

REPÚBLICA DE CUBA
MINISTERIO DE EDUCACIÓN SUPERIOR
INSTITUTO SUPERIOR MINERO METALÚRGICO
DOCTOR ANTONIO NÚÑEZ JIMÉNEZ

INSTITUTO SUPERIOR POLITÉCNICO
JÓSE ANTONIO ECHEVERRÍA
CIPEL

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA ELÉCTRICA

TESIS EN OPCIÓN AL GRADO CIENTÍFICO DE DOCTOR EN CIENCIAS TÉCNICAS

**TÍTULO: ACCIONAMIENTO ELÉCTRICO ASINCRÓNICO
PARA TRANSPORTE EFICIENTE DE PULPA
LATERÍTICA**

AUTOR: Ing Luis Delfín Rojas Purón

TUTORES: Dr MARIO MORERA HERNÁNDEZ
Instituto Superior Politécnico José Antonio Echeverría
Facultad de Ingeniería Eléctrica
Departamento de Ingeniería Eléctrica

Dr JOSÉ RAFAEL PÉREZ BARRETO
Instituto Superior Minero Metalúrgico
Doctor Antonio Núñez Jiménez
Departamento de Ingeniería Eléctrica

**Año de la Alternativa Bolivariana para las Américas
Ciudad de la Habana, 2005**

INDICE

Introducción	5
Capítulo I: Fundamentación teórico-metodológico de la investigación	10
1.1 Introducción	10
1.2 Caracterización del sistema de accionamientos de bombas centrífugas para transporte de pulpa laterítica	10
1.3 Trabajos precedentes	11
1.4 Metodología de la investigación	13
1.5 Marco teórico de la investigación	14
1.6 Planteamiento de la tarea para la evaluación y control de eficiencia del bombeo de pulpa laterítica	18
1.7 Estado actual del control y evaluación de eficiencia	18
1.8 Conclusiones parciales	18
Capítulo II: Técnica de análisis para el sistema motor de inducción Bomba Centrífuga	19
2.1 Introducción	19
2.2 Caracterización matemática	19
2.3 Procedimiento de modelación difusa	20
2.3.1 Procedimiento de aprendizaje difuso	21
2.4 Diseño del controlador difuso	21
2.4.1 Estrategia de control	21
2.4.2 Principio de trabajo del controlador difuso	22
2.4.3 Esquema del controlador difuso	24
2.5 Resultados de la simulación	26
2.6 Análisis de estabilidad del controlador difuso	26
2.7 Conclusiones parciales	26
Capítulo III: Modelación del accionamiento de bomba centrífuga	27
3.1 Introducción	27
3.2 Identificación de los parámetros del accionamiento eléctrico	27
3.3 Descripción de la instalación experimental	28
3.4 Resultados de la experimentación	30
3.5 Valoración económica, ecológica y social	30
3.5.1 Valoración económica	30
3.5.2 Estado actual de las pérdidas en el accionamiento de transporte de pulpas de cola	30
3.5.3 Valoración ambiental	30
3.5.4 Valoración social	30
3.6 Conclusiones parciales	30
Conclusiones	30
Recomendaciones	31
Referencias bibliográficas	
Anexos	

SÍNTESIS

El presente trabajo tiene como tema fundamental: ACCIONAMIENTO ELÉCTRICO ASINCRÓNICO PARA TRANSPORTE EFICIENTE DE PULPA LATERÍTICA, se realizó con el objetivo de diseñar un controlador de eficiencia en un sistema de accionamiento electro-hidráulico que transporta hidromezcla de minerales niquelíferos en la empresa Comandante Ernesto Che Guevara de Moa, Holguín. Su estructura está dada en introducción, tres capítulos, conclusiones, recomendaciones, bibliografía y anexos.

En el primer capítulo, enmarcado en el estado de arte de la investigación donde se establece la metodología de las etapas de trabajo enfocada al desarrollo de la novedad, donde se inducen experimentalmente las variables que hacen más eficiente el proceso, en base al contexto tecnológico en que se desarrolla el sistema de accionamiento de bomba centrífuga.

En el segundo capítulo, se presenta el diseño del controlador difuso y su simulación asistido por MATLAB; cuyo comportamiento sigue las expresiones que caracterizan el proceso de transferencia de energía desde el motor de inducción hacia el subsistema mecánico. Se desarrolla el esquema de control de eficiencia sobre la base de atender su desempeño buscando las menores pérdidas del proceso.

En el tercer capítulo, tiene lugar el análisis experimental y su comparación con los resultados de la simulación, atendiendo el comportamiento de la eficiencia del sistema. Para esto se tienen experimentos de identificación de las variables del sistema, con pruebas experimentales a escala industrial y semi-industrial, que ayudan a validar el esquema de dirección propuesto. Se realiza también una valoración económica del trabajo, con un breve esbozo ecológico y social del sistema.

El autor ha desarrollado varias investigaciones relacionadas con la temática tales como:

- Introducción de autómatas programables en los accionamientos eléctricos de bombas centrífugas para el proceso de lixiviación de carbonato amoniacal.
- Elaboración de sistemas supervisores en accionamientos de bombas centrífugas asistidos en ambiente CITEC y LabVIEW.
- Aseguramiento informativo para la automatización en las plantas de Lixiviación y Secaderos en la empresa Cmdte. Ernesto Che Guevara de Moa.

- Evaluación experimental de accionamientos de bombas de transporte de pulpa laterítica en la planta de Neutralización de tecnología ácida de la empresa Cmdte. Pedro Sotto Alba de Moa.

Como parte de estas investigaciones el autor ha dirigido un total de 11 trabajos de diplomas en el Instituto Superior Minero Metalúrgico "Doctor Antonio Núñez Jiménez de Moa, Cuba.; 2 en la Escuela de Electromecánica de la Universidad Nacional de Loja, Ecuador; 1 en la Escuela de Electrónica de la Universidad Tecnológica y Pedagógica de Colombia; además ha impartido tres cursos de Postgrados, ha publicado cerca de 9 artículos científico-técnicos y los resultados han sido expuestos en eventos científicos de relevancia nacional e internacional tales como:

- II Congreso Internacional de Control Automático en Bucaramanga, Colombia. 1997.
- IX Sesión Científica del Centro de Investigaciones de la Laterita de la Unión del Níquel, Moa. Octubre de 1999.
- I Taller Nacional de Computación Aplicada a la Ingeniería Eléctrica. CIPEL. Ciudad de la Habana. 2000.
- Seminario Internacional Anual de Automatización, Electrónica e Instrumentación. SAAEI-2000. Universidad de Matanzas. Matanzas. 2000.
- III Convención Internacional CINAREM-2001. ISMM Moa. Noviembre del 2000.
- X Simposio Internacional de Energía Eléctrica SIE-2001. Universidad Central de Las Villas. Santa Clara. 2001.
- X Convención Internacional FIE-2000. Evento Eléctrica. Universidad de Oriente. Santiago de Cuba. Julio del 2002.
- XV Conferencia Internacional de Máquinas Eléctricas. Universidad de Leuven, Bruges. Bélgica. Agosto 25 -28 del 2002.
- Convención Internacional de Ingeniería de la CUJAE. Junio del 2002. ISPJAE. Ciudad de la Habana. 2002.
- Sesión Científica en la empresa Comandante Ernesto Che Guevara. Mayo del 2002. Moa. 2002.
- Sesión Científica en la empresa Comandante Pedro Sotto Alba. Noviembre del 2002. Moa. 2002.

INTRODUCCIÓN

Este trabajo constituye un estudio de los sistemas de accionamientos de motores de inducción con bombas centrífugas, en aras de indicar una vía factible para mejorar la eficiencia de la energía transferida con su menor costo posible.

Si tomamos en cuenta, que más del 60 % de la energía total que se consume en la industria [53] [Leonhard, 1996] [25][26][Cleland y Turner, 1997] es a costa de los accionamientos eléctricos con motores de inducción, y de estos más del 55 % lo constituyen los accionamientos de bombas centrífugas; se estima además que más del 20 % de la energía que se puede ahorrar está asociada con el mejoramiento del rendimiento en los motores y los subsistemas mecánicos [1][F. Abrahamsen, 2000]; entonces tiene importancia atender cualquier medida que técnicamente se justifique y contribuya a mejorar los índices de eficiencia de estos sistemas.

La industria cubana del níquel inmersa en un creciente y constante ascenso en sus producciones, demanda cada vez más un apreciable consumo de energía cuyos portadores deciden la rentabilidad de sus empresas, que están entre las once más grandes consumidores de energía eléctrica del país.

En la resolución económica del V Congreso del Partido Comunista de Cuba (1997), se plantea que para la recuperación y desarrollo de la economía cubana es necesario intensificar el desarrollo de la industria minero-metalúrgica y como objetivo estratégico incrementar la producción de concentrado de Níquel con la mayor eficiencia en las inversiones.

Para cumplir estos lineamientos a mediano y largo plazo, se requiere que paralelamente al crecimiento progresivo se perfeccionen los parámetros y regímenes de trabajo de las instalaciones tecnológicas para explotar de una forma más racional y eficiente las grandes reservas de recursos minerales existentes en los yacimientos niquelíferos en la parte oriental de Cuba y se perfeccione el sistema de transportación de minerales lo que garantizará la existencia de un proceso productivo continuo.

