



INSTITUTO SUPERIOR MINERO METALÚRGICO DE MOA
"Dr. Antonio Núñez Jiménez"
FACULTAD DE METALURGIA ELECTROMECAÁNICA
DEPARTAMENTO DE ELÉCTRICA

TRABAJO DE DIPLOMA.

En opción al Título de Ingeniero Eléctrico

TÍTULO: Modelación de accionamientos de bandas transportadoras para evaluar eficiencia usando lógica difusa.

DIPLOMANTE: Javier Escobar Calzadilla.

TUTORES: Dr. Luis Rojas Purón

Dr. Roberto Sierra Pérez

MSc. Miguel Álvarez

Dpto. Ingeniería Eléctrica.

ISMM, Moa, Holguín

“ Curso, 2012-2013 Año 55 de la Revolución ”



Declaración de autoridad

Yo: Javier Escobar Calzadilla.

Autor de este trabajo de Diploma tutorado por el Dr. C. Luis Delfín Rojas Purón, el Dr. Roberto Sierra Pérez y el MSc. Miguel Álvarez, certifico la propiedad intelectual a favor del Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa “Dr. Antonio Núñez Jiménez”, el cual podrá hacer uso del mismo para fines docentes y educativos.

Javier Escobar Calzadilla
(Diplomante)

Dr. C. Luis Delfín Rojas Purón
(Tutor)

Dr. Roberto Sierra Pérez
(Tutor)

MSc. Miguel Álvarez
(Tutor)



Pensamiento

*“Los conceptos y principios fundamentales de la ciencia
son invenciones libres del espíritu humano”*

Albert Einstein



Dedicatoria

Dedico este trabajo:

A mi Mamá, a mi Papá, a mis Hermanas Dianelis Escobar y Yudhit, a mi sobrino.

A mis Familiares en general por haberme apoyado en cada momento de mi carrera y depositar toda la confianza, el amor y el cariño en Mí.

A Mi Tutores, por haberme ayudado dando el paso al frente para realizar este hermoso trabajo con su impresionante experiencia.

A mis amigos, que siempre confiaron en mí, y de los cuales recibí un apoyo infinito en los buenos y malos momentos.



Agradecimientos

Agradezco a la Revolución por darme la oportunidad de convertir un sueño hecho realidad, a Fidel y a Raúl Castro.

Agradezco a mi Tutores el Dr. Luis Delfín Rojas Purón, el Dr. Roberto Sierra Pérez, y al MSc. Miguel Álvarez por su ayuda incondicional para la creación de este trabajo.

Agradezco a mis padres y hermanas, por su sacrificio y el apoyo moral que me brindaron durante todos estos años.

A mis abuelos maternos y paternos, mis tíos, primos, y familia en general.

También debo mencionar personas que sin su ayuda no hubiese podido elaborar este trabajo, mis compañeros de estudios los cuales siempre me alentaron a seguir adelante.

A todos:

MUCHAS GRACIAS



Resumen

En esta tesis se desarrolla un modelo de un accionamiento eléctrico de bandas transportadoras, donde se utiliza un controlador difuso con arquitectura Mamdani para las condiciones de transporte de mineral laterítico en la empresa Cmdt. Ernesto Che Guevara de Moa.

Se plantea la modelación del accionamiento eléctrico usando el MATLAB, para evaluar la eficiencia del sistema bajo el efecto de un controlador difuso a diferentes estados de cargas mecánicas del transportador. Se tienen mediciones en tiempo real del accionamiento del transportador considerando variable el llenado de mineral en el mismo.

Summary

In this thesis a model of an electric working of transport bands is developed, where a diffuse controller is used with architecture Mamdani for the conditions of transport of mineral lateritic in the company Cmdt. Ernesto Che Guevara of Moa.

A thinks about the modelation of the electric working using the MATLAB, to evaluate the efficiency of the low system the effect from a diffuse controller to different states of mechanical loads of the transporter. Mensurations are had in real time of the working of the transporter considering variable the one filled of mineral in the same one.



Índice

<i>Declaración de autoridad</i>	I
<i>Pensamiento</i>	II
<i>Dedicatoria</i>	III
<i>Agradecimientos</i>	IV
Resumen	V
Summary	V
Índice	VI
Introducción General	1
Situación problemática	2
Hipótesis	2
Objetivo	2
Resultados esperados	3
Problema de la investigación	3
Campo de acción	3
CAPÍTULO I	4
Estudio precedentes sobre eficiencia en accionamientos de bandas transportadoras	4
1.1 Introducción	4
1.2 Trabajos precedentes	4
1.3 Caracterización del accionamiento	6
1.4 Modelo matemático de la banda	10
1.5 Flujo tecnológico del taller 01	13
1.6 Interfaces para evaluar eficiencia en variadores de velocidad	14
1.6.1 Inversores Sinusoidales de Tensión a PWM	15
1.6.2 Esquemas principales de moduladores a PWM	17
1.6.3 Algoritmos de control a PWM	18
1.7 Aspectos teóricos y uso de variadores de velocidad en nuestra instalación	25
1.7.1 Esquema de potencia. Circuito de mando	29
1.7.2 Ventajas de la utilización del variador de velocidad en el arranque de motores asíncronos	29
1.7.3 Inconvenientes de la utilización del variador de velocidad en el arranque de motores asíncronos	30



