

IDENTIFICACIÓN DIFUSA DE ACCIONAMIENTO DE BOMBA CENTRÍFUGA PARA EL TRANSPORTE EFICIENTE DE PULPA LATERÍTICA

Fuzzy identification based centrifugal pump drive for efficient transport of lateritic pulp

**Luis D. Rojas Purón
Alberto Turro Breffe
Rafael Pérez Barreto
Raúl Izquierdo Pupo**

**E-mail: lrpuron@ismm.edu.cu
Departamento de Ingeniería Eléctrica, ISMM de Moa**

RESUMEN

En este artículo se realiza la identificación difusa de un accionamiento eléctrico de una instalación de hidrot transporte de pulpa laterítica, con el objetivo de encontrar las zonas de mejores rendimientos del sistema. Para esto se hace un estudio de los subsistemas eléctrico y mecánico a partir de la incidencia de las variables que más participan en la transferencia de energía, desde el motor de inducción hacia la bomba centrífuga. Se muestra un análisis de las funciones obtenidas, partiendo de la ecuación de los torques del accionamiento eléctrico, que permiten evaluar su eficiencia tanto en el contexto tecnológico como en el experimental.

PALABRAS CLAVE: lógica difusa, accionamiento de bombas, eficiencia de hidrot transporte.

ABSTRACT

In this article is carried out the fuzzy identification of an electric working of an installation of hidrot transporte of lateritic pulp with the objective of finding the areas of better efficiency of the system. For this it is made a study of the subsystems electrician and mechanic starting from the incidence of the variables that more participates

in the energy transfer from the induction motor toward the centrifugal pump. In the same one, an analysis of the functions is shown obtained starting from the electric drives torques equation, and its allow to analyze your efficiency through the experimental and technological context of the system.

KEY WORDS: Fuzzy logic, electric drives of pumps, efficiency of hydrotransport.

INTRODUCCIÓN

Los estudios encaminados a mostrar el comportamiento de un sistema de accionamiento eléctrico del hidrot transporte de un fluido a base de las correlaciones entre sus principales variables de trabajo y el gasto energético para determinadas condiciones de explotación, son de inestimable valor para reflejar su racionalidad desde el punto de vista técnico (Rojas-Purón y Morera, 2003). Por eso es que resulta muy esclarecedora la evaluación del transporte de hidromezclas lateríticas a partir de datos experimentales y la selección de sus parámetros con mediciones en los subsistemas eléctrico y mecánico, de tal forma que permita establecer un algoritmo de análisis lo suficientemente integral de todo el sistema.

Los accionamientos eléctricos son usualmente modelados empleando la teoría de circuitos eléctricos con corrientes o flujos enlazados, seleccionados como variables de estados para la parte eléctrica, y la velocidad o posición del sistema para la parte mecánica. Con frecuencia, la estructura interna del sistema de accionamiento eléctrico contiene relaciones no lineales con dificultad para modelar, como por ejemplo el tiempo o zona muerta, efectos de histéresis y de saturación.

En accionamientos de altas prestaciones y para propósitos de control, se necesita extraer automáticamente las relaciones características del sistema que determinan las propiedades de sus variables de estado y su dependencia analítica. Esta investigación usa la Lógica Difusa (LD) como una herramienta para la modelación automática del sistema de accionamiento eléctrico de bombas centrífugas.

El proceso de aprendizaje desarrollado durante la modelación difusa se caracteriza por su capacidad de reproducir el comportamiento del sistema a partir de reglas extraídas desde su observación y medición directas mediante el mecanismo de entrenamiento elaborado durante la obtención de datos experimentales.

La aproximación clásica de la modelación de un sistema de accionamiento eléctrico no comienza como una suficiente representación de los sistemas actuales. Los modelos son muy completos para representar algunas relaciones o especificidades del proceso, de manera que contienen una estructura con relaciones no lineales que dificultan la modelación. Sugeno y Tanaka (1991), Sugeno y Yasukawa (1998), y Wang y Mendel (1992), muestran que la LD es una herramienta poderosa para representar relaciones en espacios de estados, y así mismo es posible introducir más eficazmente el comportamiento dinámico del sistema de accionamiento eléctrico y electromecánico (Costa Branco and Dente, 1996; 1997).

La modelación difusa permite incorporar capacidades de autoaprendizaje dentro del sistema y diseñar el esquema de control para compensar los efectos dinámicos de los términos no lineales. Cuando la incertidumbre de algún parámetro es grande, usa un lazo de realimentación con coeficientes de ajuste que puedan adecuarlo.

En este artículo se realiza la identificación difusa de un accionamiento eléctrico de una instalación de hidrotransporte de pulpa laterítica, con el objetivo de encontrar las zonas de mejores rendimientos del sistema. Para esto se hace un estudio de los subsistemas eléctrico y mecánico a partir de la incidencia

de las variables que más participan en la transferencia de energía, desde el motor de inducción hacia la bomba centrífuga.

MATERIALES Y MÉTODOS

Modelación difusa

La modelación con el empleo de la técnica difusa consiste inicialmente en duplicar la experiencia experta con la ingeniería del conocimiento al control de procesos (Pedrycs, 1984). Aunque esta información cualitativa puede presentar limitaciones, como la adquisición de conocimientos, en general presenta errores y algunas lagunas. Otra fuente de información es la cuantitativa, la cual usualmente se utiliza junto a la información cualitativa para completar el modelo y así se produce una nueva data de información (Takagi y Sugeno, 1998).

La principal diferencia entre estas aproximaciones está en cómo representar el conocimiento dentro del modelo. Mientras la aproximación lingüística describe el comportamiento del sistema por medio de reglas de tipo IF-THEN, usando sólo ajustes difusos (variables lingüísticas), la aproximación híbrida emplea variables lingüísticas en la parte de la condición de la regla (IF) y usa un valor numérico en la parte de conclusión (THEN), siendo considerada como una función de variables de entradas (Takagi y Sugeno, 1998; Sugeno y Yasukawa, 1998).

La modelación lingüística puede ser dividida en dos tipos:

- Modelación relacional
- Modelación natural

La modelación relacional (Pedrycs, 1984; Costa Branco y Dente, 1993) establece un ajuste de todas las reglas posibles, basada en atribuir particiones lingüísticas a cada variable de entrada y salida. En esta modelación se calcula para cada regla el respectivo valor de verdad de cómo cada regla contribuye a describir el comportamiento del sistema. El juego del cálculo de todas las reglas constituye una matriz multidimensional.