El costo de producción del Níquel por el proceso CARON está incrementado en gran medida por el elevado consumo energético. En el tratamiento de las pulpas lateríticas incide, además, una baja eficiencia de los accionamientos eléctricos cuya causa se requiere precisar para disminuir los costos e incrementar su fiabilidad. Estos factores tienen distintos grados de influencia y son muy variables e inciden con diferentes magnitudes, tanto en los indicadores económicos como en la eficiencia del proceso tecnológico [86][Turro, 2002]. Se tienen estudios realizados con las más significativas

hidromezclas [40][Izquierdo, 1989] [76][Suárez, 2000] [89][Turro, 2002] donde se han obtenido correlaciones específicas.

Situación problemática

En líneas generales, la economía nacional necesita crecer en rubros exportables como la producción de Níquel, y situándonos más concretamente en las actuales condiciones de explotación minero metalúrgicas de las plantas del nordeste de la provincia de Holguín; nos encontramos a partir del análisis de las condiciones técnicas y de explotación del sistema de accionamiento eléctrico para el hidrotransporte de pulpas lateríticas en la empresa Cmdte. Ernesto Che Guevara de Moa con problemas respecto a:

- Dificultades de explotación de los equipos e instalaciones de bombeo que trabajan en regímenes poco eficientes y en ocasiones cavitan.
- Ausencia de un dosificador en la entrega de pulpa a las bombas y dificultades para la elección por desconocimiento de los parámetros de hidrotransporte.
- Diferencia de nivel en las descargas de las líneas que incide en la productividad del sistema.

Para fundamentar y proyectar un accionamiento eléctrico destinado al transporte hidráulico, es necesario determinar la velocidad crítica, las pérdidas específicas de carga, la densidad o concentración de las hidromezclas, el diámetro del conducto que permita la determinación del régimen racional de trabajo y elegir los equipos y accesorios adecuados para el accionamiento de bomba centrífuga concreto. Estos aspectos tienen influencia en la magnitud de las inversiones, en los gastos de explotación y la fiabilidad de trabajo de los accionamientos.

Problema

Bajo este entorno se presenta la problemática de baja eficiencia y operatividad de los accionamientos de motores de inducción que accionan bombas centrífugas encargados de transportar pulpa de mineral bajo condiciones de la tecnología CARON.

Problema científico

Ausencia de un esquema de regulación para mantener elevado el rendimiento en accionamientos eléctricos de bombas centrífugas para diferentes estados de cargas mecánicas, y en particular para el transporte eficiente de pulpa laterítica.

Hipótesis

Mediante la caracterización de los motores de inducción que accionan bombas centrífugas en las condiciones de explotación minero metalúrgicas de Moa, se pueden indicar las vías de mejoramiento de sus rendimientos a partir de su identificación difusa en el grupo Motor de Inducción – Bomba centrífuga.

Objetivo

Se tiene como objetivo el mejoramiento de la eficiencia de un accionamiento eléctrico de motor de inducción que acciona bomba centrífuga que transporta hidromezclas lateríticas, con el empleo de un controlador que minimiza la potencia de entrada de acuerdo a la transferencia de energía que le exigen los subsistemas eléctrico y mecánico.

Para cumplir este objetivo principal se desarrollan los siguientes objetivos específicos:

- Caracterizar los accionamientos eléctricos de bombas centrífugas utilizadas para el transporte de hidromezclas lateríticas, y establecer los principales parámetros de explotación que inciden en su comportamiento.
- Utilizar las investigaciones teóricas y experimentales de los parámetros del accionamiento eléctrico para el transporte hidráulico de pulpas lateríticas, en aras de establecer su incidencia en el rendimiento de estos sistemas.
- Contribuir a la disminución de los costos de producción en virtud de la reducción de las pérdidas y con ello del consumo energético, de los gastos de mantenimiento y de la magnitud de las inversiones requeridas con vista a mejorar la fiabilidad de los accionamientos industriales.
- Diseñar un esquema de dirección adecuado del sistema de accionamiento eléctrico de bomba centrífuga, mediante su identificación con técnica difusa para el análisis y control del mismo.

Los métodos de investigación utilizados fueron los siguientes:

1. Método de investigación bibliográfica y en archivos de las empresas que utilizan la Tecnología Carbonato Amoniacal.
2. Método de investigación teórica para caracterizar el objeto de estudio así como sus principales variables.
3. Método de modelación difusa de los componentes del sistema de accionamiento eléctrico de bomba centrífuga basado en su principio físico de operación.
4. Simulación computacional asistido por MATLAB de los esquemas diseñados.

5. Método de la investigación experimental a escala semi-industrial.

Los resultados esperados de la investigación son los siguientes:

- ✓ Selección de las principales variables que participan en la transferencia de energía del sistema de accionamiento eléctrico de bomba centrífuga para transportar hidromezcla de material laterítico.
- ✓ Metodología de evaluación de las pérdidas en el accionamiento eléctrico asincrónico de bomba centrífuga.
- ✓ Modelación del sistema de accionamiento eléctrico con la introducción del controlador difuso, atendiendo a las especificidades del hidrotransporte de mineral níquelífero.
- ✓ Identificación y validación parcial del modelo obtenido.
- ✓ Simulación del sistema de accionamiento eléctrico de bomba centrífuga, para observar su comportamiento en diferentes regímenes.
- ✓ Evaluación del ahorro de energía con la introducción del controlador difuso en el hidrotransporte de mineral laterítico.

Este tipo de investigación está enmarcada en la dirección de las máquinas eléctricas mediante algoritmos y sistemas inteligentes que permiten la regulación eficiente de las cargas, que son los puntos típicos y de mayor consumo en cualquier industria moderna.

Novedad

Consiste en poner a trabajar el accionamiento de un motor de inducción para bomba centrífuga de pulpa laterítica con rendimientos sostenidamente elevados a diferentes estados de cargas mecánicas mediante la minimización de la potencia de entrada de acuerdo a la demanda de energía exigida por la bomba; es decir, obtener la mejor eficiencia sostenida en el sistema Motor de Inducción – Bomba Centrífuga (MI – BC) cuando se transporta pulpa laterítica.

Es decir, la tarea es encontrar la zona de trabajo más eficiente donde se obtiene un elevado rendimiento del sistema de accionamiento eléctrico.

La evaluación de las variables que participan en la energía transferida y la cantidad de mineral laterítico transportado en función de su costo, manteniendo elevada la eficiencia del sistema Motor-Bomba debe conducir a establecer el desarrollo de los siguientes aspectos:

- Elaborar la evaluación del accionamiento eléctrico en base al uso de la conversión de energía para diferentes estados de cargas mecánicas donde se incluyen las pérdidas.
- Ofrecer una metodología para minimizar costos en el trabajo de los Accionamientos de bombas centrífugas para el transporte de pulpa laterítica.
- Brindar un programa para la posible supervisión del trabajo eficiente del sistema Motor de Inducción - Bomba Centrífuga.

Para esto se va encontrar las variables que más influyen en el comportamiento eficiente del accionamiento de transporte de pulpa, cuyo procedimiento permita la relación de magnitudes del modelo del Motor de Inducción (MI) y de la Bomba Centrífuga (BC).

Durante esto se va demostrar, que el gasto de energía está en correspondencia con el proceso de transporte de pulpa y constituye una carga mecánica que cambia en dependencia de las propiedades del material: su densidad, viscosidad, abrasividad, etc; y que utilizando algunas de las técnicas de inteligencia artificial, como lógica difusa, algoritmos neuro-difusos, adaptivos, etc, se pueden ofrecer elementos nuevos para la dirección exitosa de los accionamientos de bombas centrífugas.

En el desarrollo de la investigación se enfrentaron limitaciones tales como:

- Posibilidad de no contar con sólo parte de los datos reales del comportamiento en el tiempo de algunas de las variables del sistema de accionamiento por limitaciones operacionales en las plantas y por no existir la instrumentación necesaria en él.
- Constantes emisiones gaseosas de amoníaco y gas carbónico que dificultan el trabajo de campo.

A pesar de estas limitaciones se desarrollaron las tareas previstas para el trabajo y fue cumplido el objetivo propuesto, con la colaboración de la Unión de Empresas del Níquel del Ministerio de Industria Básica (MINBAS), las empresas Comandantes Ernesto Che Guevara y Comandante Pedro Sotto Alba de Moa, el Instituto superior Politécnico José Antonio Echeverría de Ciudad de la Habana, y el Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa.

CAPÍTULO I FUNDAMENTACIÓN TEÓRICO-METODOLÓGICO DE LA INVESTIGACIÓN

- 1.1 Introducción
- 1.2 Caracterización del sistema de accionamientos de bombas centrífugas para transporte de pulpa laterítica
- 1.3 Trabajos precedentes
- 1.4 Metodología de la investigación
- 1.5 Marco teórico de la investigación
- 1.6 Planteamiento de la tarea para la evaluación y control de eficiencia del bombeo de pulpa laterítica.
- 1.7 Estado actual del control y evaluación de eficiencia
- 1.8 Conclusiones parciales

1.1 Introducción

El objetivo del presente capítulo es establecer el Marco Teórico-Metodológico de la investigación, a partir del estado del arte del tema basado en el análisis de los trabajos precedentes, la metodología seguida para su ejecución así como la base teórica que sustenta la investigación y una caracterización integral del estado actual del objeto de estudio: accionamiento eléctrico de bomba centrífuga que transporta hidromezclas níquelíferas de Moa.