1.8 Conclusiones.....	30
CAPÍTULO II.....	31
Técnica de Lógica Fuzzy como agentes inteligentes.....	31
2.1 Introducción.....	31
2.2 Breve reseña sobre la lógica difusa.....	31
2.2.1 Conceptos y reglas básicas.....	34
2.2.2 Operadores básicos de la lógica difusa.....	35
2.3 El uso de modelos difusos.....	37
2.3.1 Lógica difusa en inteligencia artificial.....	38
2.4 Procedimientos de modelación difusa.....	39
2.5 Como diseñar un modelo difuso.....	41
2.6 Conclusiones.....	44
CAPÍTULO III.....	45
Modelación del sistema de accionamiento eléctrico de banda transportadora.....	45
3.1 Introducción.....	45
3.2 Descripción del modelo.....	45
3.3 El diseño del controlador difuso.....	46
3.4 Bloque del controlador difuso.....	47
3.5 Principio de trabajo del controlador difuso.....	48
3.5.1 Control de la eficiencia.....	50
3.5.2 Resultados de la simulación.....	53
3.6 Criterios de estabilidad del controlador difuso.....	60
3.7 Conclusiones.....	61
CAPÍTULO IV.....	62
Valoración técnico- económica del trabajo.....	62
4.1 Introducción.....	62
4.2 Periodo de recuperación simple (PRS).....	62
4.3 Cálculo de los costos de explotación.....	63
4.4 Gastos de inversiones.....	63
4.5 Cálculo del tiempo de amortización.....	64
4.6 Conclusiones.....	67
Conclusiones generales.....	68



Recomendaciones.....	69
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	70
ANEXOS.	72



Introducción General

La Lógica Difusa está tomando mucho auge en el mundo moderno para facilitar la solución de problemas prácticos en la ingeniería y en otros campos de estudio es, desde un punto de vista, un método de razonamiento estadístico que permite especificar los problemas de control del mundo real en términos probabilísticos, sin necesidad de recurrir a modelos matemáticos y con un nivel de abstracción mucho más elevado. La lógica difusa se adapta mejor al mundo real en el que vivimos, e incluso puede comprender y funcionar con nuestras expresiones, del tipo "hace mucho calor", "no es muy alto", "el ritmo del corazón está un poco acelerado", etc. La clave de esta adaptación al lenguaje, se basa en comprender los cuantificadores de nuestro lenguaje (en los ejemplos de arriba "mucho", "muy" y "un poco"). En la teoría de conjuntos difusos se definen también las operaciones de unión, intersección, diferencia, negación o complemento, y otras operaciones sobre conjuntos (ver también subconjunto difuso), en los que se basa esta lógica. Para cada conjunto difuso, existe asociada una función de pertenencia para sus elementos, que indican en qué medida el elemento forma parte de ese conjunto difuso. Las formas de las funciones de pertenencia más típicas son trapezoidales, lineales y curvas. Se basa en reglas heurísticas de la forma SI (antecedente) ENTONCES (consecuente), donde el antecedente y el consecuente son también conjuntos difusos, ya sea puros o resultado de operar con ellos. Sirvan como ejemplos de regla heurística para esta lógica (nótese la importancia de las palabras "muchísimo", "drásticamente", "un poco" y "levemente" para la lógica difusa):

- SI hace muchísimo calor ENTONCES aumentó drásticamente la temperatura.
- SI voy a llegar un poco tarde ENTONCES aumento levemente la velocidad.

Los métodos de inferencia para esta base de reglas deben ser simples, veloces y eficaces. Los resultados de dichos métodos son un área final, fruto de un conjunto de áreas solapadas entre sí (cada área es resultado de una regla de inferencia). Para escoger una salida concreta a partir de tanta premisa difusa, el método más usado es el del centroides, en el que la salida final será el centro de gravedad del área total resultante. Las reglas de las que dispone el motor de inferencia de un sistema difuso pueden ser formuladas por expertos, o bien aprendidas por el propio sistema, haciendo uso en este caso de redes neuronales para fortalecer las futuras tomas de decisiones. Los datos de entrada suelen ser recogidos por sensores, que miden las variables de entrada de un sistema. El motor de inferencias se basa en chips difusos, que están aumentando exponencialmente su capacidad de procesamiento de reglas año a año. Lo que se persigue con este trabajo investigativo es implementar un sistema inteligente para la evaluación de la eficiencia usando técnica de lógica difusa en accionamientos de bandas transportadoras.



Situación problemática

La necesidad de tener un software para evaluar los indicadores energéticos del accionamiento de bandas transportadoras de mineral laterítico de uso industrial y permita ajustar sus parámetros de operación, porque debido a esto ocurren:

- Elevados costos de explotación del accionamiento eléctrico.
- Aparición de pérdidas adicionales en los componentes del sistema de accionamiento de las bandas transportadoras y los accionamientos auxiliares.

Hipótesis

Con la identificación de las variables que determinan el funcionamiento eficiente del accionamiento para el transporte del mineral laterítico para las condiciones de explotación industrial en la empresa Cmdt. Ernesto Che Guevara, es posible implementar un procedimiento inteligente para la evaluación de los indicadores energéticos en el sistema.