Usando la teoría de ecuaciones relacionales (Higashi y Klir, 1993) cada elemento de la matriz puede ser calculado como el grado del miembro de la regla en el modelo del sistema extraído.

La modelación natural no emplea las ecuaciones relacionales para obtener el modelo. Las reglas son codificadas desde una fuente de información y tomadas desde el proceso por una base de conocimiento de operador and/or dado en la literatura (Moblád y Ostergaard, 1982).

La modelación híbrida permite el empleo de técnica de aprendizaje usando redes neuronales en la extracción de cada regla (Low *et al.*, 1993; Wang y Mendel, 1992; Wang, 1997). El ajuste de los parámetros que componen las condiciones de las reglas forman parte de las funciones de pertenencias con ancho y posición en el universo en discusión. En la parte de la conclusión, los parámetros son términos de la función que calcula la conclusión de la regla (Lim, 1993).

La técnica de modelación difusa constituye una nueva y potencial herramienta en el diseño e implementación de controladores en los accionamientos eléctricos y electromecánicos (Costa Branco y Dente, 1996).

Mecanismo de aprendizaje

Durante el proceso de aprendizaje son usadas dos datas de ajuste: una para la etapa de entrenamiento y otra para probar el modelo extraído.

Inicialmente, se emplea el juego de entrenamiento. Utilizando el algoritmo basado en el método de los *clusters*, se extraen las reglas del modelo y su valor de conclusión. Luego, el modelo tiene que ser sintonizado con su valor de conclusión por el método del gradiente descendente (Wang, 1997), donde queda elaborado el proceso del modelo inverso difuso. Subsecuentemente, la prueba de la data de ajuste, que tiene ejemplos no presentados en la fase de entrenamiento, es verificada en el modelo de generalización construido.

Inicialización del modelo usando el algoritmo del método de los *clusters*

La primera fase de la inicialización de la modelación por el algoritmo del método de los *clusters* es la conclusión de cada regla. El concepto de *cluster*, cuando se usa LD (Bezdek y Pal, 1992), asocia cada valor de los datos con un grado entre cero y uno, que representa el grado de pertenencia de los miembros en la regla. Esto permite que cada muestra de los datos pertenezca a un múltiplo de la regla con diferente grado. Para esto se pueden asignar, por ejemplo, los ajustes difusos como:

NB – muy negativo; NM – medio negativo; NS – pequeño negativo; ZE – cero; PS – pequeño positivo; PM – medio positivo; PB – muy positivo.

La adquisición de la regla está dada por (1):

$$IF[x_1.isPM).and.(x_2.is.NM)]THEN.[y.is.z^{(i)}] \quad (1)$$

La parte de condición de la regla está caracterizada por los ajustes difusos PM y NM. La conclusión

está dada por $z^{(i)}$, extraída a base de los ajustes difusos dentro del dominio PM y NM, representados por círculos llenos en la región de la regla $R^{(i)}$.

El grado de contribución de cada función en la regla está dado por el producto de cada miembro de la condición en la región del dominio (2), y expresa su peso en el valor de la variable de salida:

$$\mu_{PM}(x_1) \cdot \mu_{NM}(x_2) \quad (2)$$

Esta operación es ejecutada para cada ejemplo hecho en la región de la regla.

El valor de la conclusión final $z^{(i)}$ de la regla l , es calculado desde la función de pertenencia usando el método del centroide.

El error medio cuadrático se determina como:

$$E = \frac{1}{2} (y - y_{ref})^2 \quad (3)$$

Sistema de accionamiento electromecánico: Motor eléctrico + bomba centrífuga

El sistema está compuesto por un motor de inducción MI (ver Fig. 1), que acciona una bomba centrífuga BC, la cual envía fluido con densidad variable a un recipiente donde se desea mantener constante el nivel de la hidromezcla. Para esto, el sistema cuenta con un convertidor de frecuencia tipo inversor sinusoidal de tensión, con modulación por ancho de pulsos, motor de inducción trifásico MI con rotor de jaula de ardilla (220 V; 7,33 N.m; 1500 rpm), una bomba centrífuga PB 315/40 (360 m³/h, 40 m).

En éste se toman mediciones de la presión en los puntos de succión e impulsión de la bomba BC, así como en la sección recta de la tubería de transporte, con el objetivo de calcular las pérdidas del subsistema. La medición de presión en los puntos de entrada y salida de la bomba centrífuga se fundamenta, entre otras cosas, en el hecho de conocer la presencia del fenómeno de cavitación en estas turbo-máquinas, fenómeno muy frecuente en los procesos de transporte de fluidos en plantas químicas, como es el caso. Este fenómeno puede ocasionar una sensible afectación en el trabajo de la bomba BC que se llena de gases o cavidades vacías, debido a que cuando la presión de succión de la bomba se iguala a la presión de vapor del fluido, éste va pasando al estado gaseoso. Cuando esto ocurre, aparecen fuertes sacudidas o vibraciones en la red hidráulica y su rendimiento disminuye drásticamente.

Por otra parte, conociendo la diferencia de presión entre dos puntos o secciones donde se desplaza determinado volumen de fluido, es posible calcular

su velocidad lineal, aspecto que se observa en la expresión (8).

$$H = \frac{\Delta p}{\rho \cdot g} = \frac{v^2}{2 \cdot g} \quad (4)$$

donde: H- es la altura de carga de presión [m]; Δp – es la diferencia de presión [Pa]; v – es la velocidad lineal del fluido [m/s]; g – es la aceleración de la gravedad [m/s²].

En el caso de la bomba centrífuga (ver Fig. 2), con la medición de sus presiones de entrada y salida en el rodete de trabajo es posible determinar la velocidad periférica de impulsión de la hidromezcla, a partir de lo cual se pueden predecir las pérdidas y los regímenes de trabajo en la turbo-máquina.

La experimentación a escala semi-industrial ha sido realizada en una instalación experimental (Fig. 3) construida en el Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa; otra parte de las mediciones experimentales en los accionamientos de bombas centrífugas fue efectuada en la planta de lixiviación de la empresa Comandante Ernesto Che Guevara.

