

# Control de eficiencia en accionamientos eléctricos para el hidrotransporte usando inteligencia artificial

## *Efficiency control in electric drives for hydro-transport using artificial intelligence*

Luis Delfín Rojas Purón<sup>1,\*</sup>, Idania Aguilera Fernández<sup>1</sup>, Lisbet Reyes Aguila<sup>1</sup>, Luis Miguel Rojas Aguilera<sup>11</sup>

<sup>1</sup>Universidad Tecnológica de La Habana, “José Antonio Echeverría”, La Habana, Cuba

<sup>11</sup>Universidad Federal de la Amazonas, Manaus, Brasil

\*Autor de correspondencia: [lrpuron48@gmail.com](mailto:lrpuron48@gmail.com)

Recibido: 15 de junio de 2024

Aprobado: 21 de septiembre de 2024

Este documento posee una [licenciaCreativeCommonsReconocimiento-NoComercial4.0internacional](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/)



### RESUMEN/ABSTRACT

Este trabajo presentó un procedimiento para evaluar la eficiencia en accionamientos eléctricos con motor de inducción que acciona bombas centrífugas encargadas de transportar mezclas de pulpas lateríticas durante el proceso de obtención de níquel. Consistió en preparar un esquema de control de eficiencia del motor de inducción mediante un esquema de red neuronal tipo Feed Forward operando junto a un controlador fuzzy-PI, sintonizado de acuerdo a las especificidades del torque de carga que demanda la bomba centrífuga, al hidro-transportar fluidos mezclados con densidad variable. El esquema de control utilizó la medición indirecta de la variable densidad, aspecto que superó las limitaciones de medición del escenario industrial adverso. Se utilizó un modelo de control vectorial en el motor de inducción, cuyos comandos de control están ajustados para las velocidades más adecuadas del hidrotransporte de la pulpa laterítica, donde resultan las menores pérdidas.

**Palabras clave:** eficiencia; lógica fuzzy; red neuronal.

*This work presented a procedure to evaluate the efficiency of electric drives with an induction motor that drives centrifugal pumps responsible for transporting mixtures of lateritic pulps during the process of obtaining nickel. It consisted of preparing an efficiency control scheme for the induction motor using a Feed Forward type neural network scheme operating together with a fuzzy-PI controller, tuned according to the specificities of the load torque by the centrifugal pump, to the hydro-transport mixed fluids with variable density. The control scheme used the indirect measurement of the density variable, an aspect that overcame the measurement limitations of the adverse industrial scenario. A vector control model was used in the induction motor, whose control commands are adjusted for the most appropriate speeds for the hydro transport of the lateritic pulp, where the lowest losses result.*

**Key words:** efficiency ; fuzzy logic; neuronal network.

### INTRODUCCIÓN

En las plantas minero-metalúrgicas donde se transportan hidro-mezclas de pulpas lateríticas de una a otras secciones de la industria niquelífera, los accionamientos eléctricos de motores de inducción que accionan bombas centrífugas tipo WARMAN, durante el proceso de obtención de níquel en la empresa Cmdte Ernesto Che Guevara de Moa, presenta la característica de carga mecánica variable debido a los cambios de la densidad de las hidro-mezclas.

Cómo citar este artículo:

Luis Delfín Rojas Purón y otros. Control de eficiencia en accionamientos eléctricos para el hidrotransporte usando inteligencia artificial. Ingeniería Energética. 2024. 45 (3), septiembre/diciembre. ISSN 1815-5901.

Sitio de la revista: <https://rie.cujae.edu.cu/index.php/RIE/index>

El problema es la baja eficiencia energética en estos accionamientos eléctricos con frecuentes averías por sedimentación de las hidro-mezclas en los componentes hidráulicos del sistema [1, 2]. Por esta razón, se ha desarrollado una aplicación de lógica fuzzy y redes neuronales para el control de pérdidas en la máquina eléctrica y adecuar la operación de la bomba centrífuga de modo que ocurran las menores pérdidas hidráulicas en el sistema, evitando la sedimentación frecuente en las tuberías y válvulas que provocan indeseables caídas de presión y efectos de resonancia mecánica en los componentes y accesorios. Con el uso de las nuevas tecnologías, fue posible utilizar un sensor inferencial de densidad [3], dispositivo que no invade el medio de medición porque los datos para medición de densidad son capturados por imágenes en un escenario supervisado.

Se realizó un ajuste de los bloques de control de velocidad en el motor de inducción, incorporando redes neuronales, donde fue necesario la identificación de las señales, y rediseño de los bloques de control para supervisar eficiencia del motor de inducción en los principales estados de cargas mecánica del accionamiento de bombas centrífugas. Actualmente, los variadores de velocidad controlados por control vectorial, cuentan en sus bloques electrónicos los componentes configurables de las técnicas de lógica fuzzy y redes neuronales, de tal forma los resultados de simulación son de mucha importancia para contribuir a validar la configuración de estos bloques, en particular con PLC Schneider y Telemecanique.