1.2 Caracterización del sistema de accionamiento de bomba centrífuga para el transporte de pulpa laterítica.

Los accionamientos eléctricos con bombas centrífugas para el transporte de pulpas lateríticas están presentes en diversas secciones del proceso tecnológico que sufre el mineral en las plantas de procesamiento de níquel cubano.

El esquema del proceso tecnológico simplificado en la planta Lixiviación de la empresa Cmdte. Ernesto Che Guevara de Moa se muestra en la figura 1. El proceso de lixiviación consiste en la disolución selectiva del mineral reducido de laterita que tiene una composición de 1,53 % de Ni, 0,122 % de Co, 2,1 de Fe metálico, y de un 40 – 60 % de Fe magnético.

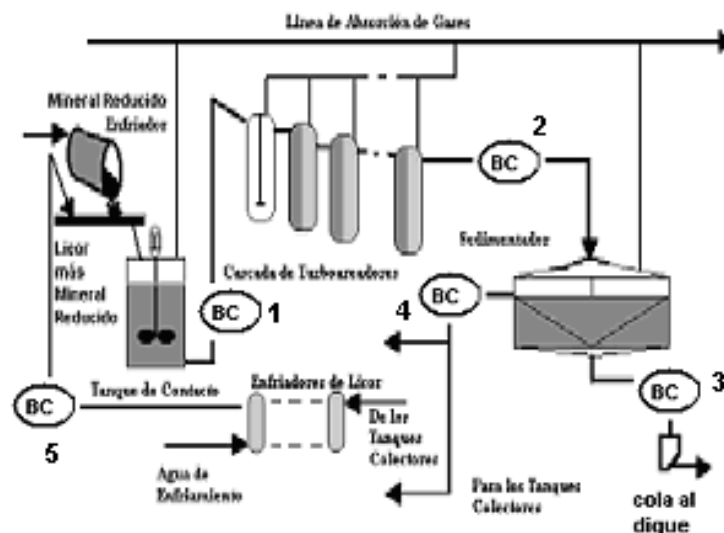


Figura 1 Diagrama del proceso tecnológico de la planta de lixiviación en la empresa Cmdte. Ernesto Che Guevara de Moa, Holguín.

En la figura 1 se indican los accionamientos de bombas centrífugas de pulpas 1: accionamiento de bombeo a la salida del tanque de contacto; 2: accionamiento de bombeo a los tanques sedimentadores; 3: accionamiento de bombeo de pulpas de colas al dique; 4: accionamiento de bombeo a los tanques colectores; 5: accionamiento de bombeo al canal de pre-lixiviación para realimentar al tanque de contacto.

La investigación del accionamiento eléctrico de bombas se realiza en los accionamientos 1, 2 y 3 indicados en la figura 1 en la planta de lixiviación,

El estudio se centra en los accionamientos 1 y 3 con motores de inducción que accionan bombas centrífugas de marcas WARMAN, DENVER y PB-315, con rodete de trabajo cerrado, encargadas de enviar pulpas con temperaturas de 60 a 90 °C con densidades variables, debido a que sus componentes se encuentran mezclados en proporciones muy diversas en todas estas etapas de la planta.

1.3 Trabajos precedentes

Los resultados que se tienen en el mejoramiento de la eficiencia de los accionamientos de motores de inducción están relacionados con trabajos en el diseño y mejoras en la calidad de los aceros, y el establecimiento de esquemas de control de variables de la máquina de inducción, sin tener en cuenta otros factores operacionales que aparecen debido al comportamiento específico del proceso de transferencia de energía desde la máquina hacia el mecanismo o proceso.

Las fuentes bibliográficas indican que existe una buena reserva de aspectos investigativos en las partes de los mecanismos de producción, las cuales deben ser más adecuadamente estudiadas desde su proceso.

El sistema de accionamiento eléctrico puede ser estudiado en busca del mejor uso de la energía transferida desde la red de potencia trifásica en sus cuatro principales componentes:

- Fuente de suministro de potencia trifásica.
- Subsistema: Controlador + Convertidor + Motor Eléctrico
- Subsistema Mecánico, constituye la carga mecánica rotacional del accionamiento y está determinado por el enlace del árbol del motor con el mecanismo
- Subsistema Proceso, es en nuestro caso la instalación hidráulica de transporte de pulpa. Como se conoce, los motores de inducción tienen una elevada eficiencia cuando operan con sus cargas y torques nominales [8][Bodson, 1994]. Así mismo operando con cargas ligeras, las pérdidas del acero se incrementan dramáticamente, reduciendo considerablemente la eficiencia [47][Kusko y Galler, 1983]. Este hecho se utiliza en este estudio porque es una forma de disminuir las pérdidas en el motor de inducción mediante el control del flujo magnético de acuerdo a la demanda de la carga mecánica en el árbol del motor.

Por otra parte, muchas de las aplicaciones de los motores de inducción corresponden a bombas, ventiladores y compresores; y en la mayoría de las cuales, los motores operan significativamente por debajo de sus valores nominales de carga; la tensión aplicada al estator, crea un campo magnético rotatorio que induce corrientes en el rotor, generándose par en el eje; si no se requiere el par nominal, el máximo campo magnético tampoco se requerirá; la corriente que produce el campo magnético adicional aumenta las pérdidas del acero, disminuyendo la eficiencia del motor. La presente investigación prepara un esquema de control difuso sobre la base del control vectorial de corrientes, minimizando la potencia de entrada del accionamiento para mantener elevada su eficiencia a diferentes estados de cargas mecánicas del sistema.

Con este enfoque, es de interés el estudio de las pérdidas considerando el flujo magnético reducido [61][Moreno Eguilaz y otros, 2001], utilizando técnica de lógica difusa, el cual parte de un modelo aproximado de pérdidas, y una aproximación basada en mediciones de potencia, donde utiliza un procedimiento que permite encontrar el valor óptimo del flujo [62][Moreno Eguilaz y otros, 1996] [34][García y otros, 1994]

[45][Kioskeridis y Margaritis, 1996]. Ellos garantizan la estabilidad del accionamiento para las condiciones a mínimo flujo magnético en régimen estático. Nuestro estudio incorpora el comportamiento del accionamiento eléctrico atendiendo los cambios de la carga mecánica.

1.4 Metodología de la investigación

La metodología utilizada sigue varias etapas de trabajo y no difiere en su esencia de la metodología de investigación clásica utilizada para estudios de sistemas a controlar en procesos industriales, sólo que al aplicarla en un proceso real (accionamiento eléctrico de bomba centrífuga de transporte de pulpa laterítica) de cierta complejidad con peculiaridades específicas en más de un objeto, resulta de interés su desarrollo.

Primera etapa: Preliminar ó inicial de la investigación empírica. El primer paso lo constituyó la selección de la planta y el accionamiento objeto de la investigación, debido a su importancia desde el punto de vista energético, metalúrgico y económico.

Segunda etapa: Experimental y de Simulaciones. Se hizo la caracterización integral los sistemas de accionamientos eléctricos de la planta de Lixiviación; la simulación del modelo difuso de los subsistemas eléctrico y mecánico del accionamiento eléctrico de bomba centrífuga, basado en datos del proceso real; y se preparó una instalación experimental de hidrotransporte en el Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa, donde se ensayó el accionamiento de bombas a diferentes densidades de la pulpa con mucho más posibilidades de experimentación que en la planta. Se obtuvo la base de conocimiento y la base de reglas de las funciones de pertenencias y gráficos de comportamiento del sistema.

Tercera etapa: La interpretación y procesamiento de la información obtenida de la comparación de los resultados de las simulación y experimentación realizadas con el accionamiento eléctrico, analizando cada uno de los gráficos para cambios en las variables y señales, donde se analizó el desempeño del sistema de control difuso a partir de sus funciones.

1.5 Marco teórico de la investigación

El estudio consiste en utilizar el modelo del motor de inducción (MI) y las relaciones más relevantes en el funcionamiento de la bomba centrífuga (BC), para demostrar una de las vías de mejorar la eficiencia del accionamiento eléctrico por el control de sus pérdidas mediante el empleo de un controlador difuso que adapta la potencia de entrada del sistema a la carga mecánica exigida por la bomba centrífuga en su transporte eficiente de hidromezclas de mineral laterítico.

Para esto se busca el vínculo (ver figura 2) entre la potencia eléctrica de entrada del accionamiento, su desarrollo como potencia electromagnética en los devanados del motor, hasta que es convertida en forma de potencia mecánica rotacional en el eje de la bomba centrífuga.

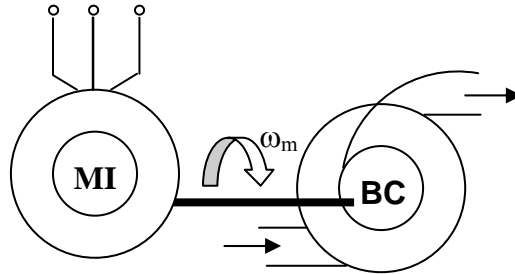


Figura 2 Grupo Motor de inducción (MI) con Bomba Centrífuga (BC).