Los componentes de la instalación de hidrot transporte, dados en la Figura 3, donde se experimenta el sistema de accionamiento eléctrico de bomba, son:

1, 2 y 19: recipientes de pulpas a diferentes densidades

3, 4: bombas centrífugas accionadas por motores de inducción (55 kW)

5: instrumentos indicadores de presión (kg/cm²)

6: tubo de Venturi, para medición de caída de presión (mm de H₂O)

7, 8 y 9: tubería de 102, 150 y 200 mm de diámetro; 10 y 11, tubería de 100 mm de diámetro; 12, 13, 14, 15 y 17: válvulas de estrangulamiento de tornillos; g8: medición del gasto o caudal mediante un flujómetro indicador (m³/h); p₁, p₂, p₃, p₄, p₅, p₆: puntos de medición de presión (Pa).

El sistema experimental del accionamiento eléctrico a escala semi-industrial está compuesto por dos motores asíncronos con rotores de jaulas de ardillas trifásicos, los cuales accionan bombas centrífugas de rodetes cerrados que envían materiales lateríticos en forma de pulpa por tuberías de 102 y 150 mm.

El sistema electro-hidráulico tiene un comportamiento dominado por la carga que representa la densidad de la pulpa por transportar, porque ella ofrece una determinada resistencia a la transferencia de masa de fluido que se mueve de un punto a otro en la sección de tubería y que exige un gradiente de energía cinética que tiene su fuente en la potencia de entrada del ac-

cionamiento eléctrico (Rojas Purón y Morera, 2003). Esta relación se puede observar en la Figura 4. Al mismo tiempo, existe una relación entre las pérdidas hidráulicas y su velocidad de transporte, tal como se muestra en la Figura 5.

El comportamiento de las pérdidas hidráulicas en función de la velocidad de transporte de la cola a diferentes densidades i (Pa/m) vs. v (m/s), es una valiosa información para la sintonización del controlador difuso, la cual ofrece las zonas de velocidades de transporte con menores pendientes hidráulicas; por lo tanto, es la más conveniente desde el punto de vista técnico-económico.

Generación de los datos de entrenamiento

Para obtener alguna información relevante acerca de las leyes físicas que rigen el comportamiento del proceso, se usa una base de conocimiento enmarcada en la conversión electromecánica de la potencia en el accionamiento y las leyes hidrodinámicas de la turbo-máquina y la red hidráulica. El resultado de la modelación debe ofrecer la medida del rendimiento del sistema.

Como el sistema contiene un gran número de variables que pueden ser seleccionadas para caracterizar su dinámica, es importante hacer algunas consideraciones en forma de hipótesis y simplificaciones a fin de concentrar la atención en un pequeño, pero representativo, juego de variables. La conversión electromecánica de energía está relacionada con la potencia de entrada al accionamiento y sus diferentes manifestaciones en cada eslabón del sistema, hasta llegar y desarrollarse en la bomba centrífuga, que es donde tiene lugar la conversión final de la energía. En esto participan: Pe, la potencia de entrada del accionamiento eléctrico; ω , la frecuencia angular del subsistema eléctrico que alimenta las variables de entrada del motor eléctrico, y que determina la velocidad rotacional de la bomba, a partir de lo cual se establece su torque mecánico que decide la cantidad de fluido enviado a través de la red hidráulica; el valor de la densidad ρ del fluido o hidromezcla, porque de acuerdo con ésta será mayor o menor el gradiente de energía para desarrollar por la turbo-máquina. Una buena parte de la energía desarrollada por la bomba centrífuga está destinada a transmitirle la energía cinética al fluido y ésta la determina la altura de presión H entregada por la bomba y que depende del valor de la densidad del fluido.

Aunque usualmente se estima una relación casi proporcional entre la potencia consumida y la densidad del fluido, en el caso de transporte de pulpa

laterítica no es así, porque en muchas ocasiones (y las mediciones diarias lo demuestran) se tienen valores altos de potencia en la entrada del accionamiento; sin embargo, debido a factores de temperatura y presencia de la cavitación con densidades medias, la bomba trabaja con un gradiente de potencia relativamente más alto que lo estimado; además; para potencias cercanas, la pulpa tiene densidad diferente. Esto quiere decir que la variable densidad ρ es significativa para el análisis del comportamiento del accionamiento electromecánico.

El modelo directo de nuestro sistema puede ser representado por la relación (5) siguiente, haciendo $Pe_{ref} = y_{ref}$:

$$y = f(Pe_{ref}, \omega, \rho) \quad (5)$$

Para esto, dos diferentes juegos de valores experimentales son adquiridos durante el proceso de modelación: un juego para el entrenamiento y otro para las pruebas.

Modelación difusa del accionamiento eléctrico de bomba centrífuga

La modelación, usando algoritmo difuso, está basada en el juego de datos de entrenamiento.

El estudio consiste en obtener el modelo inverso del accionamiento, que está representado por (6):

$$z = f^{-1}(y_{ref}, y, \rho) \quad (6)$$

El modelo difuso está compuesto por siete funciones de pertenencias triangulares atribuidas a la señal de referencia y_{ref} ; 11 funciones de pertenencias triangulares de la señal de la potencia de entrada y , así como por 7 funciones de pertenencias gaussianas de la densidad ρ .

El primer paso del proceso de modelación extrae el modelo difuso, utilizando el algoritmo basado en el método de los *cluster*.

Para el ajuste fino del modelo inicial anterior se usa el método del gradiente descendente. Para el proceso de aprendizaje, los parámetros utilizados por el algoritmo fueron: 50 iteraciones ($K = 50$) de una tasa de aprendizaje de 0,8, y lo mismo para el modelo difuso empleando el algoritmo del método de los *clusters*.

Algoritmo de aprendizaje difuso

Las variables antecedentes reciben diferentes grados lingüísticos, que pueden ser:

NB – muy negativo; NM – medio negativo; NS – pequeño negativo; ZE – cero; PS – pequeño positivo; PM – medio positivo; PB – muy positivo.

Así, los espacios de entrada están particionados en ajustes de reglas difusas, tal como se muestra en la Figura 8.