Objetivo

Obtener la simulación del modelo del accionamiento de bandas transportadoras para el llenado variable de las bandas en las condiciones de explotación en el taller 01 de la empresa Cmdt. Ernesto Che Guevara.



Resultados esperados

- Elaborar la matriz de variables que participan en la explotación del accionamiento eléctrico de bandas transportadoras de mineral laterítico.
- Describir los eventos más frecuentes que pueden ocurrir durante el trabajo típico del accionamiento.
- Ofrecer la simulación del modelo operando con controlador difuso.

Problema de la investigación.

- Cómo mejorar la eficiencia en los accionamientos de bandas transportadoras cuando operan con alimentación de mineral incompleto y variable.

Campo de acción.

- El accionamiento eléctrico de bandas transportadoras de minerales lateríticos.



CAPÍTULO I

Estudio precedentes sobre eficiencia en accionamientos de bandas transportadoras.

1.1 Introducción.

En este trabajo de diploma se quiere llevar a cabo la modelación de accionamientos de bandas transportadoras usando la lógica difusa, con lo cual se logrará aumentar la eficiencia del accionamiento y el proceso que este realiza. El marco teórico-metodológico como parte importante en la caracterización del objeto de estudio permite detectar de forma preliminar las diferentes características e interacciones que existen entre los múltiples elementos vinculados en la investigación a realizar. 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 banda transportadora de mineral laterítico.

1.2 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 apreciable reserva de aspectos investigativos en las partes de los mecanismos de producción (figura 1), las cuales deben ser más adecuadamente estudiadas desde su proceso.

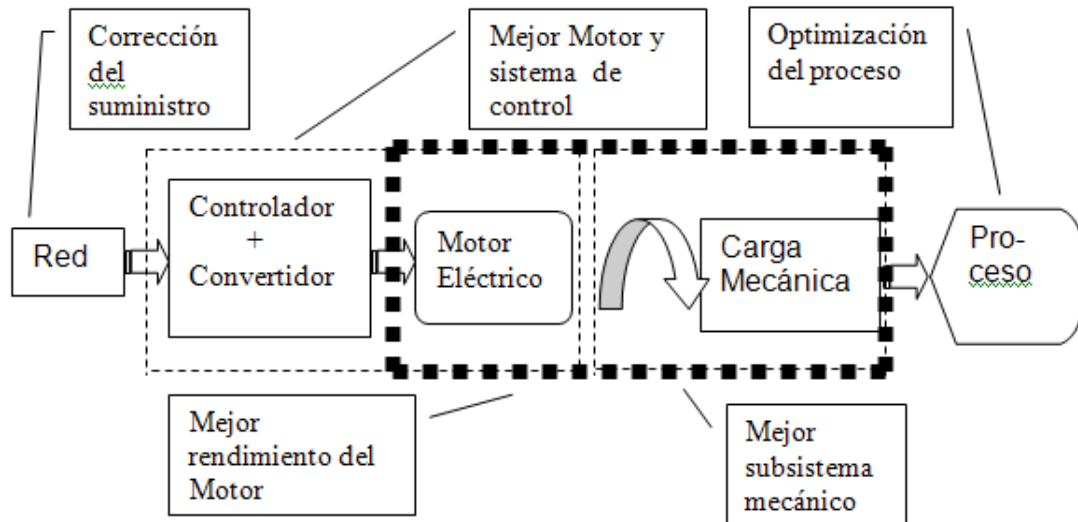


Figura 1. Sistema de accionamiento eléctrico y oportunidades de mejoramiento de sus eficiencias.

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, usualmente los análisis parten de un sistema trifásico estable simétrico, con tensiones y corrientes sinusoidales con determinado contenido de armónicos de hasta de un quinto orden. [1][Abrahamsen, 2000].

Subsistema: Controlador + Convertidor + Motor Eléctrico, cuyo estudios basan sus resultados en la simulación de modelos matemáticos linealizados, pero que en ocasiones presentan serias restricciones en el objeto del convertidor, y funcionan bajo condiciones iniciales de trabajo limitadas en el objeto Motor; y es por esto que el empleo de técnicas difusas facilitan el estudio con potencialidades de observar el



comportamiento del sistema en base a la adecuada identificación del proceso. Como se conoce, los motores de inducción tienen una elevada eficiencia cuando operan con sus cargas y torques nominales [2][Bodson, 1992]. Así mismo operando con cargas ligeras, las pérdidas del hierro se incrementan dramáticamente, reduciendo considerablemente la eficiencia [11][Kusko y Galler, 1983]. Este hecho lo explicamos más adelante, y nos parece bueno utilizarlo en nuestro estudio porque es una forma evidente 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.

Uno de los aportes desde el punto de vista práctico, alcanzado por los investigadores anteriores, es la obtención experimental en los motores de inducción de la curva U/f que permite aproximarse a los estados de carga del accionamiento. Esto parte de la idea de que en muchos complejos industriales, los motores de inducción son controlados mediante convertidores de frecuencia con la técnica de control U/f , la cual se basa en el mantenimiento de una relación Volts-Hertz (U/f) apropiada para la demanda de par exigido por la carga; estos accionamientos tienen flexibilidad de configuración para adaptarse a las necesidades de la carga pudiendo el usuario especificar la curva U/f deseada. Sin embargo, la mayoría de las veces no se conocen los criterios prácticos de ajuste de la curva U/f , lo que no permite explotar al máximo las posibilidades del accionamiento.