La eficiencia del motor de inducción está definida como la relación entre la potencia de salida P_s y la potencia de entrada P_e :

$$\eta_{MI} = \frac{P_s}{P_e} = \frac{P_s}{P_s + \Delta p} = \frac{P_e - \Delta p}{P_e} \quad (1.1)$$

donde:

P_s – es la potencia de salida en el árbol del motor de inducción, [kW]; P_e – es la potencia eléctrica de entrada del motor de inducción, [kW]; Δp – son las pérdidas totales en el motor de inducción, [kW].

Las pérdidas totales Δp del motor de inducción están determinadas principalmente por:

$$\Delta p = \Delta p_{cus} + \Delta p_{cur} + \Delta p_{ac} + \Delta p_{mec} + \Delta p_{ad} \quad (1.2)$$

Δp_{cus} - son las pérdidas del cobre en el devanado del estator del motor, [kW]; Δp_{cur} - son las pérdidas del cobre en el devanado del rotor del motor, [kW]; Δp_{ac} – son las pérdidas del acero en el núcleo del motor de inducción, [kW]; Δp_{mec} - son las pérdidas mecánicas del motor de inducción, [kW]; Δp_{ad} - son las pérdidas adicionales en el motor de inducción, [kW].

Desde la potencia electromagnética se genera el momento electromagnético M_{em} a una frecuencia angular sincrónica ω_s que entrega la potencia convertida P_{conv} en el árbol del motor con la frecuencia angular de rotación del rotor ω_r [14][Chapman, 2003], tal como se indica en la expresión (1.3):

$$M_{em} = \frac{P_{em}}{\omega_s} = \frac{P_{conv}}{\omega_r} = \frac{P_{AG}}{\omega_s} \quad (1.3)$$

donde:

M_{em} es el momento electromagnético del motor de inducción, [N.m]; P_{conv} es la potencia convertida por el motor existente en su árbol, [kW]; ω_r es la frecuencia angular de rotación del rotor, [rad/s]; ω_s es la frecuencia angular sincrónica del motor, [rad/s]

P_{AG} – es la potencia del entrehierro del motor, [kW].

Y el par electromagnético, para condiciones de estado estacionario, se corresponde con el par resistivo de la carga mecánica M_c de la bomba centrífuga, y está relacionado con la potencia de salida P_s por la expresión (1.4):

$$P_s = M_c \cdot \omega_r \quad (1.4)$$

El momento electromagnético tiene componentes activa y de magnetización por el lado de la corriente, que de acuerdo con [11][Cеровski y Javurek, 1997] se escribe como la expresión (1.5):

$$M_{em} = p \cdot \frac{m_1}{2} \cdot \frac{L_m}{L_r} \cdot \Psi_r \cdot I_M \quad (1.5)$$

siendo:

p – es el número par de polos del motor; m_1 – ese el número de fases del motor.

L_m – es la inductancia mutua del motor, [mH]; L_r – es la inductancia del rotor, [mH].

Ψ_r – es el flujo magnético del rotor, [Wb]; I_M – es la componente activa de la corriente del torque electromagnético, [A].

El módulo de la corriente del estator está dado como:

$$I = \sqrt{(I_M)^2 + (I_{mag})^2} \quad (1.6)$$

donde:

I_{mag} – es la corriente de magnetización del torque electromagnético, [A]

En la expresión (1.11) el torque electromagnético está en función del flujo del rotor Ψ_r , el cual está determinado por la corriente de magnetización I_{mag} , como (1.7):

$$\Psi_r = I_{mag} \cdot L_m \quad (1.7)$$

Y de esta forma podemos controlar el torque electromagnético desarrollado por el motor de inducción a través del flujo magnético del rotor Ψ_r con un comando que maneje el módulo de la corriente de magnetización I_{mag} de la máquina; o mediante la tensión aplicada en los terminales de alimentación del motor de inducción, de acuerdo a la expresión (1.8) ofrecida por [67][Romero, 2000].

$$\Psi_r = \frac{U}{\omega_s} \quad (1.8)$$

Con el manejo de estas variables se puede conseguir que sean menores las pérdidas del acero del motor Δp_{ac} , las cuales están determinadas por (1.9):

$$\Delta p_{ac} = 3 \cdot \frac{E_1^2}{R_{mag}} \quad (1.9)$$

donde:

E_1 – es la f.e.m. de respuesta del motor a la tensión aplicada, [V].

R_{mag} – es la resistencia magnética del circuito magnético del motor, [ohm].

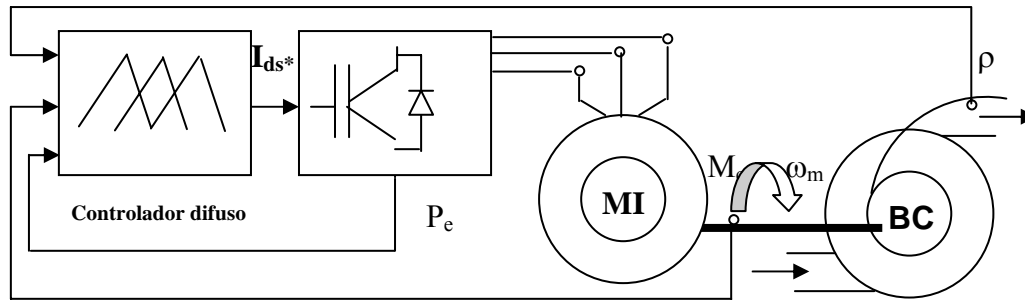


Figura 3 Esquema del accionamiento eléctrico MI – BC con el controlador difuso y el inversor sinusoidal de tensión.

Por otra parte, como el motor de inducción (ver figura 3) es alimentado a través de la fuente inversora de tensión sinusoidal (VSI a PWM), la cual opera con los comandos elaborados desde el modelo de la Teoría de Campo Orientado (TCO) del motor

Para el control de las pérdidas del motor es de interés un esquema de control indirecto vectorial con el flujo del rotor orientado en su eje directo dd , tomando como referencia el sistema de coordenadas que gira a la velocidad angular sincrónica del campo del estator ω_e .

Con la orientación del flujo del rotor sobre su eje directo dd , donde se asume que la componente transversal $\Psi_{qr} = 0$; en estado estacionario se obtiene:

$$\psi_{dr} = L_m \cdot I_{ds} \quad (1.12)$$

Siendo equivalentes la componente I_{ds} con la corriente de magnetización I_{mag} [8][Bose y otros, 1997].

La componente total de la corriente del estator en los ejes de cuadratura tiene como módulo:

$$I_s = \sqrt{(I_{ds})^2 + (I_{qs})^2} \quad (1.13)$$

de tal forma que I_{ds}^* y I_{qs}^* sirven de comandos durante el control de las pérdidas.

La potencia de entrada del accionamiento es obtenida desde:

$$P_e = I_{ds} \cdot U_{ds} + I_{qs} \cdot U_{qs} \quad (1.14)$$

A partir de lo cual, con cambios en I_{ds} se controla el flujo del rotor Ψ_{dr} y con ello el torque del motor de inducción, que repercute en la potencia de entrada.

Se puede entonces, valorar la eficiencia del accionamiento eléctrico a través del momento de carga M_c desarrollado por la potencia mecánica de la bomba centrífuga, por su velocidad angular de rotación ω_r y entre la potencia de entrada eléctrica del motor de inducción, según (1.15):

$$\eta_{MI} = \frac{M_c \cdot \omega_r}{P_e} \quad (1.15)$$

El momento mecánico o de carga desarrollado por la bomba centrífuga (BC) está relacionado con la potencia mecánica N_b y la velocidad angular de rotación ω_r de acuerdo a la siguiente expresión (1.16):

$$M_c = \frac{N_b}{\omega_r} \quad (1.16)$$

donde

M_c es el momento de carga mecánico de la bomba, [N.m]; N_b es la potencia mecánica desarrollada por la bomba, [kW]; ω_r es la velocidad angular de rotación del rotor, [rad/s]

La potencia mecánica de la bomba centrífuga es válida para cualquier tipo de fluido según la expresión (1.17) [62][B. Nekrasov, 1968]:

$$N_b = \frac{\rho \cdot H \cdot Q}{102 \cdot \eta_b \eta_{tr}} = \frac{\rho \cdot H \cdot v \cdot A}{102 \cdot \eta_b \eta_{tr}} \quad (1.17)$$

donde

ρ es la densidad del fluido transportado por la bomba, [kg/m³]; H es la altura de carga desarrollada por la bomba, [m]; Q es el caudal o gasto desarrollado por la bomba, [m³/s]; η_b es la eficiencia de la bomba, [%]; η_{tr} - es la eficiencia de la transmisión entre la bomba y el motor eléctrico, [%]; v - es la velocidad lineal periférica del fluido transportado, [m/s]; A - es el área de la sección transversal de la tubería, [m²].

1.6 Planteamiento de la tarea para la evaluación y control de la eficiencia de bombeo de pulpa laterítica

El objetivo del bombeo de pulpa laterítica en cualquiera de las secciones de la planta de lixiviación es transportar hidromezcla de mineral de un recipiente a otro en condiciones de densidad y caudal dado.