La Figura 6 representa tres reglas de un modelo compuesto por dos variables antecedentes: x_1, x_2 con la salida y . Cada celda en la Figura 6 compone una regla con la forma siguiente. Por ejemplo, para celda blanca:

IF (x_1 es (PM)) y (x_2 es (NM)) THEN $y =$ (PB)

Wang (1997) y Wang y Mendel (1992) detallan los pasos principales del proceso de aprendizaje. Se tienen algunos resultados que dirigen la observación del proceso de hidrotransporte hacia el comportamiento de la potencia de entrada del accionamiento (relacionada con las tensiones y corrientes de línea de convertidor de frecuencia, en lo que se incluye la tensión de directa del circuito de enlace del inversor sinusoidal), así como la velocidad del flujo de la pulpa y su densidad determinada por la concentración del material sólido en ella (L. Rojas Purón y otros, 2002; A. Turro y otros, 2002).

El transporte de pulpa laterítica en condiciones de tecnología CARON se realiza a diferentes temperaturas y a través de bombas centrífugas donde están presentes elementos en estado sólido, líquido y también gaseoso; estos últimos ocasionan cavidades indeseadas en el flujo que circula por las tuberías, lo cual disminuye de forma sensible el rendimiento de las instalaciones de hidrotransporte. Es por ello, además, que en este trabajo se muestra gráficamente cómo se comportan las pérdidas en el transporte a diferentes densidades. Un fluido recién caracterizado lo representa la pulpa, también llamados residuos lixiviados de laterita (o denominados colas), de la empresa Comandante Ernesto Che Guevara de Moa, cuyo modelo reológico (A. Turro y otros, 2002, L. Garcell, Pérez Barreto, Izquierdo, 2002) ofrece los elementos para la modelación de su hidrotransporte. Es de interés mostrar las diferentes correlaciones entre variables, utilizando la base de conocimientos desde los ensayos y mediciones experimentales realizados en el proceso de transporte de cola desde la Planta de Lixiviación hacia un depósito o dique, y complementando dicho estudio mediante la modelación semi-industrial en la instalación experimental de hidrotransporte del ISMM de Moa.

La base de conocimientos construida para su modelación por lógica difusa se encuentra formada por la base de datos y la base de reglas, que permiten la toma de decisiones reflejadas en el algoritmo de dirección del proceso, y está elaborada por

observaciones muy detalladas y mediciones de operarios expertos.

A. Modelos matemáticos

1. Subsistema eléctrico: Motor de inducción trifásico: Las ecuaciones del motor eléctrico MI basadas en la Teoría del Campo Orientado donde tienen mayor incidencia las expresiones expuestas más abajo:

Las relaciones entre las corrientes y tensiones en los ejes dd y qq con sus componentes están definidas por las expresiones siguientes:

$$\sigma L_s \frac{di_{ds}}{dt} = -R_s i_{ds} + \omega_e \sigma L_s i_{qs} + U_{ds} \quad (7)$$

$$\sigma L_s \frac{di_{qs}}{dt} = -R_s i_{qs} - \omega_e \sigma L_s i_{ds} - \omega_e \frac{L_m}{L_r} \psi_{dr} + U_{qs} \quad (8)$$

$$\psi_{dr} = i_{ds} L_m \quad (9)$$

El torque o momento electromagnético M_{em} es tomado por:

$$M_{em} = 1,5 p (\psi_{sd} i_{sq} - \psi_{sq} i_{sd}) \quad (10)$$

donde:

p – es el número par de polos del motor eléctrico; U_{ds}, U_{qs} – son las tensiones en el estator del motor en los ejes dd-qq, [V]; U_{dr}, U_{qr} —son las tensiones en el rotor en los ejes dd-qq, [V]; i_{ds}, i_{qs} —son las corrientes en el estator en los ejes dd-qq [A]; i_{dr}, i_{qr} —son las corrientes en el rotor en los ejes dd-qq [A].

ψ_{ds}, ψ_{qs} —son los flujos magnéticos en el estator en los ejes dd-qq, [Wb]; ψ_{ds}, ψ_{qs} —son los flujos magnéticos en el rotor en los ejes dd-qq, [Wb]; L_s, L_r —son las inductancias en los devanados del estator y rotor, [mH]; L_m —es la inductancia mutua del motor eléctrico, [mH]; —es el llamado coeficiente de Blond.

También, el momento electromagnético desarrollado por el motor de inducción se puede determinar como:

$$M_{em} = 1,5 \cdot p \cdot (i_{sq} \psi_{dr} + i_{sd} \psi_{qr}) \quad (11)$$

donde,

p – es el número par de polos del motor eléctrico.

Y hace el enlace entre las variables eléctricas y la carga mecánica de acople en el motor MI. Las ecuaciones para el proceso dinámico del motor, tomando la aceleración angular y la velocidad en el árbol del motor, son expresada por:

$$M_{em} - M_c = sJ\Omega_r + B\Omega \quad (12)$$

donde:

J es el valor de la inercia total del motor, más la de la bomba BC [kg.m/s²]

M_c es el momento o torque de carga desde el sistema hidráulico [N.m]

$$\Omega_r = \frac{M_{em} - M_c}{sJ + B} \quad (13)$$

2. Subsistema hidráulico: Teóricamente el caudal desarrollado por la bomba centrífuga en el circuito hidráulico es función de la velocidad angular de rotación Ω_r , y esta depende de la frecuencia angular ω .

$$Q_b = Q_b(\omega) \quad (14)$$

Y el flujo o caudal de enlace es proporcional a la diferencia de presión Δp a través de la bomba, como:

$$Q_b = K_l \Delta p = K_l (p_{succ} - p_{imp}) \quad (15)$$

donde: K - es el coeficiente de enlace o proporcionalidad de la bomba.

Una variación ΔV de cierto volumen del fluido bajo presión es proporcional a la diferencia de presión Δp en el volumen, y proporcional al volumen total del fluido. El volumen que cambia es entonces dado por:

$$\Delta V = \frac{V}{\beta} \Delta p \quad (16)$$

donde

β - es el módulo del instrumento medidor de fluido. La compresibilidad del fluido es expresada por:

$$Q_c = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta V}{\Delta t} = \frac{V dp}{\beta dt} \quad (17)$$

La capacidad del caudal absorbida por la bomba centrífuga va a corresponder al cambio del volumen de la bomba BC, el cual es expresado como:

$$Q_o = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta V}{\Delta t} = \frac{A dy}{\beta dt} = Av \quad (18)$$

donde

A - es el área de la sección de salida de la bomba [m²]; y —es el desplazamiento del fluido [m]; v —es la velocidad del fluido a la salida del rodete de trabajo de la bomba [m/s].

