



Identificación de accionamiento de motor de inducción con bomba centrífuga usando lógica difusa

Luis D. Rojas
Mario Morera
Ángel Columbié

Recibido: Septiembre del 2004
Aprobado: Noviembre del 2004

Resumen / Abstract

Con el objetivo de indicar zonas de trabajo con mejores rendimientos en los sistemas de accionamientos electrohidráulicos, se realiza una identificación de los subsistemas del motor de inducción con bomba centrífuga encargada del transporte de hidromezclas de pulpas lateríticas, atendiendo a las variables que más participan en la transferencia de energía, y con esto, supervisar y diagnosticar con anticipación su eficiencia. Se muestra un algoritmo con identificación difusa que correlaciona las funciones ofrecidas desde la ecuación de los momentos del accionamiento eléctrico sobre la base de las pérdidas con el fin de minimizar la potencia de entrada del sistema desde su contexto tecnológico y experimental.

Palabras clave: lógica difusa, accionamiento eléctrico de bombas, eficiencia de accionamientos

With objective to indicate sure areas of work with high yields in the system of electro-hydraulic workings, its is performance an identification of the subsystems of the induction motor with centrifugal pump that transports pulp latheritic hydromixes, assisting to the variables that more participates in the energy transfer, and with this to supervise and to diagnose their efficiency in advance. A fuzzy algorithm is shown that correlates the functions offered from losses based the moments equation of electric drives with the purpose of minimizing the input power working from the experimental and technological context of the system.

Key words: fuzzy logic, electric drives of pumps, efficiency electrical drives

INTRODUCCIÓN

Los estudios encaminados a mostrar el comportamiento de un sistema de accionamiento eléctrico del hidrot transporte de un fluido determinado basado en las correlaciones entre sus principales variables de trabajo y el gasto energético para determinadas condiciones de explotación, son de estimable valor para reflejar su racionalidad desde el punto de vista técnico.¹

Es por eso, 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 forma tal que permite establecer un algoritmo de análisis lo suficientemente integral de todo el sistema.

Los accionamientos eléctricos son usualmente modelados usando 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. Frecuentemente la estructura interna del

sistema de accionamiento eléctrico contiene relaciones no lineales con dificultad para modelar; por ejemplo, el tiempo o zona muerta, efectos de histéresis y de saturación.

En accionamientos de altas prestaciones y para propósitos de control, se necesitan 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 algoritmo difuso permite generalizar, memorizar y obtener un aprendizaje aproximado del proceso a través de un mecanismo entrenado para este propósito

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. Recientes artículos²⁻⁴ muestran que la lógica difusa es una herramienta poderosa para representar relaciones en espacios de estados, y así mismo se puede introducir más eficazmente el comportamiento dinámico del sistema de accionamiento eléctrico y electromecánico.^{5,6}

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

MODELACIÓN DIFUSA

La modelación usando la técnica difusa consiste inicialmente en duplicar la experiencia experta con la ingeniería del conocimiento al control de procesos.⁷ Aunque esta información cualitativa puede presentar limitaciones como la adquisición de conocimientos, usualmente 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 producen nuevos datos de información.⁸

La principal diferencia entre estas aproximaciones está en cómo representar el conocimiento dentro del modelo. Mientras la aproximación lingüística describe el comportamiento del sistema a través de reglas de tipo IF-THEN usando solo ajustes difusos (variables lingüísticas), la aproximación híbrida usa 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.⁸

La modelación lingüística puede ser dividida en dos tipos:

- Modelación relacional.
- Modelación natural.

La modelación relacional^{7,9} establece un ajuste de todas las reglas posibles basadas 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,¹⁰ 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 usa las ecuaciones relacionales para obtener el modelo. Las reglas son codificadas desde una fuente de información tomadas desde el proceso por una base de conocimiento de operador *and/or* dado en la literatura.¹¹

La modelación híbrida permite el empleo de técnica de aprendizaje usando redes neuronales en la extracción de cada regla.^{4,12} 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.

Las técnicas de modelación difusa constituye una nueva y potencial herramienta en el diseño e implementación de controladores en los accionamientos eléctricos y electromecánicos.^{5,6}

MECANISMO DE APRENDIZAJE

Durante el proceso de aprendizaje son usados dos datos de ajuste. Una para la etapa de entrenamiento y otra para probar el modelo extraído.

Empleando el algoritmo basado en el método de los clusters,¹³ 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, donde queda elaborado el proceso del modelo inverso difuso. Subsecuentemente, la prueba de los datos 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 lógica difusa,¹¹ asocia a cada valor de los datos un grado entre cero y uno que representa el grado de los miembros en la regla. Esto permite que cada muestra de la data pertenezca a un múltiplo de la regla con diferente grado.