1.3 Caracterización del accionamiento.

El estudio consiste en utilizar el modelo del motor de inducción (MI) y las relaciones más relevantes en el funcionamiento de la banda transportadora (BT), 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 banda en su transporte eficiente de mineral laterítico. La transferencia de potencia electromagnética en mecánica rotacional está asociada con las componentes activas y reactivas de la potencia desarrollada por el motor de inducción MI.



La componente activa de la potencia eléctrica que se convierte en trabajo útil (dado en W o kW) está determinada por:

$$P_{MI} = \sqrt{3}.U.I \cos \varphi \quad (1.1)$$

Donde:

U es la tensión de alimentación de línea del motor de inducción, [V]

I es la corriente de alimentación de línea del motor de inducción, [A]

Cos φ es el factor de potencia del motor de inducción.

φ es el ángulo de desfase entre la tensión y la corriente, [°]

Y la potencia reactiva (dada en Var o kVAr) es la encargada de intercambiar la energía electromagnética que se produce en la máquina de inducción con la fuente: el inversor sinusoidal de tensión por modulación de anchos de pulsos (VSI a PWM: siglas en inglés) y crea el campo magnético rotacional que gira de acuerdo a la frecuencia de la corriente de alimentación del motor (MI) y viene dada como:

$$Q_{MI} = \sqrt{3}.U.I.\text{sen}\varphi \quad (1.2)$$

Y partiendo que 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 :

$$\eta_{MI} = \frac{P_s}{P_e} = \frac{P_s}{P_s + \Delta p} = \frac{P_e - \Delta p}{P_e} \quad (1.3)$$

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:



$$\Delta p = \Delta p_{cus} + \Delta p_{cur} + \Delta p_{ac} + \Delta p_{mec} + \Delta p_{ad} \quad (1.4)$$

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].

La potencia electromagnética P_{em} y también llamada potencia en el entrehierro PAG es la encargada de enlazar, la potencia eléctrica de entrada del motor P_e con la potencia mecánica rotacional de salida P_s que se manifiesta en el eje de la bomba centrífuga, teniendo en cuenta las pérdidas Δp que va teniendo a través de las principales partes de la máquina eléctrica.

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 [4][Chapman, 2003], tal como se indica en la expresión (1.5):

$$M_{em} = \frac{P_{em}}{\omega_s} = \frac{P_{conv}}{\omega_r} = \frac{P_{AG}}{\omega_s} \quad (1.5)$$

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]

PAG – es la potencia del entrehierro del motor, [kW]



La potencia del entrehierro PAG es la que se transfiere del circuito del estator al circuito del rotor y es igual a la potencia que se disipa en la componente R_r/s en el conocido circuito equivalente por fase del motor de inducción (figura 1.5).

$$P_{AG} = I_r^2 \cdot \frac{R_r}{s} \quad (1.6)$$

Donde:

s – es el deslizamiento del motor de inducción, [%].

I_r – es la corriente del rotor del motor de inducción, [A].

R_r – es la resistencia óhmica de los devanados del rotor, [ohm]

Y la potencia del entrehierro total será:

$$P_{AG} = 3 \cdot I_r^2 \cdot \frac{R_r}{s} \quad (1.7)$$

Que para regiones de bajos deslizamientos, esta potencia del entrehierro puede ser escrita en función de la tensión aplicada en los terminales del motor como:

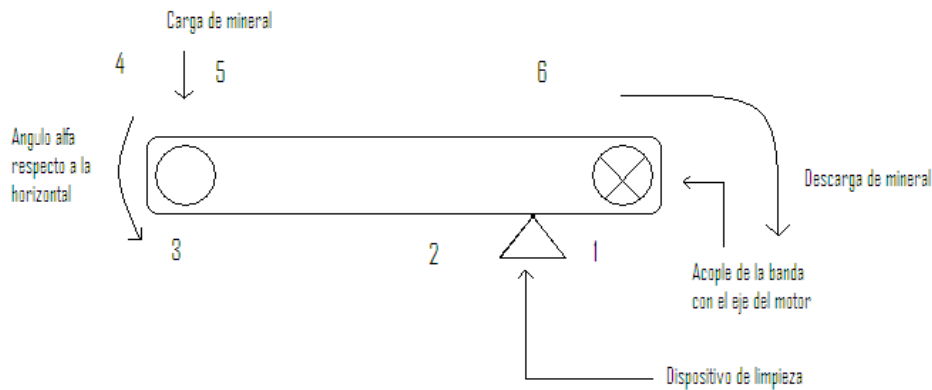
$$P_{AG} = 3 \cdot s \cdot \frac{U^2}{R_r} \quad (1.8)$$

Y el par producido por el motor se convierte en:

$$M_{em} = 3 \cdot s \cdot \frac{U^2}{R_r \cdot \omega_s} = 3 \cdot \frac{I_r^2 \cdot R_r}{\omega_s} \cdot \left(\frac{1-s}{s} \right) \quad (1.9)$$



1.4 Modelo matemático de la banda.



$$P = \frac{W_0 + v}{1000 \cdot \eta_{total}} \cdot K_r \quad (1.10)$$

Donde:

v- Es la velocidad de la banda. (m/s)

W₀-Es la resistencia total en los tramos de la banda.