El motor de inducción es identificado por las ecuaciones de la Teoría de Campo Orientado [1, 2], donde tiene interés las componentes de corrientes, tensiones y flujos magnéticos en sus ejes  $dq$ , mostradas en el próxima sesión. El modulador de los bloques de IGBT del variador de velocidad del accionamiento eléctrico, es controlado por los comandos  $u_d$  y  $u_q$ , desde la red neuronal, ver en la figura 2. La red neuronal entrega las señales ( $u_d$  y  $u_q$ ) al bloque conversor y este al modulador que maneja al inversor sinusoidal de frecuencia, que constituyen los variadores de velocidad industriales [4-6]. El procedimiento ofrece el ajuste del bloque neuronal operando sin invadir el proceso durante la medición durante el hidro-transporte de las mezclas de pulpas lateríticas, supervisando en tiempo real la eficiencia del accionamiento eléctrico, como se muestra en figura 1, [7].

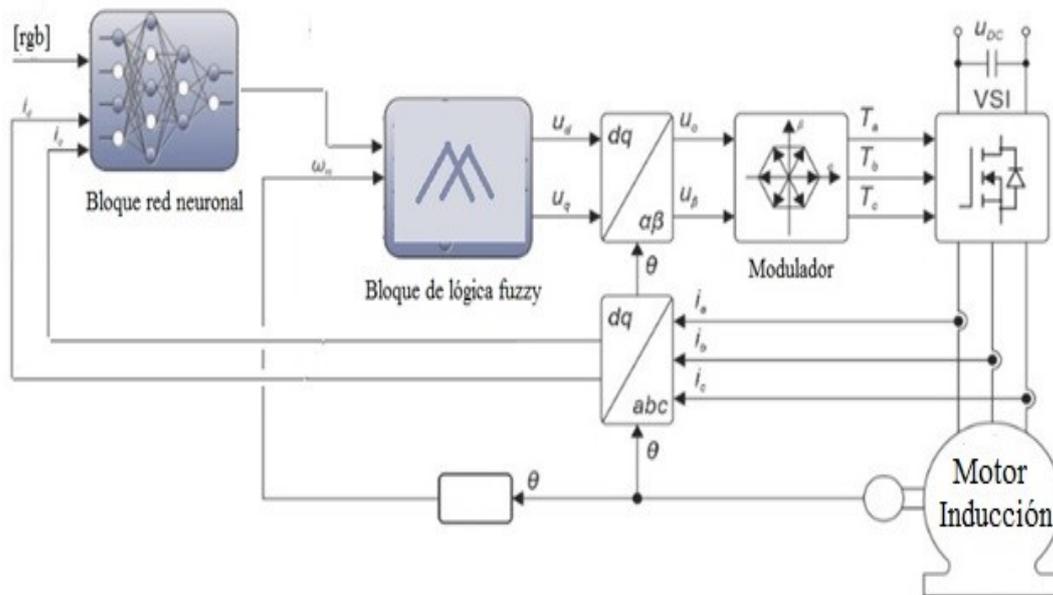


Fig. 1. Diagrama del accionamiento eléctrico para control de eficiencia por lógica fuzzy y red neuronal

El accionamiento eléctrico tiene el control de las pérdidas desde los comandos  $u_d$  y  $u_q$  que elabora el bloque de lógica fuzzy [8, 9], desde la señal de referencia elaborada por el bloque de red neuronal, de acuerdo a los estados de cargas mecánicas de la bomba centrífuga, determinada por los componentes de las corrientes  $i_d$  e  $i_q$  y la densidad de la hidro-mezclas identificada por la matriz de colores [rgb]. La red neuronal garantiza identificar de acuerdo a la densidad de la pulpa y la carga del motor [10, 11], la velocidad lineal de transporte más económica de las hidro-mezclas por la tubo-máquina de tal forma que tengan lugar las menores pérdidas hidráulicas y evitar la rápida sedimentación de la pulpa en las tuberías [7]. El estado de cargas mecánicas del motor de inducción depende del por ciento de sólidos contenidos en las hidro-mezclas a transportar por la bomba centrífuga; el torque de la máquina eléctrica se comportó de acuerdo a la variabilidad de la densidad de la pulpa transportada a diferentes temperaturas del proceso. Los datos se ofrecen en tabla 1.

**Tabla 1.** Estados de cargas mecánicas del accionamiento eléctrico

Hidro-mezclas		Densidades a diferentes temperaturas (kg/m <sup>3</sup> )		
% Mn	% sólidos	28 °C	60 °C	90 °C
20	25	1230	1190	1046
40	30	1300	1235	1105
60	40	1500	1425	1275
80	45	1650	1568	1400
100	50	1750	1663	1488

Para el caso de estudio, el transporte de hidro-mezclas de pulpas lateríticas caracterizada con valores en tabla 1, con experimento en tuberías de diámetro de 155 hasta de 210 mm. Las pérdidas hidráulicas totales  $i$  [Pa/m], también llamada pendiente hidráulica en función de la velocidad lineal del fluido determinada por  $i = f(v)$ , tienen una relación muy directa con el porcentaje % de sólidos transportado y determina el consumo de potencia mecánica del motor eléctrico. Aspecto que se muestra tabla 2.