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

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

La parte de condición de la regla está caracterizada por los ajustes difusos PM y NM. La conclusión está dada por $z^{(i)}$, extraída sobre la 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 dada 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 en (y').

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

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 i es calculada desde la función de pertenencia usando el método del centroide.

El error medio cuadrático se determina como:

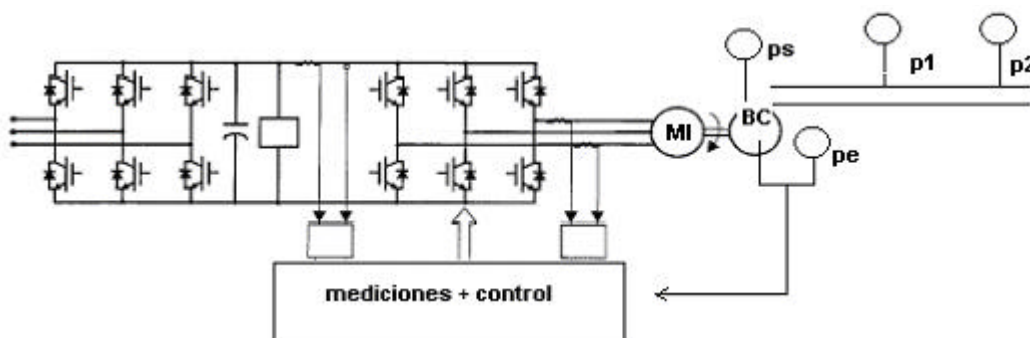
$$E = \frac{1}{2}(y - y_{ref})^2 \quad \dots(3)$$

SISTEMA DE ACCIONAMIENTO ELECTROMECAÁNICO: MOTOR ELÉCTRICO + BOMBA CENTRÍFUGA

El sistema está compuesto por un motor de inducción MI (figura 1) que acciona una bomba centrífuga BC que envía fluido con densidad variable a un recipiente donde se desea mantener constante el envío 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, 1 500 rpm), una bomba centrífuga PB 315/40 (360 m³/h, 40 m).

En este se toman mediciones de la presión en los puntos de succión e impulsión de la bomba BC (figura 2), así como en la sección recta de la tubería de transporte con el objetivo de calcular las pérdidas del subsistema.



Sistema del accionamiento eléctrico del motor de inducción.

La medición de presión en los puntos de entrada y salida de la bomba centrífuga (figura 2) 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 y es debido a que cuando la presión de succión de la bomba se iguala a la presión de vapor del fluido, y este va pasando al estado gaseoso. Durante esto 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 entonces calcular su velocidad lineal, aspecto que se observa en la expresión (4).

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

donde:

H: Altura de carga de presión [m].

Δp : Diferencia de presión [Pa].

ρ : Densidad de la pulpa [kg/m^3].

v : Velocidad lineal del fluido [m/s].

g: Aceleración de la gravedad [m/s^2].

En el caso de la bomba centrífuga, 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, y a partir de lo cual se pueden predecir las pérdidas y los regímenes de trabajo en la turbo-máquina.

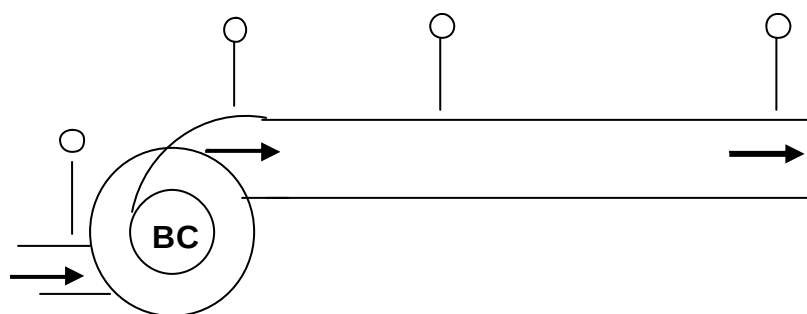
La experimentación ha sido tomada desde una instalación experimental (figura 3) construida en el Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa; recolectando estos resultados con mediciones realizadas en los accionamientos de bombas centrífugas de la propia planta minero metalúrgica Comandante Ernesto Che Guevara.

El sistema experimental a escala semiindustrial del accionamiento eléctrico está compuesto por dos motores de inducción de jaula de ardilla trifásicos que accionan una bomba centrífuga de rodete cerrado que envía material laterítico en forma de pulpa por tuberías de 102 y 150 mm a un recipiente cerrado a determinada altura.