η_{total} -Es el rendimiento mecánico de la banda (0.91 a 0.92).

K_r-coeficiente (1.10 - 1.25)

$$W_0 = S_6 - S_1 + 0.05 S_6 + S_1 \quad (1.11)$$

$$S_1 = \frac{K_r W_{1-2} + W_{2-3} + W_{4-5} + W_{5-6}}{\epsilon^{\mu\alpha} - K_r} \quad (1.12)$$

Donde:

W (1-2) Dispositivo de limpieza.

W (2-3) Rama vacía.

W (4-5) Dispositivo de carga.

W (5-6) Rama con carga.

$$\epsilon^{\mu\alpha} = 1.45$$



$$S_6 = \epsilon^{\mu\alpha} \cdot S_1 \quad (1.13)$$

$$P = \frac{36661.3 + 42.15Q \cdot 0.46 \cdot 1.25}{1000 \cdot 0.93} \quad (1.14)$$

Q -Es la productividad de la banda. (200-1800 Ton/h)

$$P = 22.67 + 0.03 \cdot Q \quad (1.15)$$

$$P = M \cdot \omega \quad (1.16)$$

Donde:

M-Es el momento del motor.

ω -Es la velocidad angular. ($\omega = n \frac{\Pi}{30}$)

$$M = \frac{22.67 + 0.03 \cdot Q}{\omega} \quad (1.17)$$

Resistencias en los tramos.

1. Dispositivo de limpieza (tramo1-2).

$$W_{1-2} = q_r \cdot B \quad (1.18)$$

$$q_r = \frac{14 \cdot G_r}{l_r} \quad (1.19)$$

Donde:

G_r -Es el peso de un rodillo de la rama vacía. (Kg)

l_r -Es la longitud entre rodillos. (m)

$$B = 4 \cdot v_c \quad (1.20)$$

$$v_c = 2 \cdot v \quad (1.21)$$

Donde:



V-Es la velocidad de la banda (m/s).

2. Rama vacía. (Tramo 2-3)

$$W_{2-3} = q_b + q_r \cdot \omega \cdot L \quad (1.22)$$

Donde:

q_b - Peso de un metro de banda (kg).

L- Longitud de la banda (m).

ω - Coeficiente de rozamiento (1.03 - 1.05).

3. Rama con carga (tramo 5-6).

$$W_{5-6} = q_c + q_b + q_r \quad (1.23)$$

$$q_c = \frac{Q}{3.6 \cdot v} \cdot g \quad (1.24)$$

Donde:

q_c -Peso lineal de la carga. (N/m)

Q-Productividad (Ton/h).

g-Aceleración de la gravedad (9.8 m s^{-2}).

4. Dispositivo de carga (tramo 4-5).

$$W_{4-5} = \frac{C \cdot q_c \cdot v^2}{g} \quad (1.25)$$

Sustituyendo (1.24) en (1.25) obtenemos:

$$W_{4-5} = C \cdot \frac{Q}{3.6} \cdot v \quad (1.26)$$

Donde:

C- Coeficiente (1.06 - 1.08).



Tabla 1. Características de la banda transportadora.

Longitud(m)	30.8
Ancho (mm)	1400
Productividad (Ton/h)	200-1800
Velocidad (m/s)	0.32-0.46
Numero de rodillos de apoyo	53
Numero de rodillos del ramal vacío	14
Peso de un rodillo de la rama vacía	40.9
Longitud entre rodillo (m)	2.2
Peso de un metro de banda (kg)	20

1.5 Flujo tecnológico del taller 01.

En dependencia de los resultados de los con tenidos de Ni, Fe y Co se determinara por el departamento de Geología la transportación del mineral, a los depósitos o se alimentara directamente al proceso a través de la planta de recepción y trituración del mineral. El mineral es descargado en las tolvas A o B y en la parte superior tiene una criba fija que permite el rechazo de las partículas mayores de 450 mm, realizándose esta operación a través de una grúa auxiliar. Las partículas menores de 450 mm pasan a los alimentadores de esteras, luego hasta la zaranda en las cuales las partículas mayores de 135 mm se rechazan cayendo a través de los transportadores 5A y 5B a un área, donde es transportado este material para las escombreras o se les da algunas utilidades dentro de las diferentes labores mineras. El resto del mineral pasa a través de la criba, cayendo por gravedad a los transportadores 1A y 1B.



Después de los transportadores 1A y 1B el mineral se traslada a través de los transportadores 2, 3,4A y 4B, hasta ser depositados en las galerías a través de los transportadores 14 y 15 pasan a la planta de preparación de mineral. El mineral depositado en la galería es remontado con las grúas Gantry al depósito o alimentado directamente a la planta de preparación de mineral. Acorde a la preparación del personal de operación la dirección técnica de la producción y el control geológico-topográfico dependerá la extracción racional de los recursos de mineral útil y la eficiencia del proceso metalúrgico.

Las actividades de apoyo más importante lo constituyen la construcción y mantenimiento del camino, lo cual permite el acceso de los equipos de cargas y transporte del mineral a los diferentes frentes de minería y dispositivos, la colocación de las líneas eléctricas, el drenaje de los caminos, frentes de trabajo y regado de agua en los caminos para evitar el polvo.