**Tabla 2.** Pérdidas hidráulicas en tuberías de 125 mm a 50 % de sólidos

Caudal	Velocidad	Pérdidas hidráulicas
(m <sup>3</sup> /h)	(m/s)	(P <sub>a</sub> /m)
13,99	0,22	8,19
17,80	0,28	12,01
22,25	0,35	17,94
30,52	0,48	391,43
36,24	0,57	28,96
41,97	0,66	38,24
47,05	0,74	48,47
52,78	0,83	58,33
63,59	0,92	70,23
72,49	1	82,96
93,47	1,14	97,36
97,92	1,47	124,45
139,89	1,54	177,09
152,60	2,2	190,94

El experimento se realizó observando las velocidades límites donde se evita la sedimentación de las pulpas en las tuberías, es decir inferior a 2,8 m/s en este caso de estudio. La identificación de la matriz [r g b], de las imágenes de las hidro-mezclas para cada de densidad, se muestra en la tabla 3.

**Tabla 3.** Identificación de imágenes de las hidro-mezclas de pulpas lateríticas

Densidad (kg/m <sup>3</sup> )	Color			Temperatura °C
	R	G	B	
1046	117	35	11	90
1105	107	48	20	90
1190	104	50	23	90
1230	99	51	29	90
1235	97	52	31	90
1275	94	54	34	60
1300	90	55	37	60
1400	88	55	39	60
1425	84	57	44	60
1488	82	58	46	60
1500	78	52	50	28
1568	75	53	52	28
1650	73	54	54	28
1663	71	58	58	28
1750	69	58	58	28

La experimentación fue realizada en condiciones supervisadas, validadas en escenario industrial a presión y temperaturas validadas.

## MATERIALES Y MÉTODOS

### Modelo del accionamiento eléctrico con motor de inducción

El accionamiento con motor de inducción responde a la Teoría del Campo Orientado, que acciona una bomba centrífuga, y es bien conocido por sus componentes en los ejes dd-qq, donde se plantean las ecuaciones de las corrientes, tensiones, flujos magnéticos y torque electromagnético dados por (Bose, 2020), [1]. Para una orientación correcta del modelo, se va tomar como referencia el flujo magnético concatenado en el eje transversal del rotor igual a cero  $\psi_{qr} = 0$ . (Kaminski, 2020), [5]. Las corrientes y tensiones en los ejes dd y qq, en el motor están definidas por las ecuaciones (1-3), [1].

$$\sigma L_s \frac{di_{ds}}{dt} = -R_s i_{ds} + \omega_e \sigma L_s i_{qs} + U_{ds} \quad (1)$$

$$\sigma L_s \frac{di_{qs}}{dt} = -R_s i_{qs} - \omega_e \sigma L_s i_{ds} - \omega_e \frac{L_m}{L_r} \psi_{dr} + U_{qs} \quad (2)$$

$$\psi_{dr} = i_{ds} L_m \quad (3)$$

El torque o momento electromagnético  $M_{em}$  es tomado por la ecuación (4):

$$M_{em} = 1,5p(\psi_{sd}i_{sq} - \psi_{sq}i_{sd}) \quad (4)$$

donde:

$p$  – número par de polos del motor eléctrico.

$\omega_e$  – frecuencia angular del campo del estator del motor, (rad/s).

$U_{ds}, U_{qs}$  – 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).

$\psi_{ds}, \psi_{qs}$  – flujos magnéticos en estator en los ejes dd-qq, (Wb).

$\psi_{dr}, \psi_{qr}$  – flujos magnéticos en el rotor en los ejes dd-qq, (Wb).

$L_s, L_r$  – inductancias del estator y rotor, (mH).

$L_M$  – inductancia mutua del motor eléctrico, (mH).

$\sigma$  - coeficiente Blonde.

La eficiencia se determina por la ecuación (5).

$$\eta_{MI} = \frac{P_s}{P_e} = \frac{P_s}{P_s + \Delta p} = \frac{P_e - \Delta p}{P_e} \quad (5)$$

donde:

$P_s$  – potencia de salida del motor eléctrico, (kW).

$P_e$  – potencia de entrada del motor eléctrico, (kW).

$\Delta p$  – pérdidas totales en el motor eléctrico, (kW).

Las pérdidas totales  $\Delta p$  del motor eléctrico determinadas por la ecuación (6):

$$\Delta p = \Delta p_{cus} + \Delta p_{cur} + \Delta p_{ac} + \Delta p_{mec} + \Delta p_{ad} \quad (6)$$

$\Delta p_{cus}$  - pérdidas del cobre del estator del motor, (kW).

$\Delta p_{cur}$  - pérdidas del cobre del rotor del motor, (kW).

$\Delta p_{ac}$  - pérdidas del acero del motor, (kW).

$\Delta p_{mec}$  - pérdidas mecánicas del motor, (kW).  
 $\Delta p_{ad}$  - pérdidas adicionales en el motor, (kW).

La carga mecánica  $M_c$  de la bomba centrífuga, está relacionada con la potencia de salida  $P_s$  por ecuación (7):

$$P_s = M_c \cdot \omega_r \quad (7)$$

Las también llamadas pérdidas del hierro o acero  $\Delta p_{ac}$  pueden ser calculadas por ecuación (8):

$$\Delta p_{ac} = 3 \cdot \frac{E_1^2}{R_{mag}} \quad (8)$$

donde:

$E_1$  - fuerza electromotriz de respuesta a tensión aplicada, (V).  
 $R_{mag}$  - resistencia magnética en el motor, (ohm).