La efectividad del hidrot transporte se evalúa caracterizando la influencia que tienen la densidad ó concentración de sólidos y la temperatura en los esfuerzos cortantes y la viscosidad de la hidromezcla.

La presencia de gases en las tuberías acentúa la variabilidad en la carga mecánica de las bombas centrífugas, debido a las pulsaciones que ocasiona y de esta forma exige el desarrollo de un torque variable en el accionamiento eléctrico.

1.7 Estado actual del control y evaluación de la eficiencia

En el sistema de accionamientos eléctricos de bombas centrífugas que transportan pulpa laterítica en la planta de lixiviación, actualmente sólo existe un sistema supervisor montado en un software que cada cierto tiempo realiza un muestreo de algunas variables del proceso entre las que se encuentran está la temperatura de salida de la pulpa y el nivel, así como la tensión y las corrientes de fases en el circuito eléctrico de la bomba.

1.8 Conclusiones parciales

En el desarrollo de este capítulo se concluyó:

- Al observar y describir el flujo tecnológico donde se desarrolla el accionamiento eléctrico, en que las condiciones de operación son únicas por su tipo en Cuba; se aprecia que las variables que inciden en la eficiencia del sistema de accionamiento de bomba centrífuga son: la potencia de entrada y la frecuencia angular de rotación del motor eléctrico, la densidad de la hidromezcla transportada, la altura de carga de presión y el caudal desarrollado por la bomba centrífuga.
- Una parte apreciable de la energía que se transfiere desde el motor de inducción hacia la bomba centrífuga se disipa en la red hidráulica en forma de pérdidas, donde es frecuente la aparición de regímenes de cavitación por la presencia de gases en el fluido transportado y que provoca vibraciones mecánicas adicionales en el sistema.
- La presencia aleatoria de gases en las tuberías acentúa la variabilidad en la carga mecánica de las bombas centrífugas, que exigen el desarrollo de un torque variable en el accionamiento eléctrico.

CAPÍTULO II: TÉCNICA DE ANÁLISIS DEL SISTEMA MOTOR DE INDUCCIÓN – BOMBA CENTRÍFUGA

- 2.1 Introducción
- 2.2 Caracterización matemática
- 2.3 Procedimiento de modelación difusa
- 2.4 Procedimiento de aprendizaje difuso
- 2.5 Diseño del controlador difuso
 - 2.5.1 Estrategia de control
 - 2.5.2 Principio de trabajo del controlador difuso
 - 2.5.3 Esquema del controlador difuso
- 2.6 Resultados de la simulación
- 2.7 Análisis de estabilidad del controlador difuso
- 2.8 Conclusiones parciales

2.1 Introducción

En este capítulo se presenta una modelación a partir de datos experimentales de un accionamiento eléctrico de bomba centrífuga, donde el problema de la selección de variables y la ejecución del sistema es discutido mediante un procedimiento de lógica difusa.

Esto obedece a situaciones prácticas descritas dentro de los fenómenos secundarios del comportamiento del accionamiento en que son incorporadas variables con mucha dificultad dentro del modelo principal; y entonces estos no pueden ser modelados con mucha exactitud (para instantes de histéresis ó de saturación magnética del acero de la máquina de inducción, fricción de los rodamientos, comportamiento térmico y viscosidad variable del fluido de los subsistemas mecánicos) donde las relaciones del fenómeno con el modelo no son suficientemente conocidas.

En este contexto, es importante acudir a otras técnicas como la lógica difusa que permite una adecuada representación del sistema de accionamiento eléctrico desde la observación directa, detallada y profunda del comportamiento del proceso y fenómenos que tienen lugar en el universo en discusión [17][18][Costa Branco y Dente, 1998][37][Harris, Moore y Brown, 1993].

2.2 Caracterización matemática

Para caracterizar el grupo Motor de Inducción – Bomba Centrífuga: MI – BC, se plantean algunas indicaciones de las variables más relevantes en el funcionamiento del accionamiento. De acuerdo a eso, se establece una simplificada caracterización matemática del accionamiento de bomba centrífuga, atendiendo a sus elementos principales usando la teoría de circuitos eléctricos y la física de los circuitos hidráulicos.

Modelos matemáticos

Las ecuaciones del motor de inducción MI están basadas en la Teoría del Campo Orientado y fueron expuestas en el Marco Teórico del Capítulo I.

El subsistema hidráulico puede ser representado, en forma simplificada, por una relación funcional dada por:

$$y = f(n_{exp}, \rho) \quad (2.1)$$

donde la velocidad específica de la turbo-máquina BC es:

$$n_{exp} = \frac{n_b \cdot \sqrt{Q}}{H^{3/4}}$$

La eficiencia del sistema de accionamiento electro-hidráulico es una función de variables tanto del motor eléctrico MI como de la bomba centrífuga BC; donde intervienen: la potencia de entrada P_e del motor tomada desde el inicio del sistema, la frecuencia angular de rotación del motor que define la velocidad de rotación del accionamiento y que determina la velocidad periférica de transporte del fluido, la carga de presión desarrollada por la bomba, y la densidad ρ de la hidromezcla.

$$\eta = f(P_e, \omega_r, Q, H, \rho) \quad (2.2)$$

La eficiencia del motor de inducción MI atendiendo a la potencia mecánica que le exige la bomba centrífuga en su eje, puede ser evaluada sintéticamente por tres variables: la potencia de entrada P_e del motor eléctrico, su frecuencia angular de rotación ω_r y la densidad ρ de la pulpa transportada por la bomba, tal como (2.3):

$$\eta_{MI} = f(P_e, \omega_r, \rho) \quad (2.3)$$

2.3 Procedimientos de modelación difusa

El modelo difuso utilizado es de dos bloques de arquitectura tipo Mamdani con::

- Variables de entrada / salida: (bloque 1: $P_e, \rho \rightarrow I_{ds1}$; bloque2: $I_{ds1}, \omega_r \rightarrow I_{ds}$).
- Las reglas de control operan con la siguiente estructura:
 - Si antecedente <condición> entonces consecuente <acciones>
- Se utiliza como procedimiento de defusificación el método del centroide.
 - Se seleccionan cinco funciones de pertenencias por cada variable, dos de tipo triangular para P_e y ω_r y una de tipo campana de Gauss para la densidad ρ .

Las curvas de superficie de ambos bloques se muestran en la figura 4 (a) y (b).

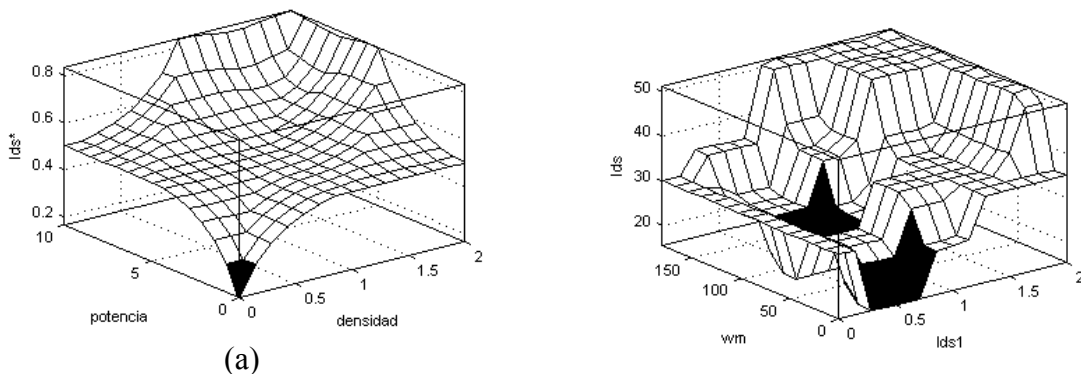


Figura 4 Curvas de superficie: bloque 1: entradas (P_e), (ρ) \rightarrow salida (I_{ds1}); bloque 2 entradas (ω_r), (I_{ds1}) \rightarrow salida (I_{ds}).

2.4 Diseño del controlador difuso

El diseño del controlador difuso está basado en el control de la eficiencia mediante un procedimiento de búsqueda del valor más bajo de flujo magnético que corresponde con la mínima potencia de entrada, teniendo lugar así las menores pérdidas del acero en la máquina eléctrica.

2.4.1 Estrategia de control

El esquema de dirección del controlador difuso se basa en mejorar la eficiencia del motor de inducción MI mediante la disminución de sus pérdidas del acero.

Para esto se considera que el motor se encuentra operando en un punto de baja eficiencia que corresponde con una determinada potencia activa; y que puede mejorarse moviéndose a otro punto con mejor eficiencia, mientras mantenemos la misma potencia activa. Esto se consigue reduciendo la corriente de magnetización de la máquina de acuerdo al torque mínimo exigido por la carga mecánica, disminuyendo así las pérdidas del acero. En este caso, el balance de pérdidas totales puede ser aproximadamente archivada por adelantado a una mejor eficiencia.

2.4.2 Principio de trabajo del controlador difuso

El controlador difuso está implementado para el manejo de un inversor sinusoidal de tensión a PWM, que alimenta un motor de inducción MI preparado con un modelo de campo orientado (figuras 5 y 7), y es controlado por el método indirecto del vector corriente I_{ds} que gobierna el flujo magnético del rotor ψ_r del motor.