El caudal desarrollado por la bomba BC está acorde a la masa de fluido desplazada, y lo componen los caudales dados por la bomba, menos el caudal de circulación en el rodete de trabajo de la misma y el caudal gastado durante la compresibilidad en el proceso de transferencia de flujo hacia la salida:

Las ecuaciones del subsistema mecánico son:

$$N_b = \frac{H \cdot Q \cdot \rho}{102 \cdot \eta_b} \quad (19)$$

η_b - es la potencia mecánica desarrollada por la bomba centrífuga [kW]; Q - es el caudal o gasto desarrollado por la bomba [m³/h]; ρ - es la densidad específica del fluido [kg/m³]; η_b - representa el rendimiento de la bomba [%].

El momento de carga M_c es función de la potencia y del número de revoluciones de la bomba.

$$M_c = f(\omega, \Delta p, Q, \rho) = f(\omega, H, Q, \rho) \quad (20)$$

Dado que el rendimiento del sistema MI - BC está determinado por la relación entre la potencia de salida —potencia mecánica en el árbol del motor— y la potencia de entrada —potencia eléctrica del motor—, de ahí se infiere que el rendimiento de la bomba centrífuga es una función como (21),

$$\eta_b = f(Q, H, \omega, \rho) \quad (21)$$

considerando el fluido hidráulico como incompresible. Esta hipótesis es válida desde el volumen total del fluido usado en nuestra instalación, con valores apreciables de la presión. Como el caudal desarrollado por la bomba es una función de su velocidad y, por tanto, de la frecuencia angular, y estimado que la relación entre el caudal de la bomba y su altura de carga es conocida, el subsistema hidráulico puede ser representado, en forma simplificada, por una relación funcional que recoge estas tres variables Q, H y el número de revoluciones de la turbo-máquina, y es conocida por velocidad específica n_s , está dada en sí por (22):

$$n_s = \frac{n \cdot \sqrt{Q}}{H^{\frac{3}{4}}} \quad (22)$$

donde

n - es el número de revoluciones de la bomba centrífuga [rpm].

Entonces, resumiendo, la función relacional para la bomba centrífuga depende de dos variables, como se expresa en (23):

$$y = f(n_s, \rho) \quad (23)$$

El rendimiento del sistema electro-hidráulico es una función de variables, tanto del motor eléctrico MI como de la bomba centrífuga BC; donde esencialmente interviene la potencia de entrada P_e del motor, tomada desde el inicio del sistema; la frecuencia angular de la corriente del motor que define la velocidad de rotación del accionamiento y que de-

termina la velocidad periférica de transporte del fluido; la velocidad específica de la turbo-máquina, y la densidad ρ de la hidromezcla.

$$\eta = f(P_e, n_s, \rho) \quad (24)$$

La relación (24), por simple inspección, facilita el análisis de las propiedades principales presentadas por el algoritmo de la modelación difusa del sistema MI -BC, cuando usamos un sistema real, aclarando que la influencia de la temperatura está implícita en el valor de la densidad específica de la hidromezcla (Rojas Purón y M. Morera, 2003).

La transferencia de potencia electromagnética del motor MI en mecánica rotacional en la bomba centrífuga BC está asociada con las componentes activas y reactivas de la energía que desarrolla el accionamiento.

La ecuación principal del accionamiento en función de los momentos o torques desarrollados en su árbol, está dada:

$$M_{em} = J \frac{d\omega_r}{dt} + M_c(\omega_r) + B\omega_r \quad (25)$$

donde:

M_{em} - es el momento electromagnético del motor de inducción [N.m]; J es el momento de inercia de las partes rotatorias del motor [kg.m²]; M_c es el momento de carga mecánica de la bomba centrífuga [N.m]; ω_r es la velocidad angular de rotación del rotor [rad/s]; B es el coeficiente que tiene en cuenta la fricción en los rodamientos del motor.

Entonces, es posible escribir la ecuación de los momentos del accionamiento como:

$$M_{em} = J \frac{d\omega_r}{dt} + B\omega_r + \left(\frac{\rho \cdot H \cdot v \cdot A}{102 \eta_b \eta_r \omega_r} \right) \quad (26)$$

Nos queda:

$$M_{em} - \frac{\rho \cdot H \cdot v \cdot A}{102 \eta_b \eta_r \omega_r} = J \frac{d\omega}{dt} + B\omega_r \quad (27)$$

En esta expresión (27) se precisa la componente mecánica del torque resistivo que ejerce la bomba en el sistema de accionamiento eléctrico. Esto ayuda a elaborar un mecanismo de entrenamiento para el aprendizaje del comportamiento de las variables del sistema, obtenidas desde los parámetros dependientes, corriendo a diferentes niveles de cargas el accionamiento.

RESULTADOS

Veamos el comportamiento del error de la señal adquirida, tal como lo muestra la Figura 7, dada por la

modelación en comparación con el valor experimental obtenido desde la medición en el campo de la señal y el rendimiento del accionamiento de bomba centrífuga con diferentes cargas mecánicas.

El rendimiento del accionamiento de bomba a diferentes densidades de la pulpa transportada (Fig. 8), sigue un comportamiento típico para estos tipos de bomba, y se observa la zona de mejores valores entre 200-270 m³/h, y mucho más elevados para las densidades de 3 800 y 1 500 kg/m³, porque la carga de la bomba es mayor y más estable. No obstante, las pérdidas por fricción de la pulpa con el rodete de trabajo de la bomba y las tuberías se incrementan, pero su caudal o gasto es más estable y crece considerablemente la potencia mecánica que tiene que aportar la bomba para el transporte del fluido.

Aprovechando esta base de conocimientos, podemos mostrar para diferentes números de revoluciones de la bomba centrífuga (Fig. 9), los rendimientos del accionamiento y la potencia requerida (en kW) para que su punto de operación se encuentre en la zona adecuada.