La corriente del estator es:

$$I_s = \sqrt{(I_{ds})^2 + (I_{qs})^2} \quad (9)$$

los vectores  $I_{ds}^*$  y  $I_{qs}^*$  como señales permiten ir modificando el control en la máquina.

La potencia eléctrica es tomada por ecuación (10):

$$P_e = I_{ds} \cdot U_{ds} + I_{qs} \cdot U_{qs} \quad (10)$$

Es posible realizar las mediciones de potencia desde el enlace dc en el variador de velocidad, aspecto que permite supervisar el control de velocidad ajustada a cambios de la carga mecánica.

La eficiencia puede ser evaluada también a partir de la ecuación (11):

$$\eta_{MI} = \frac{M_c \cdot \omega_r}{P_e} \quad (11)$$

donde,

$M_c$  - momento de carga del motor, (N.m)  
 $\omega_r$  - velocidad angular de rotación del rotor, (rad/s)  
 $P_e$  - potencia eléctrica de entrada (kW).

### **Caso de estudio: Accionamiento eléctrico para motor con bombeo de hidro-mezclas lateríticas**

El estudio consistió utilizando mediciones durante el transporte de hidro-mezclas de pulpas lateríticas con bombas centrífugas Warman, 43,5 kW, Caudal 230 m<sup>3</sup>/h, 1250 rpm; motor de inducción trifásico 55 kW, 440 V, 83,10 A, 1250 rpm, en condiciones de tecnología CARON para obtención de níquel, con la experimentación en tuberías de diámetro de 155 hasta de 210 mm. La medición de la densidad a través de un sensor de densidad tipo inferencial, validado en laboratorio de la empresa, permitió obtener vectores para cada carga de flujo de mineral transportado, previa identificación de las imágenes, superando así las limitaciones del sistema de mediciones en incómodas condiciones industriales, como son altas temperaturas y agresividad de las pulpas lateríticas. Para esto se crearon condiciones de supervisión muy favorables utilizando recursos de nuevas tecnologías.

Todas las mediciones fueron realizadas en un medio supervisado, con instrumentos y protocolos acreditados por la industria, cuyo número de muestras poseen adecuado orden y suficiente representatividad [7]. El uso de este tipo de sensores inferenciales neuronales permite procesar la información obtenida desde imágenes, y elaboran las acciones de control del sistema, aspecto visto en el trabajo publicado por Rojas et al. (2017), [2]. Es favorable implementar estos tipos de esquemas de control que ofrecen simplicidad y memoria convertida en inteligencia con la adecuada precisión una vez validados.

### Control de eficiencia del accionamiento eléctrico

El control de eficiencia se basa en el trabajo conjunto de un bloque neuronal con red tipo Feed Forward, ver figura 1, encargada de identificar el estado de carga mecánica del accionamiento mediante la identificación de la densidad (matriz [rgb] de colores) y la corriente de carga ( $i_d$ ,  $i_q$ ) correspondiente, para entregar una señal de referencia al bloque del controlador fuzzy-PI que a su vez coloca el comando  $U_d, U_q$  al modulador de PWM del Inversor Sinusoidal de Voltaje gobernado por el bloque fuzzy-PI, cuya estructura está en la figura 2, que opera por cambio de Error, de tal forma que para cada valor de densidad de la pulpa transportada, el bloque neuronal sintoniza el esquema de control a la velocidad de menor pérdidas hidráulicas en la bomba centrífuga [8].

Es decir, el esquema sintoniza el controlador fuzzy-PI para las velocidades más económicas del transporte de la pulpa de acuerdo a su densidad y la demanda de potencia mecánica de la bomba. El diagrama del controlador fuzzy-PI, como se muestra en la figura 2, cuyo sistema de inferencia fuzzy (FIS en inglés) para un control PID y otro para un control por imágenes usando los bloques neuronales.

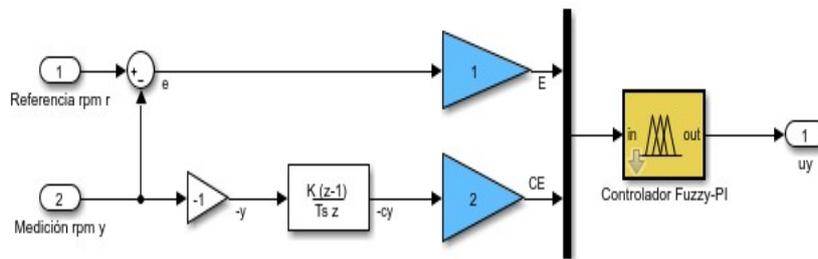


Fig. 2. Estructura base del controlador difuso-PI

El sistema de inferencia fuzzy (FIS) toma datos de entradas y salidas desde el sistema de medición en el accionamiento, como un típico controlador de dos entradas (error y cambio de error) y una señal de salida  $u_y$ . Para aplicaciones de control, es típico tener como entradas el valor absoluto del error ( $|e(k)|$ ) y del cambio del error ( $|e(k)-e(k-1)|$ ), que serían Error  $|E|$  y Cambio Error  $|CE|$  respectivamente en la curva de superficie. Las salidas difusas es la acción de control  $|u|$  inferidas desde las reglas difusas [8, 9].