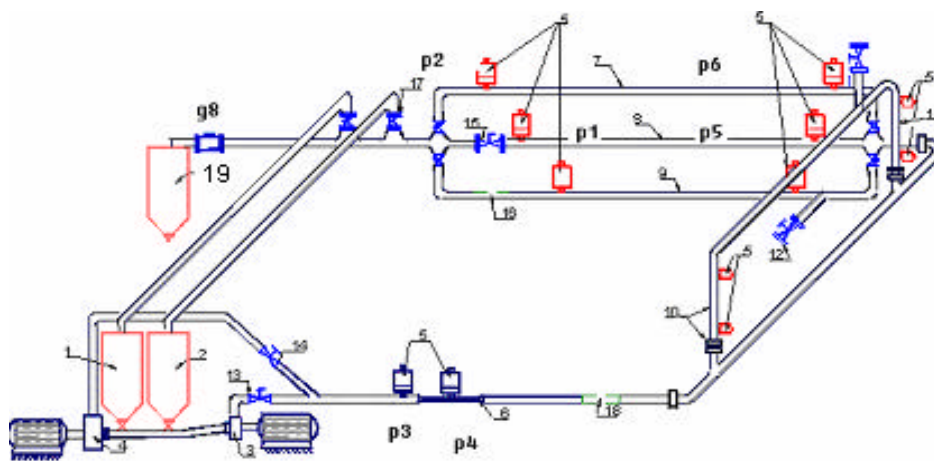
Los componentes de la instalación de hidrotransporte dados en la figura 3, donde se experimenta el sistema de accionamiento eléctrico de bomba son:

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/cm^2]; 6: tubo de Venturi, para medición de caída de presión (mm de H_2O); 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 [m^3/h]; p_1 , p_2 , p_3 , p_4 , p_5 , p_6 : puntos de medición de presión [kg/cm^2].

El sistema electrohidráulico tiene un comportamiento dominado por la carga que representa la densidad de la pulpa a 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 accionamiento eléctrico. Ver figuras 4 y 5.



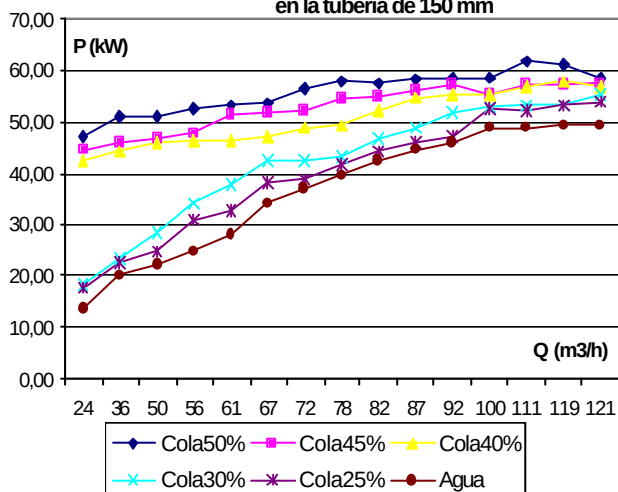
Subsistema hidráulico del accionamiento con la bomba centrífuga.



Accionamiento eléctrico de bombas centrífugas para el transporte de pulpa laterítica.

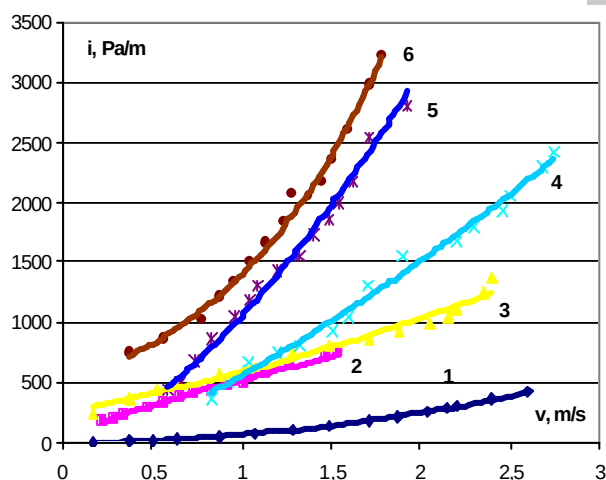
3

Potencias medidas a diferentes densidades en la tubería de 150 mm



Comportamiento del consumo de potencia eléctrica a diferentes densidades de la cola laterítica. Al mismo tiempo existe una relación entre las pérdidas hidráulicas y su velocidad de transporte.

4



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

5

Este 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.

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 turbomáquina 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 para 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 su diferentes manifestaciones en cada eslabón del sistema hasta llegar y desarrollarse en la bomba centrífuga, que es en definitiva el elemento que exige cuantitativamente el nivel.