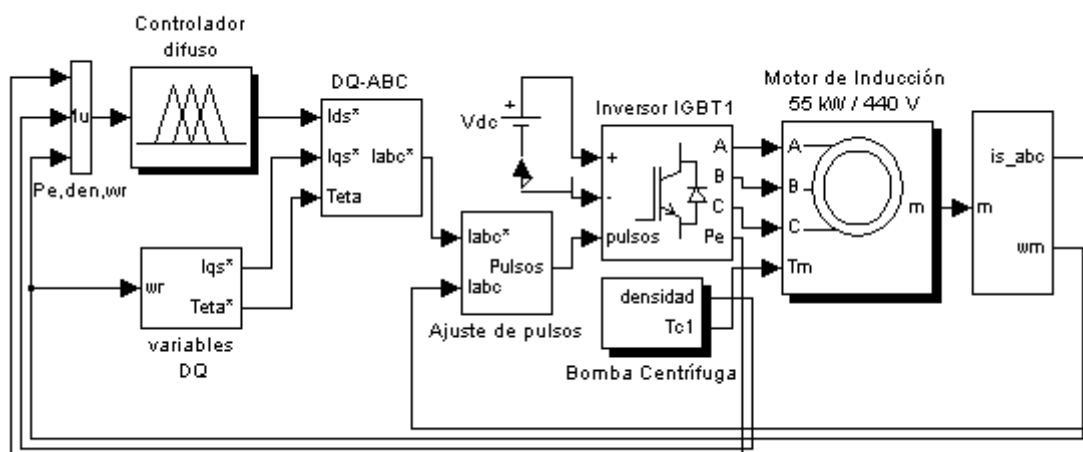


Figura 5 Esquema de control difuso para el accionamiento de bomba centrífuga.

El esquema de control opera de la siguiente forma (figura 5):

la salida que es la corriente I_{ds} Consecuentemente la salida implicada es transformada a un valor por defusificación.

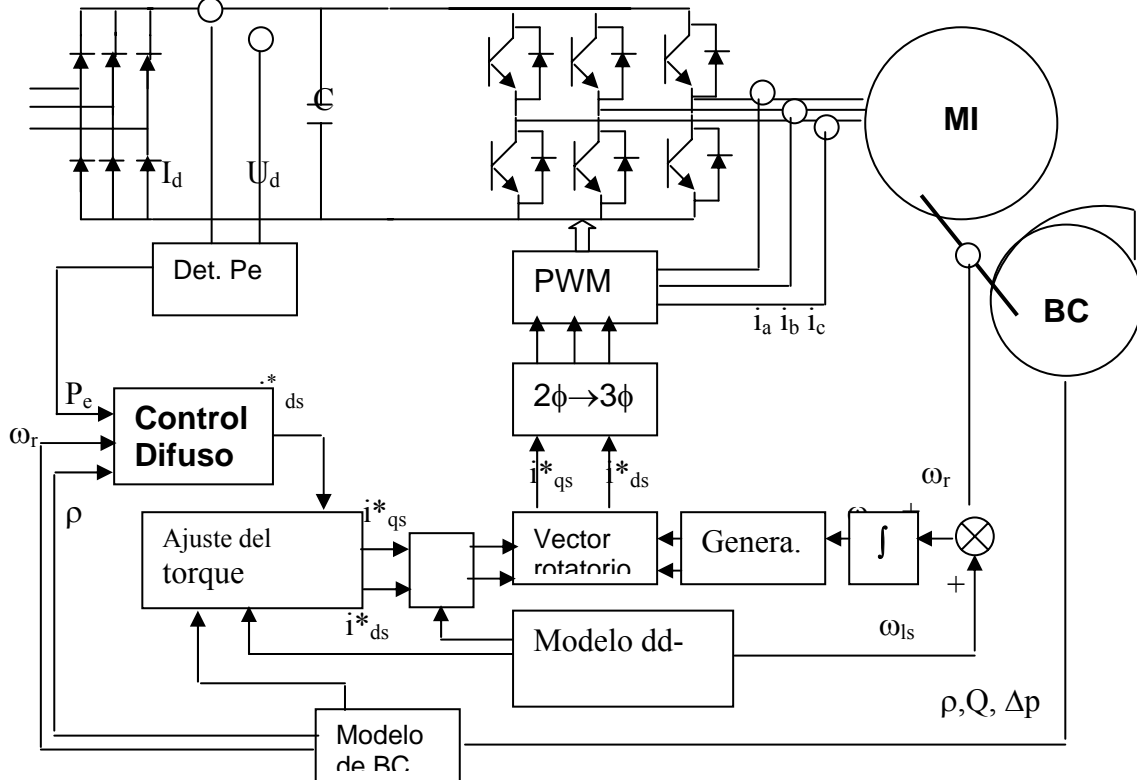


Figura 7 Esquema de control vectorial por método indirecto de un motor de inducción para bomba centrífuga para mejorar la eficiencia del accionamiento. Usando el método del centro del área, el valor real de la salida I_{ds}^* del controlador difuso está generada de acuerdo a la decisión del contenido de la tabla de reglas. Un miembro que debe ser generado es la corriente de magnetización I_{ds} y es factible para minimizar las pérdidas del acero.

Las funciones de pertenencias del controlador difuso están en la figura 9 a) y b).

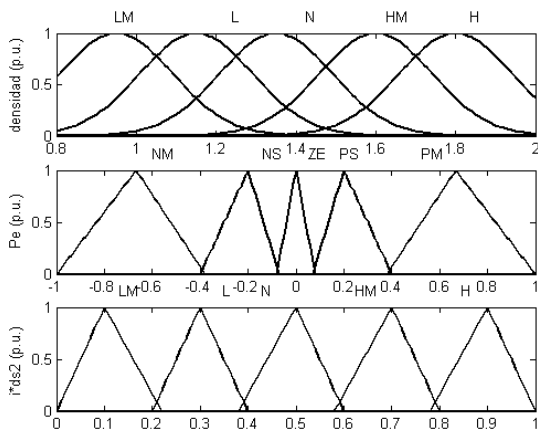


Figura 9 (a)

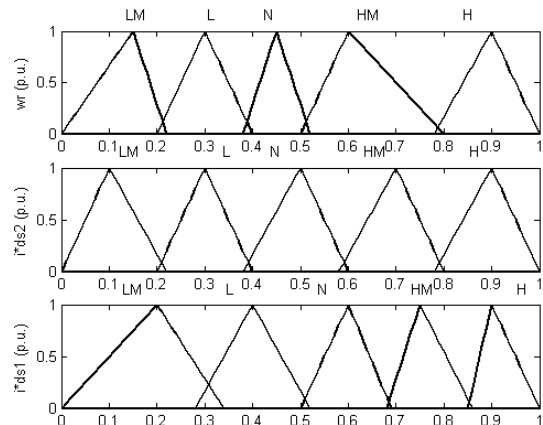


Figura 9 (b)

2.5 Resultados de la simulación

La simulación arrojó los siguientes resultados principales:

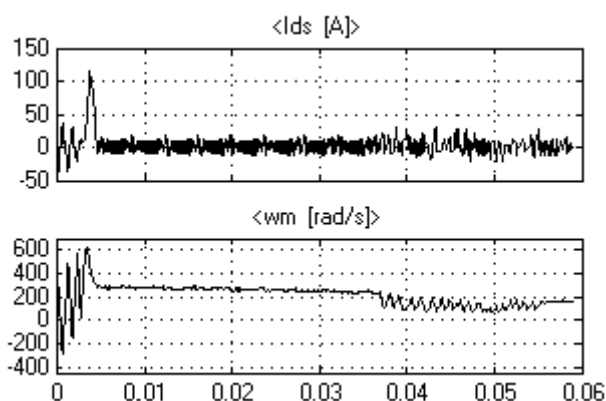


Figura 10 Comportamiento de I_{ds} y ω_m del motor de 55 kW, 130 rad/s, cargado con 50.76 N.m durante el trabajo del controlador difuso.

Como se observa existe una convergencia estable de la velocidad y la corriente I_{ds} ante las oscilaciones provocadas por las perturbaciones de la carga, ante las cuales se repone el accionamiento del motor de inducción y se restablece en un valor menor de velocidad dada por las condiciones específicas de carga.

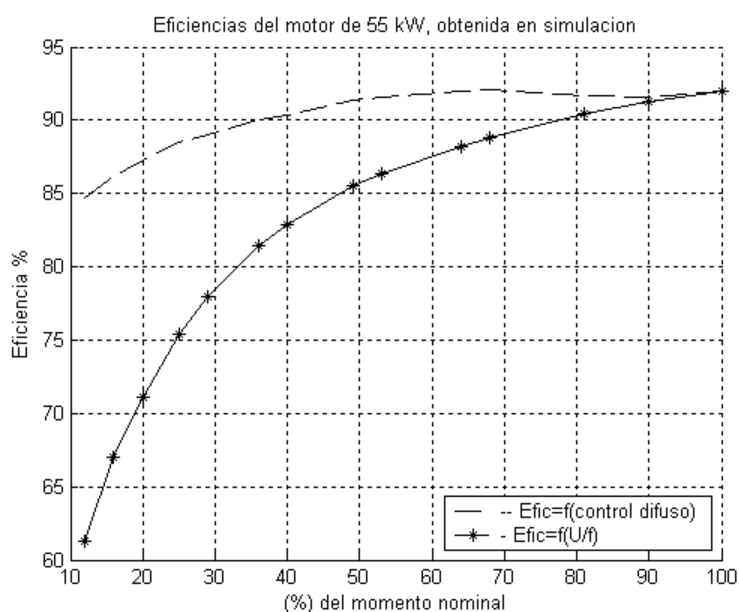


Figura 13 Curvas de eficiencias en el motor de 55 kW, obtenidas durante la simulación con el control difuso (--), y sin el uso de éste (-*-).