Un Sistema de Inferencia Fuzzy FIS tipo Sugeno opera un control lineal desde las señales de entradas: Error  $|E|$  y cambio de Error  $|CE|$  a la salida  $|u|$ . El procedimiento de ajuste es explicado siguiendo la publicación (Rojas Purón, *et al.*, 2018). Las señales de entradas con funciones de pertenencias tipo triángulo con valores vecinos, cuya señal de salida es ajustada como una constante. El algoritmo sigue una relación dada en la curva de superficie de figura 3.

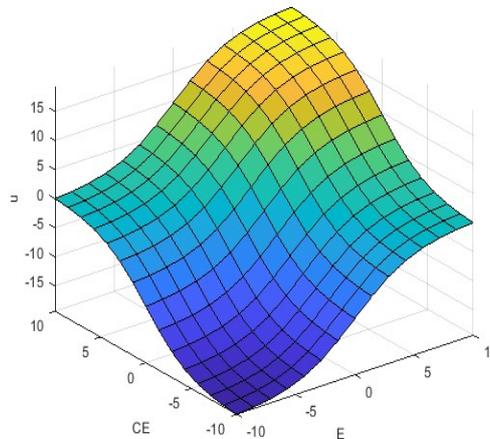


Fig. 3. Curva de superficie para controlador fuzzy-PI

Como se aprecia en la figura 4, la curva de superficie del controlador fuzzy-PI tiene una simetría y coherencia práctica que garantizan linealidad en las acciones de control.

### Estructura de la red neuronal tipo Feed Forward

El bloque neuronal opera con dos señales de entrada, la densidad identificada por la matriz [rgb] y la medición de corriente de carga en sus componentes ( $i_d$   $i_q$ ) previamente clasificada en el experimento desde el 20 hasta el 100 % del torque nominal de la máquina eléctrica, ver tabla 1. La señal de salida sirve de referencia al control del bloque del controlador fuzzy-PI.

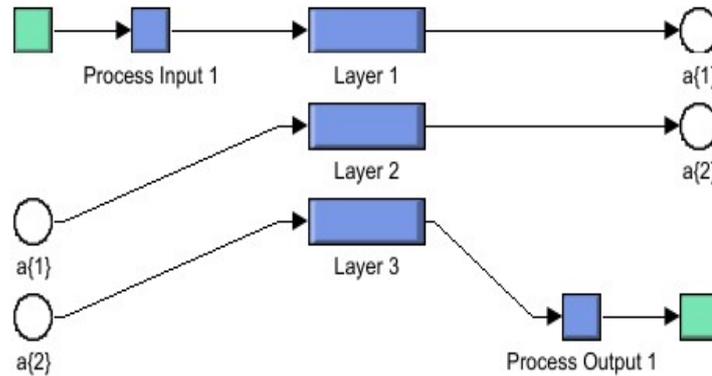


Fig. 4. Estructura de red Feed Forward, tres entradas y una salida

Los resultados de esta experimentación son mostrados en el epígrafe correspondiente y corrobora la identificación del método. La señal de control  $U_d$ , en su lugar también llamada  $U_y$  es entregada al modulador del Inversor Sinusoidal de Voltaje con frecuencias variables. Por ejemplo, la forma de esta señal generada se muestra en la figura 5, cuya red neuronal la identifica con buena aproximación.

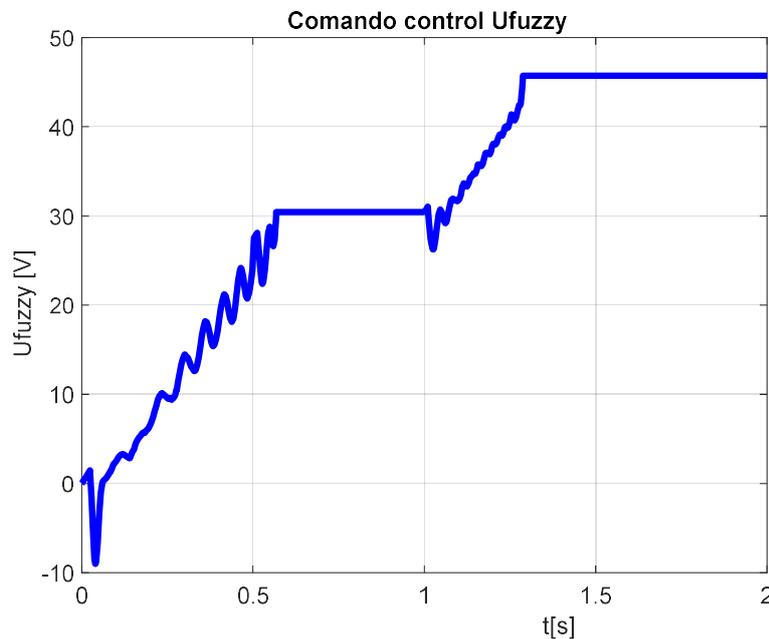


Fig. 5. Señal de control bloque fuzzy para un estado de carga a 25 % Momento nominal

El bloque neuronal puede identificar dicha señal de control para este estado de carga mecánica y permite sintonizar el controlador fuzzy-PI al estado de carga mecánica del accionamiento eléctrico con un 25 % de su torque nominal. A continuación los principales resultados de la simulación basados en los datos de las mediciones obtenidas durante la experimentación con PLC Schneider clásicos en variadores de velocidad industriales utilizados en la industria cubana del níquel.

