2010). *Mine the Gap: Connecting Water Riks and Diclosure in the Mining Sector*. Washington D.C.:

Mortor, K. L. & Van Niekerk, F. A. (1994). Mine Drainage Control and Environment Protection by Using Grounting Technology and the Hidrological Approach. In *Mine Water and Environmental* (pp. 41-44).

National Science and Technology Forum (NSTF) & South African Agency for Science and Technology Advancement (SAASTA). (2011). *Proceeding of a Critical Thinkers Forum an Acid Mine Drainage: Possible Solutions*. Johannesburgo: s.n.

Nichols, D. K. & Loving, K. P. (2003). Assessment of Microturbine Generators. *IEEE Power Engineering Society Generate Meeting*, 13-17.

Salamanca, J. M. (2014). *Diseño de estrategias de control para el seguimiento de modelos de referencia utilizando técnicas de espacio de estados y métodos algebraicos*. Sogamoso: Uptc (por publicar).