En esto participan: P_e , la potencia de entrada del accionamiento eléctrico; w , la frecuencia angular del subsistema eléctrico que alimentan 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 y 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 esta será mayor o menor el gradiente de energía a desarrollar por la turbomáquina. Una buena parte de la energía desarrollada por la bomba centrífuga está destinada a transmitirle la energía cinética al fluido y esta 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 presencia de gases se propicia el fenómeno de la cavitación con densidades medias, entonces la bomba centrífuga trabaja con un gradiente de potencia relativamente más alto que lo estimado; además, para potencias cercanas la pulpa tiene densidades diferentes. Esto quiere decir que la variable densidad r es significativa para el análisis del comportamiento del accionamiento electromecánico.

Por otra parte, el momento de carga está relacionado con la potencia mecánica desarrollada por la bomba centrífuga, y esta a su vez viene dada por las variables que determinan finalmente el rendimiento del subsistema mecánico, por lo que el torque de carga está dado por la función de la expresión (5):

$$M_c = f(w, \Delta p, Q, r) = f(w, H, Q, r) \quad \dots(5)$$

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:

$$h_b = f(Q, H, w, r) \quad \dots(6)$$

Como el caudal desarrollado por la bomba es una función de su velocidad y por tanto de la frecuencia angular, y considerando que la relación entre el caudal de la bomba y su altura de carga es conocida, y determina, la expresión (7) que es conocida como la velocidad específica de la turbomáquina BC:

$$n_{esp} = \frac{n_b \cdot \sqrt{Q}}{H^{3/4}} \quad \dots(7)$$

donde:

n_b es el número de revoluciones de la bomba centrífuga, la cual ofrece una medida de su capacidad productiva para transportar el fluido. El número de

revoluciones de la bomba n_b viene determinado a su vez por la frecuencia angular w . Entonces el subsistema hidráulico puede ser representado, en forma simplificada, por una relación funcional dada por:

$$y = f(n_{esp}, r) \quad \dots(8)$$

El rendimiento del sistema de accionamiento 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 determina la velocidad periférica de transporte del fluido, la caída de presión entre entrada y salida de la bomba, y la densidad r de la hidromezcla.

$$h = f(P_e, Q_b, w, \Delta p, r) \quad \dots(9)$$

La relación (9), facilita el análisis de las propiedades principales presentada por el algoritmo de la modelación difusa del sistema MI - BC, cuando se usa un sistema real, teniéndose en cuenta que la influencia de la temperatura está implícita en el valor de la densidad específica de la hidromezcla.¹⁵

Pero atendiendo a la expresión simplificada dada en (8), el rendimiento del sistema MI - BC puede ser evaluado sintéticamente por tres variables: la potencia de entrada P_e del motor eléctrico, la velocidad específica n_{esp} desarrollada por la bomba centrífuga y la densidad del fluido r , que en este caso es la densidad de la pulpa, tal como (10):

$$h = f(P_e, n_{esp}, r) \quad \dots(10)$$

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 basado en el juego de los datos de entrenamiento.

El modelo difuso esta compuesto por funciones de pertenencias triangulares atribuidas a una señal de referencia y_{ref} , 11 funciones de pertenencias triangulares de la señal de la potencia de entrada; 11 funciones de pertenencias triangulares de la señal de

la velocidad específica de la bomba centrífuga; así como 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; lo mismo para el modelo difuso usando 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 6.

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 compone una regla con la siguiente forma, por ejemplo, para celda blanca,

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

Los pasos principales del proceso de aprendizaje se detallan en las referencias 4 y13.

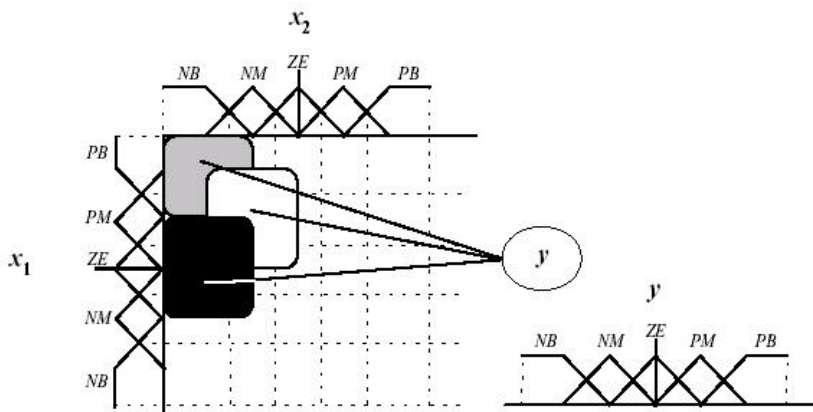
Se tienen algunos resultados que dirigen la observación del proceso de hidrotransporte hacia el