## RESULTADOS y DISCUSIÓN

Con el objetivo de demostrar la calidad del control combinado utilizando bloques neuronales para la identificación del estado de carga mecánico del accionamiento con la medición inferencial de densidad de la hidro-mezclas transportada y el esquema de un controlador tipo fuzzy-PI para colocar el control de eficiencia es favorable en el motor de inducción, mostrándose un comportamiento estable del flujo magnético en el motor de inducción [10, 11]. Se corrobora una relación del torque de carga mecánico que exige la bomba centrífuga con el porcentaje de sólidos suspendidos en la hidro-mezclas a transportar, mediante la identificación de la densidad de la hidro-mezclas desde el bloque neuronal en la experimentación a diferentes concentraciones de pulpas lateríticas, aspecto que se muestra en la figura 6.

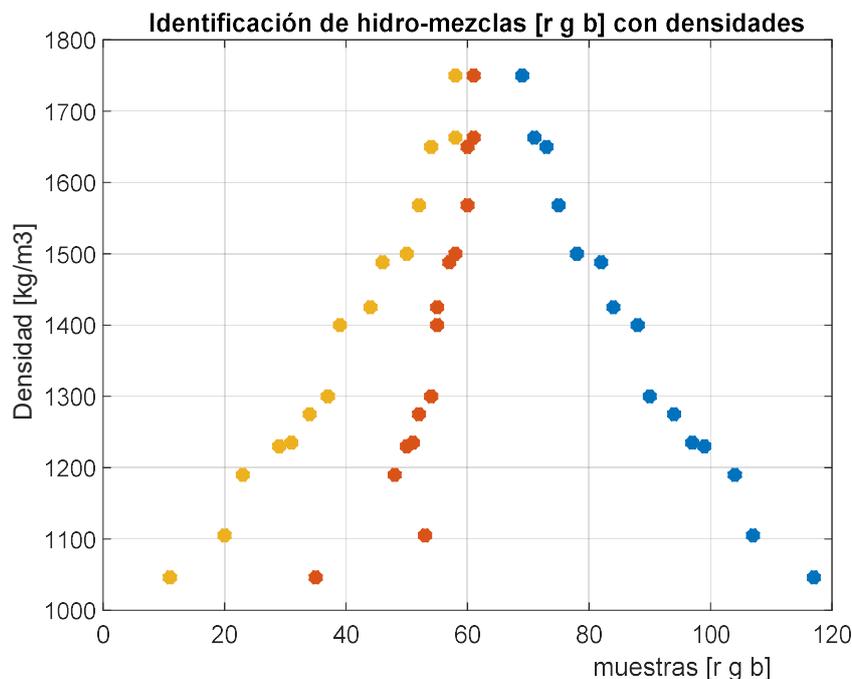


Fig. 6. Identificación de hidro-mezclas para todas las concentraciones de sólidos

La red neuronal CNN Feed Forward identifica la señal de densidad por colores de las hidro-mezclas [12, 13] y la correlaciona con la corriente de carga que demanda del motor eléctrico [14-16]. Las pérdidas en la máquina eléctrica se van reduciendo a medida que el bloque neuronal sintoniza el accionamiento eléctrico con la velocidad donde ocurren las menores pérdidas del acero de la máquina, aspecto que se relaciona con las pérdidas hidráulicas menores en el sistema hidráulico, aspecto que permite predecir la sedimentación de las tuberías, válvulas y demás accesorios que dificultan y causan indeseables averías en la instalación de hidro-transporte.

Es de interés para los fabricantes, este tipo de trabajo para obtener las especificidades de control en el hidro-transporte, porque ayuda a mejorar el diseño y modificación de los componentes. Un aspecto adicional importante es que el ajuste del controlador neuronal, garantiza el control de la velocidad entre los rangos de 0.75 – 1.8 m/s, para evitar las posibles incrustaciones debido a la sedimentación de la pulpa lateríticas transportada. Los aspectos mecánicos de las bombas centrífugas, debido a sedimentaciones en las tuberías y de la cavitación, es sensible su mejoramiento a la par de la eficiencia, porque el esquema de control se sintoniza para velocidades alejadas de la ocurrencia de estos fenómenos [13]. La novedad consiste en controlar la eficiencia del accionamiento eléctrico con motor de inducción, utilizando la medición indirecta de variables del motor-bomba centrífuga, a partir de identificación de la densidad de la mezcla hidro-transportada, usando la identificación de la matriz [r g b] de colores sin invadir el escenario del proceso durante la medición [14-16].