De la Figura 9, podemos extraer que la zona más eficiente del accionamiento es entre 175 - 300 m³/h para velocidades entre 1 200 - 1 500 rpm, que estarían dentro de rendimientos entre 0,7 - 0,85. En la práctica, estas bombas centrífugas operan con valores de rendimientos promedios entre 0,42 - 0,58, debido a mala operatividad y a estar sometidas a frecuentes efectos de la cavitación.

CONCLUSIONES

1. Las variables que más inciden en el comportamiento de la eficiencia del hidrot transporte de pulpa laterítica son: la potencia de entrada del accionamiento P_e , la velocidad específica de la bomba centrífuga n_s y la densidad de la pulpa transportada ρ .
2. Existe una dependencia directa entre la potencia consumida y el volumen de mineral transportado, lo que define así su gasto energético durante el transporte de pulpa, y ésta incide en la eficiencia del sistema.
3. Es apreciable la influencia de la densidad o porcentaje de sólido en peso de las hidromezclas en el comportamiento estructural y energético del hidrot transporte de pulpas residuales, y debe ser tenida en cuenta en los algoritmos de control del accionamiento.
4. Es válida la base de conocimientos desarrollada para el diseño de esquemas de control de accionamientos del hidrot transporte de pulpa, teniendo en cuenta los parámetros de los subsistema eléctrico

y mecánico, y sirve de base de datos para las reglas de aprendizaje en algoritmos difusos.

5. La modelación difusa del accionamiento eléctrico de bomba centrífuga para el transporte de pulpa laterítica permite una simulación adecuada del sistema, lo cual se verificó durante el mecanismo de aprendizaje con un error permisible.
6. El algoritmo por el método de los *clusters* permite establecer, con buena aproximación, la zona del dominio que representaría los valores más fieles de operación eficiente del sistema de accionamiento de hidrot transporte de laterita.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- BEZDEK, J.C., AND S.K. PAL (1992): *Fuzzy Models for Pattern Recognition*, IEEE Press, Piscataway, N. J., pp. 57-78.
- COSTA BRANCO, P. J. AND J. DENTE (1996): "New approaches on structure identification of fuzzy models: case study in an electromechanical system", in *Fuzzy Logic, Neural Networks, and Evolutionary Computation* (LNCS/Lecture Notes in Artificial Intelligence), T. Furuhashi and Y. Uchikawa, eds. Berlin, Germany: Springer-Verlag, pp. 104-143.
- COSTA BRANCO, P. J., J. A. DENTE, L. X. WANG AND J. MENDEL (1993): "Generating fuzzy rules by learning from examples", *IEEE Trans. on Systems Man and Cybernetics*, vol. 22, no. 6, julio, pp. 34-51.
- HIGASHI, M. AND G. KLIR (1993): "Identification of fuzzy relational systems", *IEEE Trans. on Systems Man and Cybernetics*, vol. SMC-14, no. 2, pp. 349-355.
- LIM, H. (1993): "A methodology for neural network training for control of drives with nonlinearities", *IEEE Trans. on Industrial Electronics*, vol. 40, no. 2, abril 1993.
- LOW T., T. LEE AND H. LIM (1993): "A methodology for neural network training for control of drives with nonlinearities", *IEEE Trans. on Industrial Electronics*, vol. 40, no. 2, abril 1993.
- MOBLAD, L. AND J. OSTERGAARD (1982): *Control of cement kiln by fuzzy logic. Editions approximate reasoning in decision analysis*. Amsterdam, Holland, pp. 389-400.
- PEDRYCS, W. A. (1984): "Identification of fuzzy relational systems", *Fuzzy Set Syst.*, vol. 13, pp. 153-167.
- ROJAS PURÓN L., M. MORERA HERNÁNDEZ (2001): "Optimización de eficiencia de accionamiento eléctrico para transporte de pulpa", SIE-2001, Universidad Central de Las Villas, Santa Clara, julio, pp. 123-131.
- ROJAS PURÓN L., M. GARCÍA RENTÉ, R. IZQUIERDO Y R. PÉREZ BARRETO (2002): "Matriz GEM: una llave de optimización de accionamientos de bombas para pulpa laterítica", FIE, Santiago de Cuba, junio 2002, pp. 567-573.
- ROJAS PURÓN L., M. MORERA HERNÁNDEZ (2003a): "Supervisor gráfico de accionamiento eléctrico asistido por MATLAB". Taller Nacional de NTIC aplicadas a la Ingeniería Eléctrica, ISPJAE. Ciudad de La Habana, junio, pp 1-6.
- ROJAS PURÓN L., M. MORERA HERNÁNDEZ (2003b): "Control de eficiencia de accionamiento de bomba centrífuga usando lógica difusa", SIE-2003b, Universidad Central de Las Villas, Santa Clara, nov., pp. 324-331.

- SUGENO, M. AND K. TANAKA (1991): "Successive identification of a fuzzy model and its applications to prediction of a complex system", *Fuzzy Set Syst.*, vol. 42, pp. 315-334.
- SUGENO, M. AND T. YASUKAWA (1998): "A fuzzy-logic-based approach to qualitative modeling", *IEEE Trans. Fuzzy Systems*, vol. 1, no. 2, mayo, pp. 7-31.
- TAKAGI T. AND M. SUGENO (1998): "Fuzzy identification of systems and its applications to modeling and control", *IEEE Trans. on Systems Man and Cybernetics*, vol. SMC-15, no. 1, pp. 116-132.
- TURRO, A., L. GARCELL Y R. IZQUIERDO (2002): "Influencia de diferentes factores sobre el comportamiento reológico de las suspensiones de desechos lixiviados (colas) del proceso industrial CARON", *Revista de Tecnología Química*, no. 3, pp. 27-38.
- TURRO, A., G. RAILIAN Y B. DAKUSKIN (2002): "Influencia del nivel de reserva en la capacidad de trabajo de los sistemas de bombeo", en *Máquinas mineras y electromecánica*, San Petersburgo, Rusia.
- WANG, L. (1997): *Adaptive Fuzzy Systems and Control*, PTR Prentice Hall.
- WANG, L. X. AND J. MENDEL (1992): "Generating fuzzy rules by learning from examples", *IEEE Transaction on Systems Man and Cybernetics*, vol. 22, no. 6, julio.