Evaluando la eficiencia promedio, se ha obtenido un incremento de un 8,74 % con el uso del controlador difuso.

Al mismo tiempo, la potencia de entrada se minimiza en la misma magnitud de las pérdidas, aspecto que se puede observar de lo obtenido en la simulación durante el

control en un motor más pequeño de 2,23 kW cargado con 8.09 N.m, tal como muestra la figura 14:

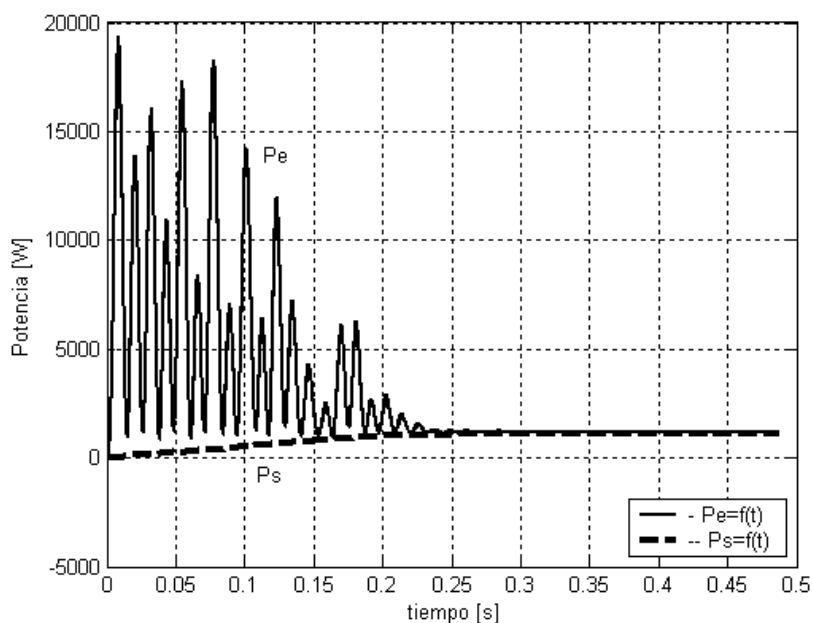


Figura 14 Potencias de entrada P_e y salida P_s (--) durante el trabajo del controlador difuso en el motor de 2.23 kW, cargado con 8.09 N.m.

2.6 Análisis de estabilidad del controlador difuso

Se evalúa la estabilidad del controlador diseñado utilizando el método directo de Lyapunov y está definido por la metodología de: [50][Lei y Langari, 2003]. Y para todo el sistema, la estabilidad global se comporta como se muestra en la figura 15.

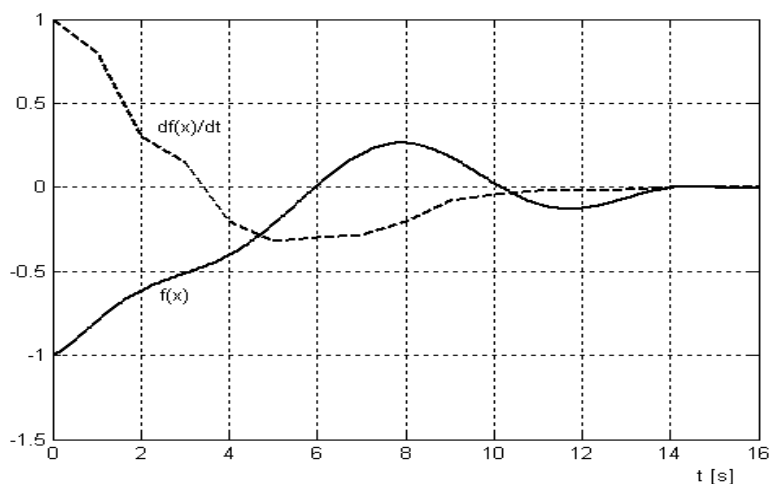


Figura 15 Respuesta de la función $f(x)$ y $df(x)/dt$ donde se observa la estabilidad del sistema de control difuso.

2.7 Conclusiones parciales

- La eficiencia del motor de inducción se mejora en un 8,74 % mediante el uso del controlador difuso que minimiza sus pérdidas del acero.
- El controlador difuso opera con dos bloques difusos en cascadas, usando arquitectura tipo Mamdani, teniendo dos variables de entradas y una de salida: $(P_e, \rho) \rightarrow i_{ds2}^*$ y $(\omega_r, i_{ds2}^*) \rightarrow i_{ds}^*$, cuyo dominio se estableció por el método de los clusters.
- El esquema de control preparado sigue la búsqueda del menor módulo de potencia de entrada P_e en correspondencia al estado de carga mecánica exigida por la bomba centrífuga, y se comprobó su estabilidad.

Capítulo III: RESULTADOS EXPERIMENTALES DE LA INVESTIGACIÓN DEL ACCIONAMIENTO DE BOMBA CENTRÍFUGA

3.5	Introducción
3.6	Identificación de los parámetros del accionamiento eléctrico
3.7	Descripción de la instalación experimental
3.8	Resultados de la experimentación
3.5	Valoración económica, ecológica y social
3.5.1	Valoración económica
3.5.2	Estado actual de las pérdidas en el accionamiento de transporte de pulpas de cola
3.5.3	Valoración ambiental
3.5.4	Valoración social
3.6	Conclusiones parciales

3.1 Introducción

En este capítulo se plantean los resultados de la experimentación del sistema de accionamiento eléctrico de bomba centrífuga.

Se estableció además una comparación entre el comportamiento de la eficiencia del accionamiento con el uso del variador de velocidad bajo sus condiciones nominales de trabajo, y su posible comportamiento con los comandos del controlador difuso.

3.2 Identificación de los parámetros del accionamiento eléctrico

Para la correcta evaluación de la eficiencia del motor de inducción en su trabajo con la bomba centrífuga, es necesario identificar sus parámetros; para esto, se utilizó el método "Cálculo de los parámetros del motor de inducción a partir de datos de catálogo", propuesto y bien validado por Costa Montiel y otros [23][Costa Montiel, 2004.

3.3 Descripción de la instalación experimental

Para la valoración experimental del sistema de accionamiento eléctrico, se tuvo en cuenta las mediciones en una instalación semi-industrial (figura 16, en el ISMM de Moa) y las efectuadas en diferentes accionamientos de bombas en la planta de lixiviación de la empresa Cmdte. Ernesto Che Guevara de Moa.

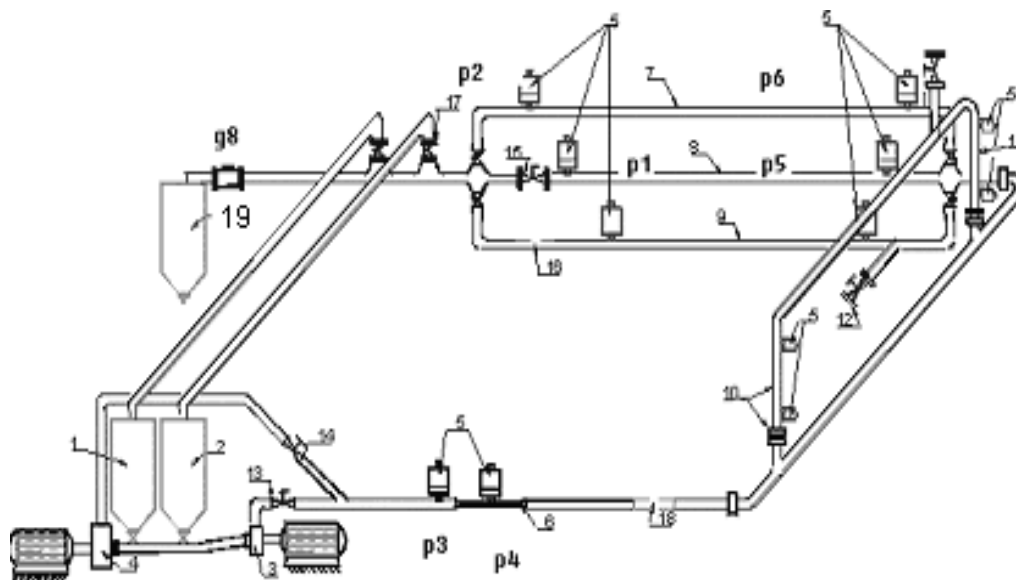


Figura 16. Accionamiento eléctrico de bombas centrífugas para el transporte de pulpa laterítica.

Los componentes de la instalación de hidrotransporte dada en la figura 16, 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), con rodete de trabajo cerrado; 5: instrumentos indicadores de presión [Pa]; 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 ó caudal mediante un flujómetro indicador (m³/h); p₁, p₂, p₃, p₄, p₅, p₆ : puntos de medición de presión (Pa).