Utilizando las ecuaciones del modelo del accionamiento eléctrico, fue posible obtener en estado estacionario la eficiencia del sistema, cuyo comportamiento se muestra en la figura 7, [17, 18]. Previamente, mediante el ajuste de los bloques de control para supervisar eficiencia del motor de inducción fue posible, incorporando red neuronal tipo neuronal CNN Feed Forward con la identificación de la densidad por colores y corriente de cargas al transportar las hidro-mezclas [19, 20]. El comportamiento de la eficiencia del motor de inducción mediante el control conjunto del bloque neuronal y el fuzzy-PI, se obtuvo durante la experimentación con diferentes concentraciones de las mezclas de pulpas lateríticas.

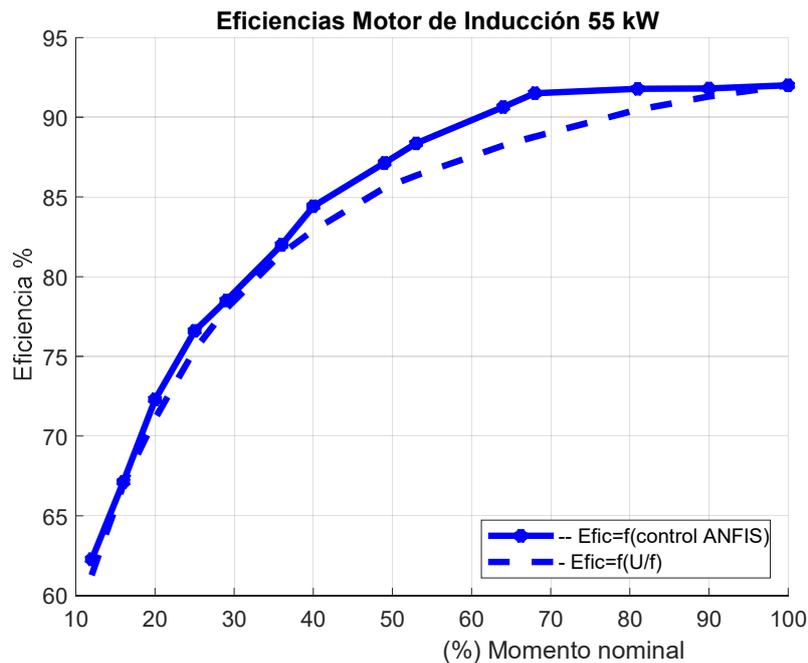


Fig. 7. Eficiencia del accionamiento eléctrico usando control fuzzy y neuronal

El gráfico muestra un mejoramiento sensible de la eficiencia del accionamiento eléctrico con la introducción de la red neuronal en el control de las pérdidas de todo el sistema, aspecto visible a partir del 40 % del torque de carga en comparación al control clásico PI.

## CONCLUSIONES

- Con el uso combinado de bloques neuronales y de lógica fuzzy es posible mejorar la eficiencia energética de los motores de inducción en el transporte de hidro-mezcla lateríticas reduciendo al mismo tiempo los costos operativos.
- La incorporación de sistemas de medición no invasivos en el hidro-transporte posibilita evolucionar hacia la introducción de la tecnología de Industria 4.0 en la minería cubana.

## REFERENCIAS

- [1]. Bose, B.K. "Power Electronics and Motor Drives: Advances and Trends". Academic Press: Cambridge, MA, SA. 2020. ISBN-10 0120-8840-5-4. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/book/9780128213605/power-electronics-and-motor-drives>
- [2]. Rojas, L., *et al.* "Procedure neuro-fuzzy with application in inferential sensor". IEEE, CHILECON2017 - Pucón, Chile, 18 al 20 de October, 2017. ISBN 978-1-5386-3124-9. Disponible en: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8229676>
- [3]. Rojas, L. *et al.* "Neural networks based estimator for efficiency in VSI to PWM of induction motors drives". 2016 IEEE International Conference on Automatica (ICA-ACCA). Curico, Chile. 19-21 October 2016. ISBN 978-1-5090-1147-6. Disponible en: <https://ieeexplore.ieee.org/document/7778445>
- [4]. Derhami, S., Smith A. "An integer programming approach for fuzzy rule based classification systems". European Journal of Operational Research. Feb. 2017, vol. 256, n. 3, p. 924-934. ISSN 1872-6860. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0377221716305240?via%3Dihub>
- [5]. Kaminski, M. "Nature-Inspired Algorithm Implemented for Stable Radial Basis Function Neural Controller of Electric Drive with Induction Motor". Energies. Dic. 2020, vol. 13, n. 24, e6541. ISSN 1996-1073. Disponible en: <https://www.mdpi.com/1996-1073/13/24/6541>
- [6]. Kaminski, M., Szabat, K. "Adaptive Control Structure with Neural Data Processing Applied for Electrical Drive with Elastic Shaft". Energies. 2021, vol. 14, n. 12, e3389. ISSN 1996-1073. Disponible en: <https://www.mdpi.com/1996-1073/14/12/3389>
- [7]. Rojas Purón L. D., *et al.* "Controlador Fuzzy-PI basado en imágenes del proceso para control de eficiencia en accionamientos eléctricos". Simposio Internacional de Ingeniería Eléctrica SIE-2023. Santa Clara. 13-17 nov-23, 2023. Disponible en: <https://convencion.uclv.cu/es/event/xx-simposio-internacional-de-ingenieria-electrica-sie-2023-182/agenda>