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.¹⁶⁻¹⁸

Es usual, durante el transporte de pulpa laterítica en condiciones de tecnología CARON que se realiza a diferentes temperaturas y a través de bombas centrífugas donde están presente elementos en estado sólido, líquido y también gaseosos. Estos últimos ocasionan cavidades indeseadas en las tuberías y disminuyen sensiblemente 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 es el de los residuos lixiviados de laterita o también denominado colas, de la empresa Comandante Ernesto Che Guevara de Moa, cuyo modelo reológico.¹⁹ 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 realizadas en el proceso de transporte, de cola desde la Planta de Lixiviación hacia un depósito o dique, y complementando dicho estudio a través de la modelación semiindustrial en la instalación experimental de hidrotransporte del ISMM de Moa.

La base de conocimientos construida para su modelación por lógica difusa, está 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, elaborados por observaciones muy detalladas y mediciones de operarios expertos.



Sistema particionado y genera funciones de pertenencias.

Modelos matemáticos

1. Motor de inducción trifásico: Las ecuaciones del motor eléctrico MI basadas en la Teoría del Capo Orientado donde tienen mayor incidencia las expresiones siguientes:

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

$$s L_s \frac{di_{ds}}{dt} = -R_s i_{ds} + \omega_e s L_s i_{qs} + U_{ds} \quad \dots (11)$$

$$s L_s \frac{di_{qs}}{dt} = -R_s i_{qs} - \omega_e s L_s i_{ds} - \omega_e \frac{L_m}{L_r} y_{dr} + U_{qs} \quad \dots (12)$$

$$y_{dr} = i_{ds} L_m \quad \dots (13)$$

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

$$M_{em} = 1.5p(y_{sd}i_{sq} - y_{sq}i_{sd}) \quad \dots (14)$$

donde:

p : Número par de polos del motor eléctrico.

U_{ds}, U_{qs} : Tensiones en el estator del motor en los ejes dd - qq , [V].

U_{dr}, U_{qr} : Tensiones en el rotor en los ejes dd - qq [V].

i_{ds}, i_{qs} : Corrientes en el estator en los ejes dd - qq [A].

i_{dr}, i_{qr} : Corrientes en el rotor en los ejes dd - qq [A].

y_{ds}, y_{qs} : Flujos magnéticos en el estator en los ejes dd - qq , [Wb];

y_{dr}, y_{qr} : Flujos magnéticos en el rotor en los ejes dd - qq , [Wb].

L_s, L_r : Inductancias en los devanados del estator y rotor, [mH]; L_m : Inductancia mutua del motor eléctrico, [mH];

σ : Llamado Coeficiente de Blondie.

También se puede escribir de todo esto:

$$M_{em} = 1.5(i_{sq}y_{dr} - i_{sd}y_{qr}) \quad \dots (15)$$

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:

$$M_{em} - M_c = sJ\Omega_r + B\Omega_r \quad \dots (16)$$

donde:

J : Valor de la inercia total del motor más la de la bomba BC, [kg.m/s²].

M_c : Momento o torque de carga desde el sistema hidráulico [N.m].

$$\Omega_r = \frac{M_{em} - M_c}{sJ + B} \quad \dots (17)$$

SUBSISTEMA HIDRÁULICO

Teóricamente el caudal desarrollado por la bomba en el circuito hidráulico es función de la velocidad angular de rotación Ω_r y está depende de la frecuencia angular ω .

$$Q_b = Q_b(\omega) \quad \dots (18)$$

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

$$Q_b = K_l \Delta p = K_l (p_{succ} - p_{imp}) \quad \dots (19)$$

donde:

K : 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:

$$\Delta V = \frac{V}{b} \Delta p \quad \dots (20)$$

donde

b : Modulo del medidor de gasto o caudal del fluido. La compresibilidad del fluido es expresada por:

$$Q_c = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta V}{\Delta t} = \frac{V dp}{b dt} \quad \dots (21)$$

La capacidad del caudal absorbida por la bomba centrífuga corresponde con el cambio del volumen de la bomba BC, el cual es expresado como:

$$Q_o = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta V}{\Delta t} = \frac{A dy}{b dt} = Av \quad \dots(22)$$

donde

A: Área de la sección de salida de la bomba [m²].

y: Desplazamiento del fluido [m].

v: Velocidad del fluido a la salida del rodete de trabajo de la bomba [m/s].

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

Las ecuaciones del subsistema mecánico son:

$$N_b = \frac{H.Q.r}{102.h_b} \quad \dots(23)$$

N_b: Potencia mecánica desarrollada por la bomba centrífuga [kW].

Q : Caudal o gasto desarrollado por la bomba [m³/h].

r : Densidad específica del fluido [kg/m³].

hb: Representa el rendimiento de la bomba [%].

g : Aceleración de la gravedad [m/s²].