1.6 Interfaces para evaluar eficiencia en variadores de velocidad.

Dentro del desarrollo del Control Automatizado, uno de los principios básicos de la automatización de sistemas y procesos radica en la comunicación que debe existir entre el hombre y una máquina, un equipo o una computadora, esta interface hombre – máquina forma una parte importante e integral de los procesos modernos industriales.

Para ello fueron desarrollándose diferentes técnicas para la interconexión de equipos y para el control de procesos mediante buses, de modo que la forma en que el usuario se comunica con una aplicación para solicitar los recursos del sistema constituye la interfaz del mismo.

La interfaz en los procesos de automatización y control de sistemas es particularmente importante para establecer una comunicación eficiente y lo más cómoda posible entre el usuario de la computadora y la aplicación o proceso, permitiendo de manera simple la toma de información del sistema e interactuar con el mismo.



La comunicación hombre - máquina se establece a través de menús, ventanas, teclado, ratón, y speaker para algunos sonidos que la computadora emite, en general, todos aquellos canales por los cuales se permite la comunicación entre ellos (hombre – computadora), esta comunicación más comodidad y eficiencia.

1.6.1 Inversores Sinusoidales de Tensión a PWM.

Los inversores se emplean con regularidad en variadores de velocidad de Corriente Alterna como fuentes ininterrumpibles (UPS) y otras aplicaciones, de las cuales los variadores de velocidad continúan siendo la aplicación de mayor crecimiento y desarrollo de los inversores. Un inversor utilizado con este propósito debe tener la posibilidad de variar a la vez, el cuándo se mantiene una relación aproximadamente constante del voltaje y frecuencia de la salida para evitar la saturación magnética en el motor.

Como se mencionó voltaje y la frecuencia de acuerdo con la velocidad u otro requerimiento del control. Esto se requiere anteriormente, los inversores de fuente de voltaje son clasificados, generalmente, en dos tipos: Modulación por Amplitud de Pulso (PAM) y Modulación por Ancho de Pulso (PWM). Estos inversores se desarrollaron a principios de los 60 cuando se introdujeron las técnicas de conmutación forzadas, como los esquemas de conmutación de McMurray-Bedford.

Los inversores de fuente de voltaje PAM, normalmente utilizados en aplicaciones industriales de baja y media potencia, han sido totalmente reemplazados por los inversores PWM. El propósito de la modulación PWM es generar una onda de salida de la magnitud y frecuencia deseada, con una composición de pulsos de ancho variable. En las últimas décadas han sido propuestas varias estrategias de conmutación PWM.

Primeramente, todas las estrategias de conmutación estuvieron basadas en técnicas de implementación analógicas. Estas técnicas, gradualmente, han sido sustituidas por técnicas digitales. Actualmente la mayoría de las técnicas de conmutación PWM están basadas en esquemas de control implementados con microprocesadores.



El control y el modelado de los accionamientos de corriente alterna son muchos más complejos que aquellos de corriente directa. Dentro de las máquinas de corriente alterna, los motores de inducción con rotor tipo de jaula de ardillas son el caballo de hierro de la industria debido a su bajo costo y a otras características enumeradas previamente. Al ser operado directamente desde las líneas de voltaje (a 60 Hz de entrada con un voltaje esencialmente constantes), los motores de inducción opera a una velocidad casi constante. Sin embargo, con el uso de la electrónica de potencia es posible variar la velocidad del motor.

Entonces, es necesario tener convertidores capaces de proporcionar frecuencia variable y una fuente de poder con el menor contenido de armónico posible. Aún más dificultades se encuentran al procesar las señales retroalimentadas en la presencia de armónicos. Normalmente se utilizan convertidores módulo dos por ancho de pulso (PWM, Pulse Width Modulation) alimentados por voltaje con la finalidad de resolver este problema. Existen numerosas técnicas que han sido desarrolladas en los últimos años. A pesar de que estas soluciones proporcionan un buen desempeño, aún existe presencia de errores debido a estados transitorios, a la estimación de variables de estado y rizado debido a armónicos.

Sin embargo, la existencia de cada vez más poderosos Procesadores Digitales de Señales (DSP, Digital Signal Processor) para el control de accionamientos eléctricos proporciona grandes oportunidades para mejorar la modulación mediante algoritmos un poco más complejos, como la modulación PWM por vectores espaciales (SV- PWM), Space Vector Pulse width Modulation). De hecho, este tipo de modulación tiene ciertas ventajas sobre otros métodos como un menor contenido de armónicos en las señales de corriente y voltaje y un índice de modulación alto.

A continuación se presenta un tipo en específico de convertidores fuente de voltaje, el Inversor Fuente de Voltaje (VSI, Voltage Source Inverter), y la estrategia de modulación utilizada en el presente proyecto de investigación.