- [8]. Xu, J., Hang, C., Liu, C. "Parallel structure and tuning of a fuzzy PID controller". *Automática*. May. 2000, vol. 36, n. 5, p. 673-684. ISSN 1873-2836. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0005109899001922>
- [9]. Wang, W. "New similarity measures on fuzzy sets and fuzzy elements". *Fuzzy Sets and Systems*. 1997, vol. 85, n. 3, p. 305-309. ISSN 1872-6801. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/0165011495003657?via%3Dihub>
- [10]. Kaminski, M., Szabat, K. "Neural Network Applications in Electrical Drives—Trends in Control, Estimation, Diagnostics, and Construction". *Energies*. 2023, vol. 16, n. 11, e4441. ISSN 1996-1073. Disponible en: <https://www.mdpi.com/1996-1073/16/11/4441>
- [11]. Taheri, A.; *et al.* "A new design of liquid-cooled heat sink by altering the heat sink heat pipe application: Experimental approach and prediction via artificial neural network". *Energy Convers. Manag.* 2020, vol. 206, e112485. ISSN 1879-2227. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0196890420300212>
- [12]. Dybkowski, M.; Klimkowski, K. "Artificial neural network application for current sensors fault detection in the vector controlled induction motor drive". *Sensors*. 2019, vol. 19, n. 3, e571. ISSN 1424-8220. Disponible en: <https://www.mdpi.com/1424-8220/19/3/571>
- [13]. Guillod, T.; *et al.* "Artificial neural network (ANN) based fast and accurate inductor modeling and design". *IEEE Open J. Power Electron.* 2020, vol. 1, p. 284–299. ISSN 2644-1314. Disponible en: <https://ieeexplore.ieee.org/document/9152082>
- [14]. Chen, H.; Ye, S. "Modeling and optimization of EMI filter by using artificial neural network". *IEEE Trans. Electromagn. Compat.* 2019, vol. 61, n. 6, p. 1979–1987. ISSN 1558-187X. Disponible en: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8891888>
- [15]. Kim, T.H.; *et al.* "Application of Convolutional Neural Network to Predict Anisotropic Effective Thermal Conductivity of Semiconductor Package". *IEEE Access*. 2022, vol. 10, p. 51995–52007. ISSN 2169-3536. Disponible en: <https://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?arnumber=9774413>
- [16]. Malarczyk, M.; Tapamo, J.R.; Kaminski, M. Application of Neural Data Processing in Autonomous Model Platform—A Complex Review of Solutions, Design and Implementation. *Energies* 2022, 15, 4766.
- [17]. Neumayr, D.; Bortis, D.; Kolar, J.W. "The essence of the little box challenge-part A: Key design challenges & solutions". *CPSS Trans. Power Electron. Appl.* 2020, vol. 5, n. 2, p. 158–179. ISSN 2475-742X. Disponible en: <https://ieeexplore.ieee.org/document/9135030>
- [18]. Tarczewski, T.; *et al.* "PMSM servo-drive fed by SiC MOSFETs based VSI". *Power Electron. Drives*. 2018, vol. 3, n. 1, p. 35-45. ISSN 2543-4292. Disponible en: <https://sciendo.com/article/10.2478/pead-2018-0001>
- [19]. Bednarz, S.A.; Dybkowski, M. "Estimation of the Induction Motor Stator and Rotor Resistance Using Active and Reactive Power Based Model Reference Adaptive System Estimator". *Appl. Sci.* 2019, vol. 9, n. 23, e5145. ISSN 2076-3417. Disponible en: <https://www.mdpi.com/2076-3417/9/23/5145>
- [20]. Deng, W.; *et al.* "Neural Network-Based Adaptive Asymptotic Prescribed Performance Tracking Control of Hydraulic Manipulators". *IEEE Trans. Syst. Man Cybern. Syst.* 2023, vol. 53, n. 1, p. 285–295. ISSN 2168-2232. Disponible en: <https://ieeexplore.ieee.org/document/9789095>

## CONFLICTO DE INTERESES

Los autores declaran que no existe conflicto de intereses.

## CONTRIBUCIÓN DE LOS AUTORES

**Luis Delfin Rojas Purón:** <http://orcid.org/0009-0001-3410-1489>

Diseño de la investigación, recolección de datos. Análisis de los resultados, redacción del artículo y la revisión crítica de su contenido y en la aprobación final.

**Idania Aguilera Fernández:** <https://orcid.org/0009-0005-9674-9706>

Recolección de datos. Participó en el análisis de resultados, redacción del artículo y revisión crítica de su contenido y en la aprobación final.

**Lisbet Reyes Aguila:** <https://orcid.org/0009-0005-7845-9369>

Recolección de datos. Participó en el análisis de resultados, y revisión crítica de su contenido y en la aprobación final.

**Luis Miguel Rojas Aguilera:** <http://orcid.org/0000-0002-7408-4038>

Recolección de datos. Participó en el análisis de resultados, y revisión crítica de su contenido y en la aprobación final.