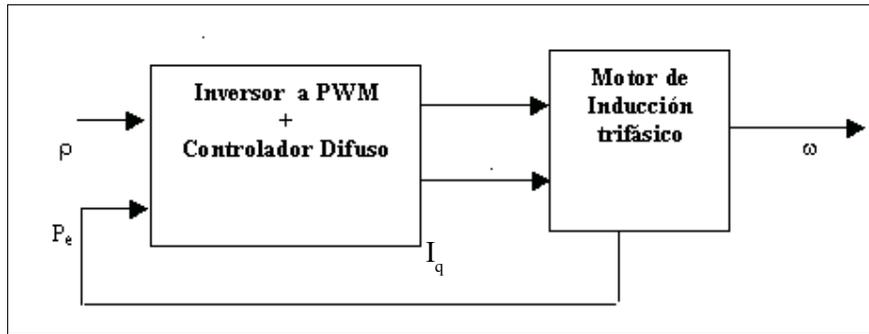


Figura 1. Subsistema del accionamiento eléctrico del motor de inducción.

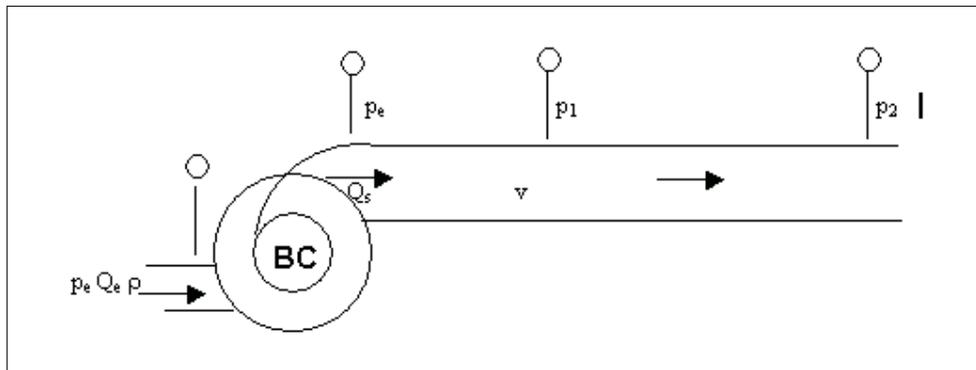


Figura 2. Subsistema hidráulico del accionamiento con la bomba centrífuga.

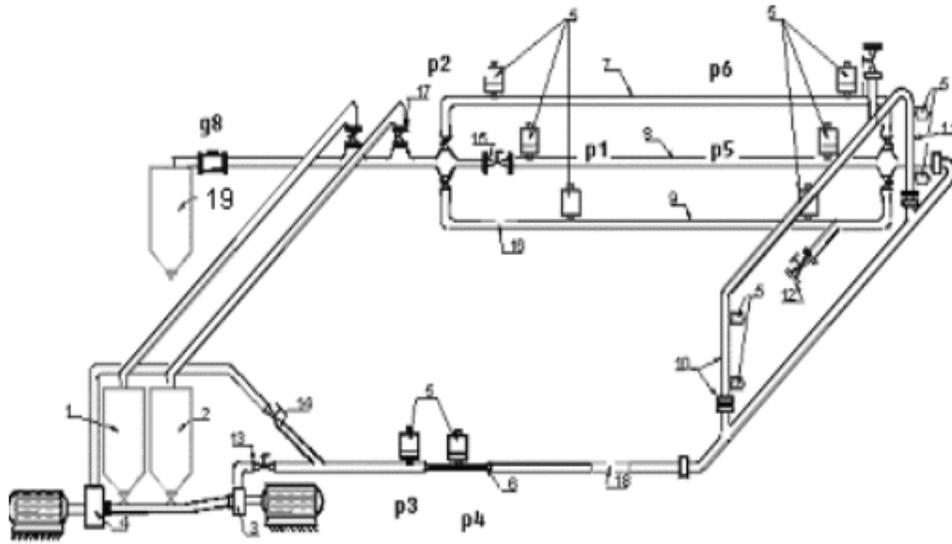


Figura 3. Accionamiento eléctrico de bombas centrífugas para el transporte de pulpa.

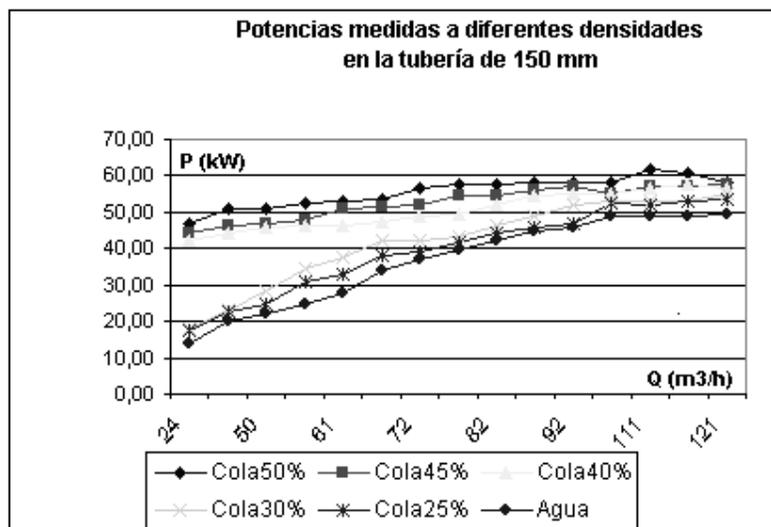


Figura 4. Comportamiento del consumo de potencia eléctrica a diferentes densidades de la cola laterítica.