1.6.2 Esquemas principales de moduladores a PWM.

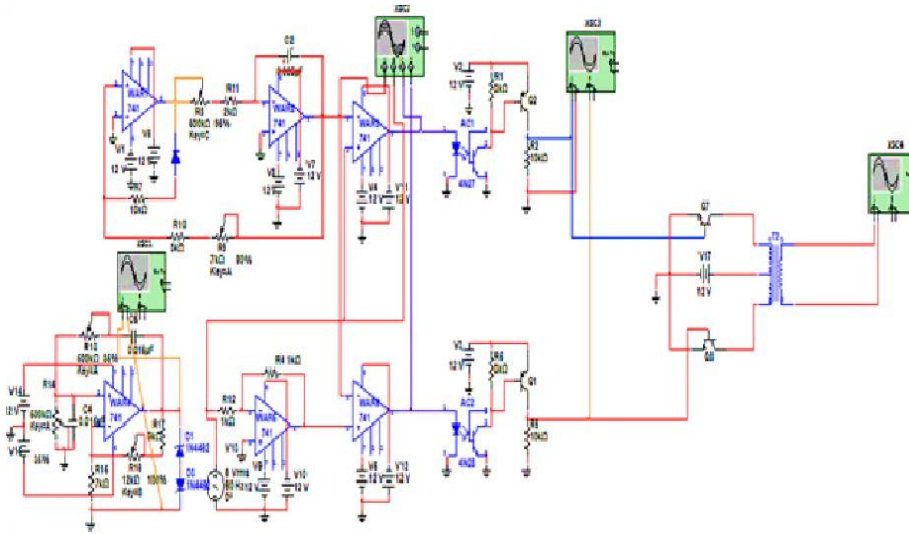


Figura2 Esquemas principales de moduladores a PWM.

En muchas aplicaciones industriales, a menudo es necesario el control a la salida de los inversores por lo cual se han desarrollado varias técnicas de modulación con el objetivo de:

Hacer frente a las variaciones de entrada de corriente directa, la regulación de voltaje de los inversores y los requisitos de control constante de voltaje y frecuencia. Los inversores más avanzados utilizan la modulación por ancho de pulso (PWM o Pulse Width Modulation) con una frecuencia portadora mucho más alta para aproximarse más a la onda seno o modulación por vectores del espacio mejorando la distorsión armónica de salida. También se puede pre distorsionar la onda para mejorar el factor de potencia ($\cos \Phi$).

La idea básica es comparar una tensión de referencia sinusoidal de baja frecuencia (que sea imagen de la tensión de salida buscada) con una señal triangular simétrica de alta frecuencia de conmutación. La frecuencia de la onda triangular (llamada portadora) debe ser, como mínimo 20 veces superior a la máxima frecuencia de la onda de referencia, para que se obtenga una reproducción aceptable de la forma de onda sobre una carga, después de efectuado el filtraje. La señal resultante de dicha comparación generará la lógica para abrir y cerrar los semiconductores de potencia.



1.6.3 Algoritmos de control a PWM.

En este trabajo se utiliza el (VSI- PWM), el funcionamiento PWM senoidal, como se dijo anteriormente, el objetivo es el de dar forma y controlar los voltajes de salida trifásicos balanceados para la salida es necesario utilizar una forma de onda triangular, V_{tri} , que es comparada contra tres voltajes senoidales de control desfasados 120° entre sí, como se muestra en la figura 3.

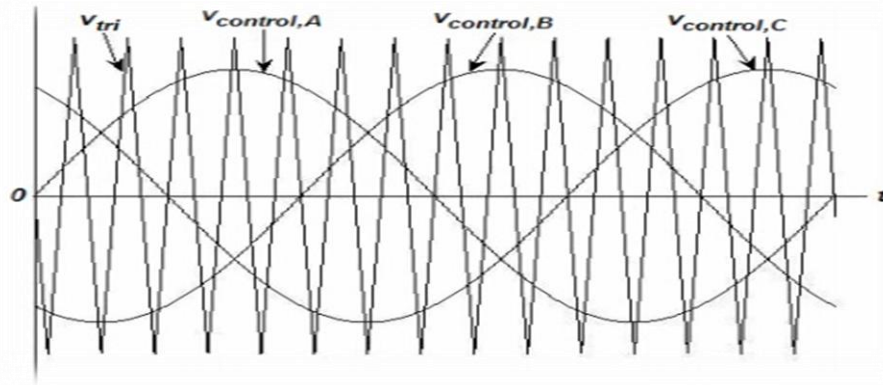


Figura 3 PWM Senoidal: forma de onda de señales de control y portadora.

La frecuencia de la señal triangular portadora, F_s , establece la frecuencia de conmutación del inversor y es por lo general constante junto con su amplitud. Las señales de control, $V_{control}$, son usadas para modular el ciclo de trabajo para los inversores y tienen frecuencia F_f , la cual es la frecuencia fundamental deseada del voltaje de salida del inversor. Obviamente, el voltaje de salida no será una senoidal perfecta y poseerá componentes de voltajes a frecuencias de armónicas de f_r .