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

$$M_c = f(w, \Delta p, Q, r) = f(w, H, Q, r) \quad \dots(24)$$

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:

$$h_b = f(Q, H, w, r) \quad \dots(25)$$

Considerando el fluido hidráulico como incompresible. Esta hipótesis es válida desde el volumen total del fluido usado en nuestra instalación, con valores de la presión adecuados, y el circuito hidráulico está hecho de líneas de tuberías medianamente largas. Como

el caudal desarrollado por la bomba es una función de su velocidad y por tanto de la frecuencia angular, y considerando 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 dada por:

$$y = f(Q, w, \Delta p, r) \quad \dots(26)$$

El rendimiento del sistema electrohidráulico 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 determina la velocidad periférica de transporte del fluido, la caída de presión entre entrada y salida de la bomba, y la densidad **ρ** de la hidromezcla.

$$h = f(P_e, Q_b, w, \Delta p, r) \quad \dots(27)$$

La relación (27), a simple inspección, puede facilitar el análisis de las propiedades principales presentadas por el algoritmo de la modelación difusa del sistema MI-BC, cuando se usa un sistema real, teniéndose en cuenta la influencia de la temperatura que está implícita en el valor de la densidad específica de la hidromezcla.¹⁵

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:

$$M_{em} = J \frac{dw_r}{dt} + M_c(w_r) + Bw_r \quad \dots(28)$$

donde:

M_{em}: Momento electromagnético del motor de inducción [N.m].

J : Momento de inercia de las partes rotatorias del motor [N.m/s²].

M_c : Momento de carga mecánica de la bomba centrífuga [N.m].

w_r : Velocidad angular de rotación del rotor [rad/s].

B : Coeficiente que tiene en cuenta la fricción en los rodamientos del motor.

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

$$M_{em} = J \frac{dw_r}{dt} + B_{w_r} + \left(\frac{r \cdot H \cdot v \cdot A}{102 h_b h_r w_r} \right) \quad \dots(29)$$

Queda entonces:

$$M_{em} - \frac{r \cdot H \cdot v \cdot A}{102 h_b h_r w_r} = J \frac{dw}{dt} + B_w \quad \dots(30)$$

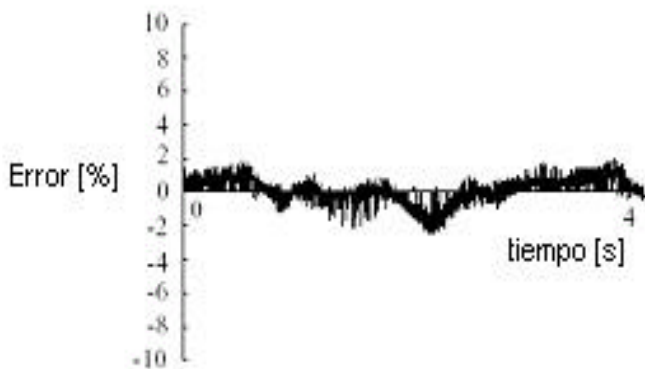
En esta expresión (30) se precisa la componente mecánica del torque resistivo que ejerce la bomba en el sistema de accionamiento eléctrico. Esto ayuda a elaborar un mecanismo de entrenamiento para el aprendizaje del comportamiento de las variables del sistema, obtenidas desde los parámetros dependientes corriendo a diferentes niveles de cargas del accionamiento.

RESULTADOS

El comportamiento del error de la señal adquirida por la modelación y la eficiencia del accionamiento de bomba centrífuga con diferentes cargas mecánicas.

En la figura 7 se observa que el error obtenido con la diferencia entre la medición desde el objeto físico y el estimado en la simulación durante el proceso de aprendizaje por la técnica difusa no supera un 2,5 %.

Para la bomba centrífuga tipo PB-315/40 el rendimiento enviando pulpa con densidades de 1200 a 3800 kg/m³ se comporta 53 y 59 % (figura 8), operando con su velocidad nominal de 1500 r/pm. Estos rendimientos se pueden mejorar cuando se transporta la pulpa laterítica a menores velocidades, entre 680 a 930 r/pm, debido a que las pérdidas hidráulicas son menores a menor velocidad periférica de transporte.