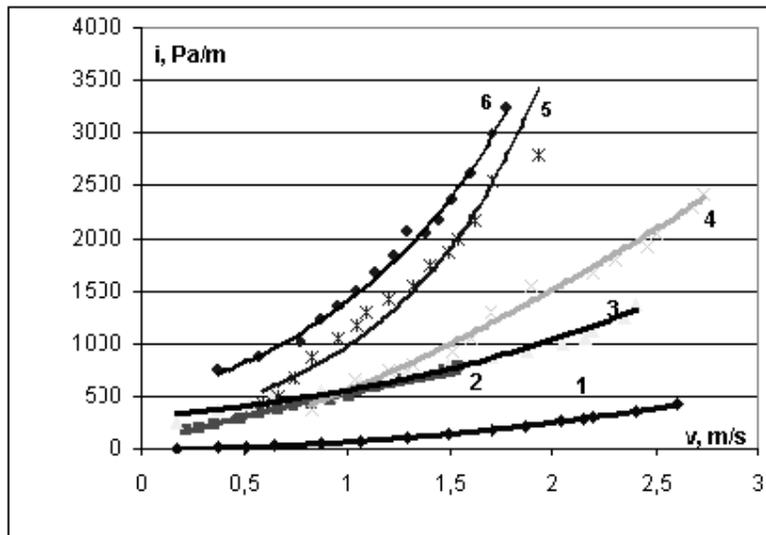


Figura 5. Dependencia de $i f(v)$ para el movimiento de las colas en un tubo circular. (D= 150 mm) a T= 60°C a las concentraciones: 1- Agua; 2- 25 %; 3- 30 %; 4- 40 %; 5- 45 %; 6- 50 %.

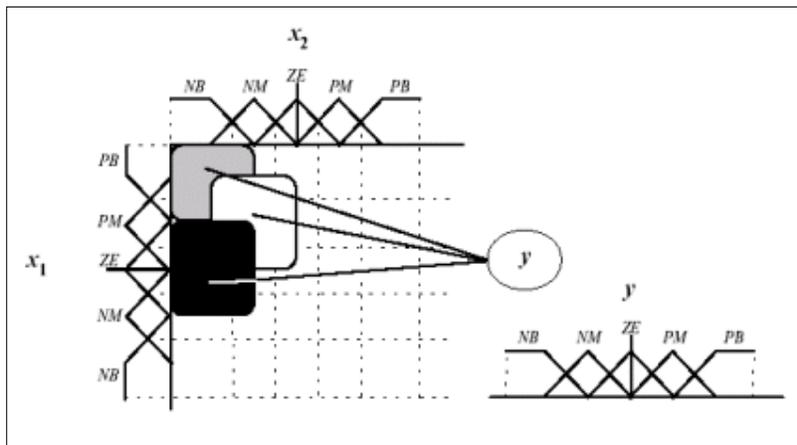


Figura 6. Obtención de las conclusiones de las reglas difusas dentro del dominio.

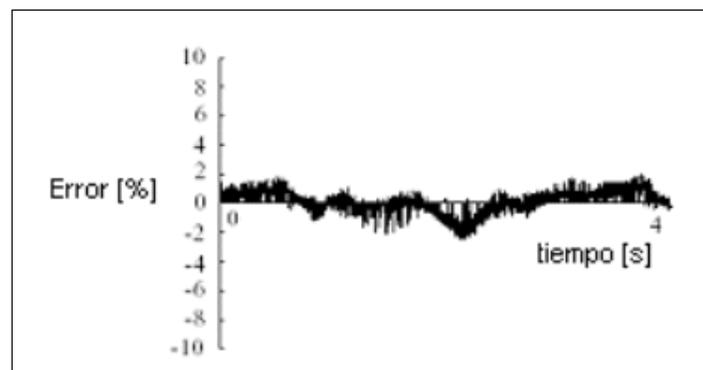


Figura 7. Error obtenido durante el proceso de aprendizaje.

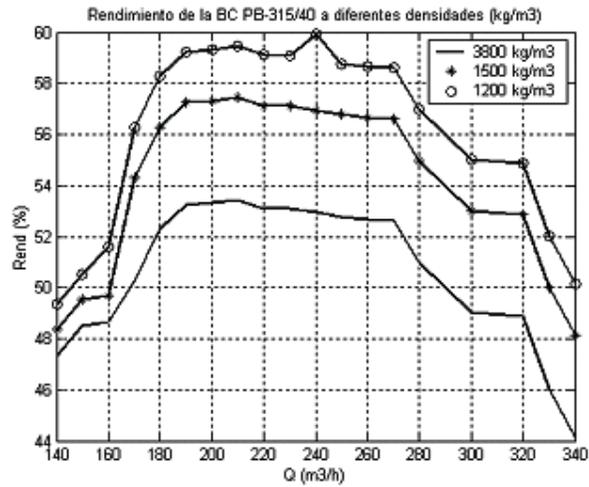


Figura 8. Rendimiento de la bomba centrífuga PB-315/40 a diferentes densidades de la pulpa laterítica.

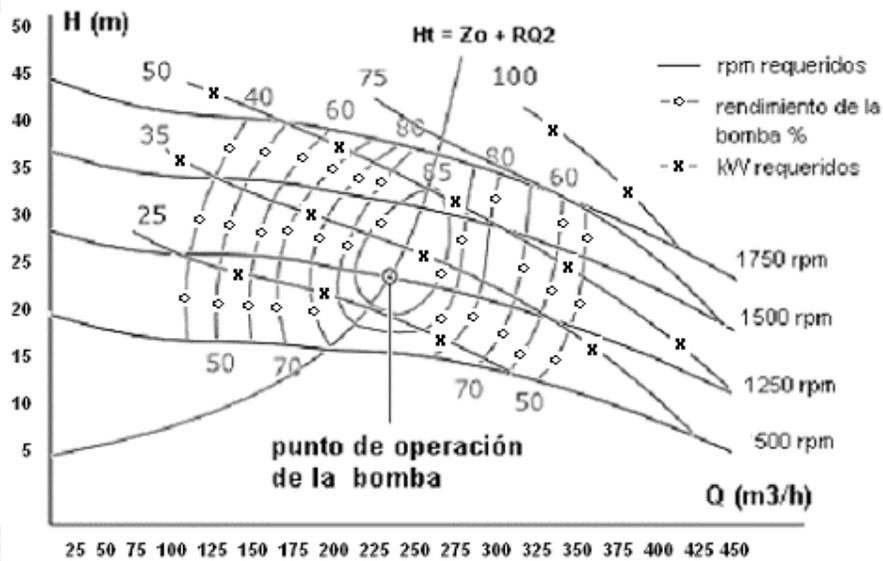


Figura 9. Característica de operación de la bomba centrífuga a diferentes números de revoluciones.