3.4 Resultados de la experimentación

Evaluando la eficiencia, se obtiene su comportamiento experimental, usando los comandos difusos en el variador de velocidad Yakawana en el PLC (SIMATIC SU-95).

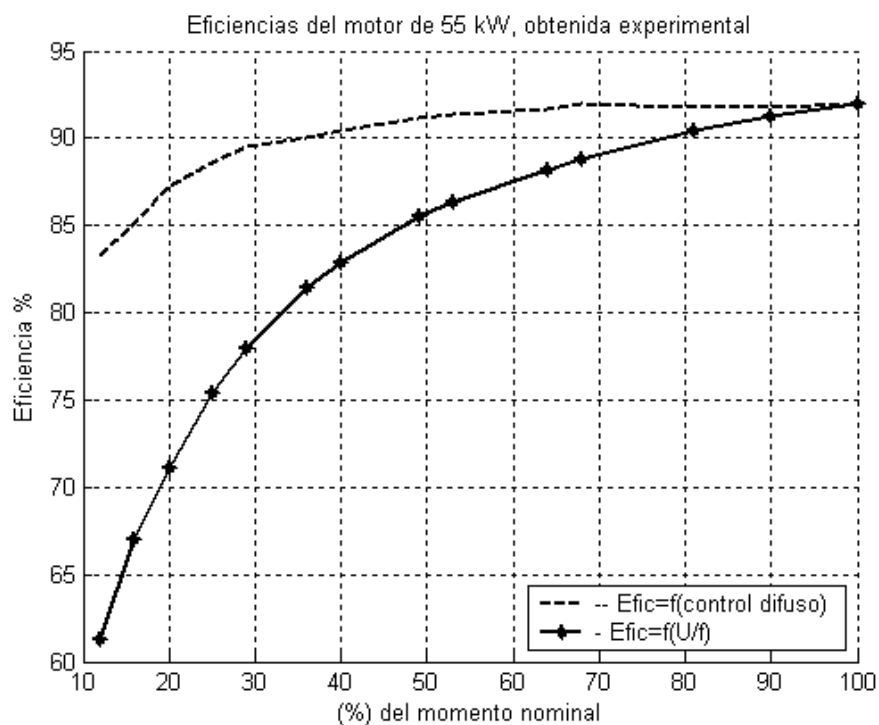


Figura 17 Eficiencia del motor de inducción con datos experimentales cuando opera con mando guiado por ajustes del controlador difuso, accionando la bomba WARMAN. Comparativamente, las curvas de eficiencias obtenidas desde la simulación y la experimentación se brinda en la siguiente figura 18:

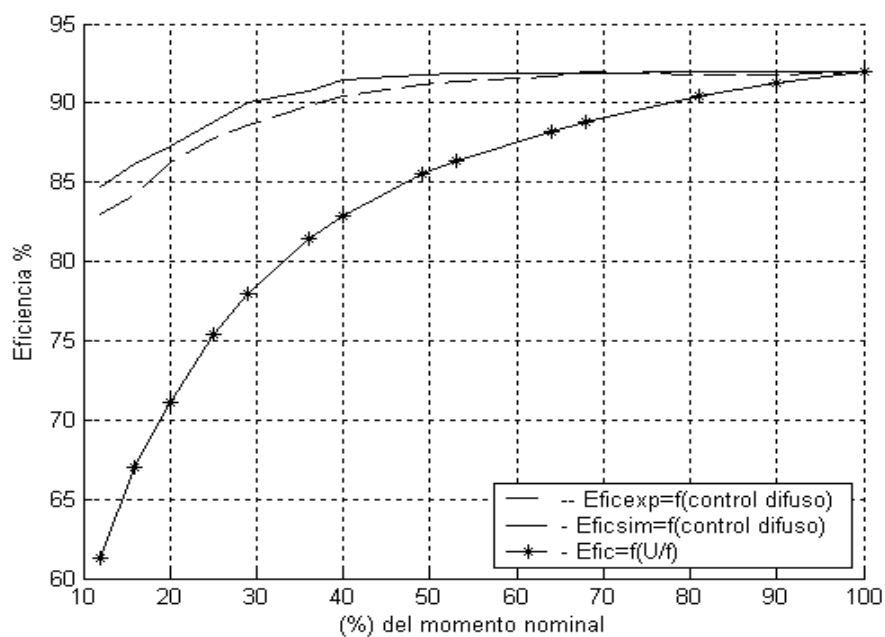


Figura 18 Curvas comparativas de eficiencias del motor de inducción, obtenidas con el uso del control difuso en la simulación (-) y la experimentación (--), así como sin el uso de éste (-*-).

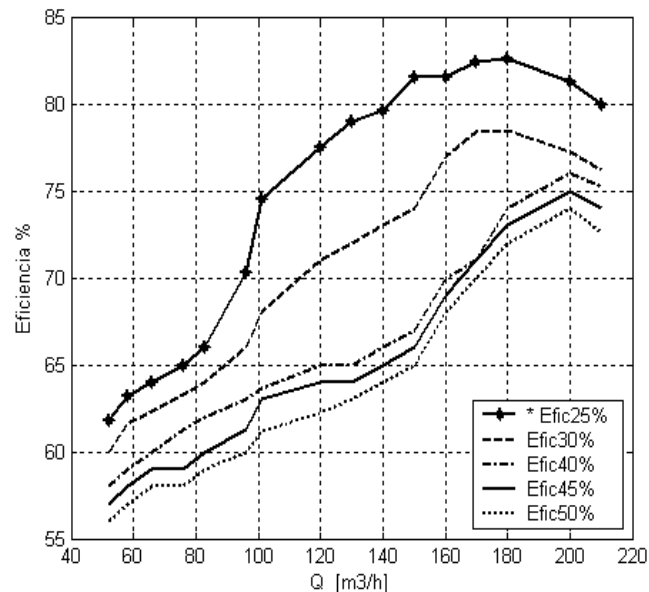


Figura 3.7 Eficiencias en la bomba centrífuga WARMAN a diferentes densidades de la pulpa cuando opera gobernada con el PLC (SIMATIC SU-95) ajustado por valores del diseño del controlador difuso.

Con la introducción del esquema de control difuso en el accionamiento, se adapta el trabajo del sistema hidráulico al transporte de la hidromezcla con velocidades más favorables de manera que transcurre el desplazamiento de la pulpa con menos pérdidas, y el control sigue el valor de velocidad más conveniente para mejorar la eficiencia del sistema.

3.5 Valoración económica, ecológica y social.

Se tiene un estudio económico, ecológico y social del sistema de accionamiento eléctrico de bombas de transporte de pulpa de colas lateríticas, con el objetivo de mostrar el impacto que puede dejar el uso del controlador difuso en este sistema, y para esto se cuantifican las pérdidas actuales que se tienen en el mismo y el costo que representa la implementación del esquema de control, su tiempo de amortización y la relación costo beneficio.

3.6 Conclusiones parciales

- Se obtuvo de forma experimental, que la eficiencia del motor de inducción con el uso de los comandos de control difuso se eleva en 8,34 %, mediante la disminución de sus pérdidas en el acero de la máquina.
- Usando los ajustes del control difuso, el subsistema hidráulico donde opera la bomba centrífuga tiene menos pérdidas, pudiendo alcanzar su eficiencia hasta un 81 %.

- Con la introducción del controlador difuso en el accionamiento eléctrico de la bomba centrífuga de hidrotransporte de pulpa laterítica se logra un efecto económico anual de unos 240 000 CUC pesos convertibles, por concepto de energía dejada de consumir en forma de pérdidas.

CONCLUSIONES GENERALES

En la presente investigación se llegaron a las siguientes conclusiones:

- La eficiencia del motor de inducción con el uso del esquema de control difuso, se mejora en un 8,34 %, en base el control de sus pérdidas, para las condiciones de explotación de las plantas minero metalúrgicas.
- Las variables principales que participan en la evaluación de la eficiencia del accionamiento del motor de inducción son: la potencia de entrada P_e , la frecuencia angular de rotación del rotor ω_r y la densidad de la pulpa laterítica ρ que transporta la bomba centrífuga.
- El controlador difuso diseñado, opera con dos bloques difusos en cascadas, usando arquitectura tipo Mamdani, teniendo dos variables de entradas y una de salida: $(P_e, \rho) \rightarrow i_{ds2}^*$ y $(\omega_r, i_{ds2}^*) \rightarrow i_{ds}^*$, cuyo dominio se estableció por el método de los clusters.
- El uso del esquema de control difuso permite un efecto económico anual de \$241 204 CUC pesos convertibles, por concepto de energía dejada de consumir en forma de pérdidas. Esta valoración económica, es partiendo de las pérdidas actuales del sistema, así como se estableció una evaluación del impacto ecológico y social.

RECOMENDACIONES

En la presente investigación se proponen las siguientes recomendaciones:

- Utilizar el software simulador del accionamiento eléctrico para bombas centrífugas, como herramienta supervisora del proceso de transporte de hidromezclas de pulpa laterítica.
- El esquema de control difuso desarrollado sirve como programa tutorial para la automatización del proceso de transporte de hidromezclas.