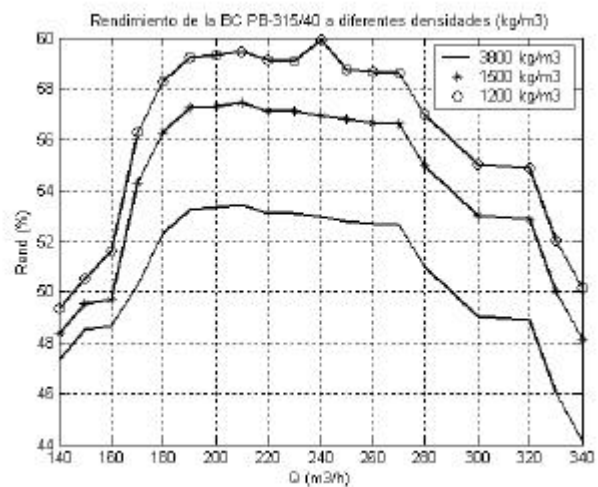


Error durante el proceso de aprendizaje.

7

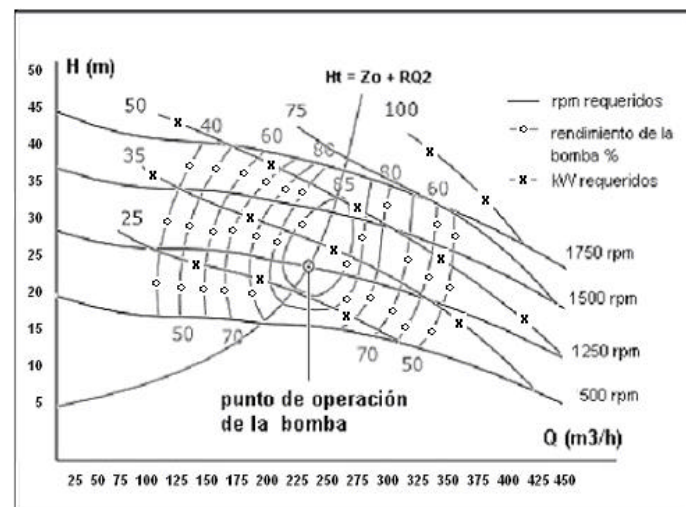
De la modelación se resume en la figura 9, un gráfico de rendimientos a diferentes número de revoluciones de esta bomba PB-315/40 y un comportamiento muy parecido en las bombas de marca WARMAN.

En la figura 10, se muestran las curvas de la red hidráulica con la de la bomba cuando se realiza la regulación del gasto o caudal del sistema por medio de la estrangulación de la válvula en la tubería de impulsión, donde se pierde un apreciable gradiente en la altura de carga de presión que hace disminuir sensiblemente la eficiencia de la bomba centrífuga.



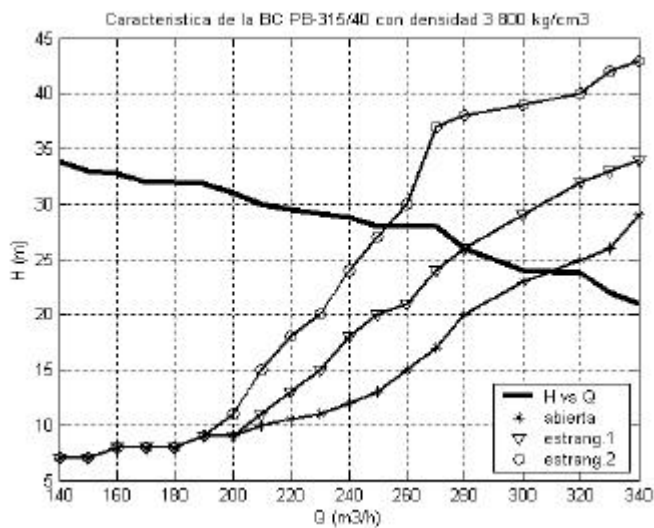
Rendimientos de la bomba PB-315/314 con diferentes densidades obtenidas desde la identificación del sistema electrohidráulico.

8



Curvas de las bombas centrífugas tipo WARMAN en el transporte de pulpa laterítica.

9



Curvas de la bomba PB-315/40 durante la regulación por estrangulamiento del caudal.

10

CONCLUSIONES

- El gasto energético del hidrotransporte de pulpa laterítica está relacionado no solo por el volumen de mineral sino que además intervienen las variables definidas por las propiedades físico-mecánicas del material transportado.
- Es apreciable la influencia de la densidad o porcentaje de sólido en peso de las hidromezclas en el comportamiento estructural y energético del hidrotransporte de pulpas residuales, y debe ser tenido en cuenta en los algoritmos de control del accionamiento.
- Es válida la base de conocimientos desarrollada para el diseño de esquemas de control de accionamientos del hidrotransporte de colas 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.
- La utilización de la modelación difusa en el objeto del sistema de accionamiento eléctrico de bomba centrífuga encargado del transporte de pulpa laterítica resulta una buena herramienta para modelar este proceso y permite la simulación adecuada del sistema.
- 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 hidrotransporte de laterita.
- El mecanismo de aprendizaje es una herramienta verificable para el algoritmo difuso implementado,

ya que el rango de error menor a 2,5 % está dentro de lo permisible.

REFERENCIAS

1. Rojas Purón, L. y M. Morera Hernández: **Control de eficiencia de accionamiento de bomba centrífuga usando lógica difusa. SIE-2003**. Universidad Central de Las Villas, Santa Clara, noviembre, 2003.
2. Sugeno, M. and K. Tanaka: "Successive Identification of a Fuzzy Model and its Applications to Prediction of a Complex System," *Fuzzy Set Syst.*, Vol. 42, pp. 315-334, 1991.
3. Sugeno, M. and T. Yasukawa: "A Fuzzy-Logic-Based Approach to Qualitative Modeling," *IEEE Trans. Fuzzy Systems*, Vol. 1, pp. 7-31, February, 1993.
4. Wang, L. X. and J. Mendel: "Generating Fuzzy Rules by Learning From Examples," *IEEE Trans. on Syst. Man and Cybernetics*, Vol. 22, No. 6, July, 1992.
5. Costa Branco, P. J. and J. A. Dente: "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, 1996.
6. ———: "The Application of Fuzzy Logic in Automatic Modeling Electromechanical Systems", *Fuzzy Sets and Systems*, Vol. 95, No. 3, pp. 273-293, 1998.
7. Pedry CS, W. A.: "Identification of Fuzzy Relational Systems", *Fuzzy Sets and Systems*, Vol. 13, pp. 153-167, 1984.
8. Takagi, T. and M. Sugeno: **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. 1998.
9. Costa Branco, P. J.: "Learning from Examples Using Fuzzy Logic in Modeling and Control of Electro-Hydraulic Actuator", Doctoral Thesis, Lisboa, July, 1998.
10. Higashi, M. and G. Klir: "Identification of Fuzzy Relational Systems". *IEEE Trans on Systems Man and Cybernetics*, Vol. SMC-14, No. 2, pp. 349-355, 1993.
11. Moblad, L. and J. Ostergaard: **Control of Cement Kiln by Fuzzy Logic**, pp. 398-400, Editions Approximate Reasoning in Decision Analysis, Amsterdam, Holland, 1982.
12. Low, T.; T. Lee and H. Lim: "A Methodology for Neural Network Training for Control of Drives with Nonlinearities," *IEEE Trans. on Industrial Electronics*, Vol. 40, No. 2, April, 1993.
13. Wang, L.: **Adaptive Fuzzy Systems and Control**, Prentice Hall, 1995.
14. Bezdek, J. C, and S. K. Pal: "Fuzzy Models for Pattern Recognition", *IEEE Press*, Piscataway, N.J., 1992.
15. Rojas Purón, L. y M. Morera Hernández: **Supervisor gráfico de accionamiento eléctrico asistido**

por **MATLAB**. Taller Nacional de NTIC aplicadas a la Ingeniería Eléctrica, CUJAE, Ciudad de La Habana, Junio, 2003.

16. Rojas Purón, L.; M. García Renté; R. Izquierdo y R. Pérez Barreto: **Matriz GEM: una llave de optimización de accionamientos de bombas para pulpa laterítica**. FIE 2002, Santiago de Cuba, Junio, 2002.

17. Turro, A.; G. Railian y B. Dakuskin: "Influencia del nivel de reserva en la capacidad de trabajo de los sistemas de bombeo", **Máquinas Mineras y Electromecánica**, No. 3, San Peterburgos, Rusia, 2002.

18. Turro, A.; L. Garcell y R. Izquierdo: "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, Universidad de Oriente, Santiago de Cuba, 2002.

19. Turro, A. y otros: "Estudio del hidrot transporte de las calas en el proceso carbonato amoniaco", Tesis doctoral, ISMM, Moa, diciembre, 2002.

AUTORES

Luis Delfín Rojas Purón

Ingeniero Electricista, Profesor Auxiliar, Departamento de Ingeniería Eléctrica, Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa, Moa, Cuba

e-mail:lrpuron@ismm.edu.cu

Mario Morera Hernández

Ingeniero Electricista, Doctor en Ciencias Técnicas, Profesor Titular, Centro de Investigaciones y Pruebas Electroenergéticas (CIPEL), Instituto Superior Politécnico José Antonio Echeverría, Cujae, Ciudad de La Habana, Cuba

e-mail:marmor@electronica.cujae.edu.cu

Ángel Oscar Columbié Navarro

Ingeniero Electricista, Doctor en Ciencias Técnicas, Profesor Titular, Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa, Moa, Cuba



CUJAE
1964-2004
40 años de fundada