El índice de modulación de amplitud es definido como

$$Ma = \frac{V_{control}}{V_{tri}} \quad (1.27)$$

Donde $V_{control}$ y V_{tri} son las amplitudes pico de la señal de control y de la señal portadora, respectivamente. Asimismo, el índice de modulación de frecuencia es definido como



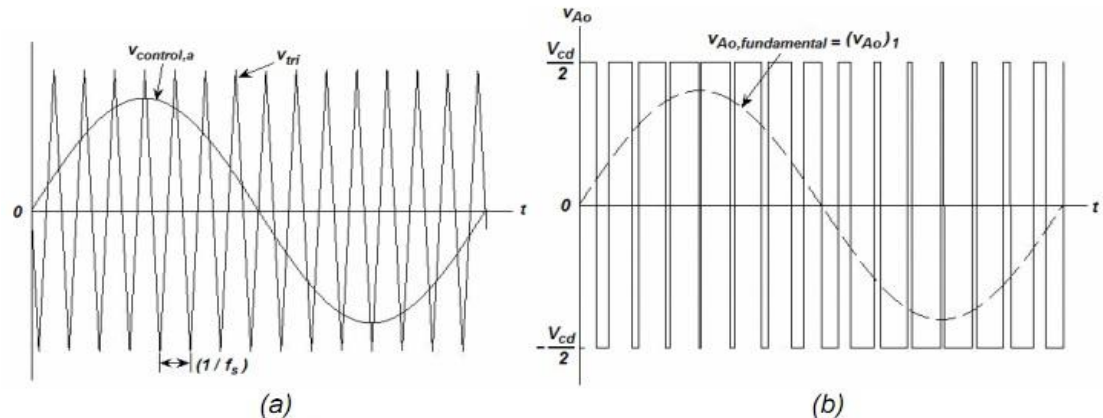
$$M_f = \frac{f_s}{f_1} \quad (1.28)$$

Del inversor en la figura 2, considerándose únicamente la rama de la fase a. Los interruptores S_a y S'_a son controlados al comparar las señales $V_{control}$ y V_{tri} . Los siguientes voltajes de salida resultan (independientemente de la corriente de salida)

$$V_{control, a} > V_{tri}, \quad S_a \text{ ON}, \quad V_{A0} = \frac{1}{2} V_{cd} \quad (1.29)$$

$$V_{control, a} < V_{tri}, \quad S'_a \text{ ON}, \quad V_{A0} = -\frac{1}{2} V_{cd} \quad (1.30)$$

El voltaje de salida V_{A0} fluctúa entre dos valores dado que se consideran interruptores ideales, como se dijo previamente (es decir, nunca están apagados simultáneamente). En la figura 3 se ilustran las formas de ondas características de la modulación para una $M_f = 15$ y $M_a = 0.8$. En la figura 4(a) se muestra la señal de control senoidal de la fase a y la portadora triangular. Asimismo en la figura 4 (B) se observan la señal de voltaje de salida V_{A0} y su componente de frecuencia fundamental. El espectro armónico de v_{Ac} se muestra en la figura 4 (c), donde los voltajes de armónicos normalizados $(V_{A0})_h / (0.5 V_{cd})$ que tienen amplitud significativa son graficados.



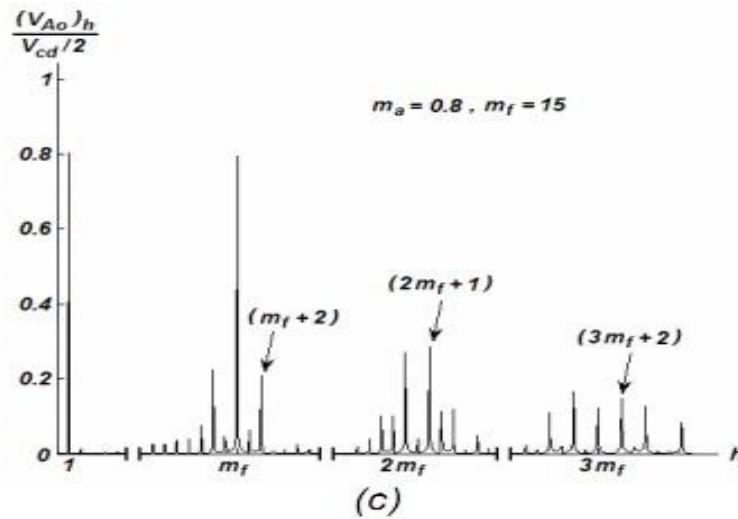


Figura4. Modulación Ancho de Pulso (PWM): (a) señal portadora triangular y de control de la fase a; (b) componente fundamental y voltaje de salida; (c) espectro armónico de la señal de salida.

De la figura 4 se pueden observar algunas características importantes:

1. La amplitud pico de la componente de frecuencia fundamental (V_{A0}), es m_a veces $0.5 V_{cd}$. Esto puede explicarse considerando una $V_{control}$ constante durante cada período de conmutación como se muestra en la figura 5(a). Lo anterior resulta en la forma de onda V_{ac} .
2. El voltaje de salida promedio durante cada periodo de conmutación como se muestra en la figura 5(a). Lo anterior resulta en la forma de onda V_{ac} .
3. El voltaje de salida promedio durante un período de conmutación V_{ac} depende de la razón de $V_{control}$ a V_{tri} para un V_{cd} dado, o bien

$$V_{A0} = \frac{V_{control} V_{cd}}{V_{tri} \cdot 2} \quad V_{control} \leq V_{tri} \quad (1.31)$$

1. Si $V_{control}$ varía muy poco durante el período de tiempo de conmutación, es decir, que m_f es grande se puede considerar lo anterior, como se muestra en la figura 5 (b).

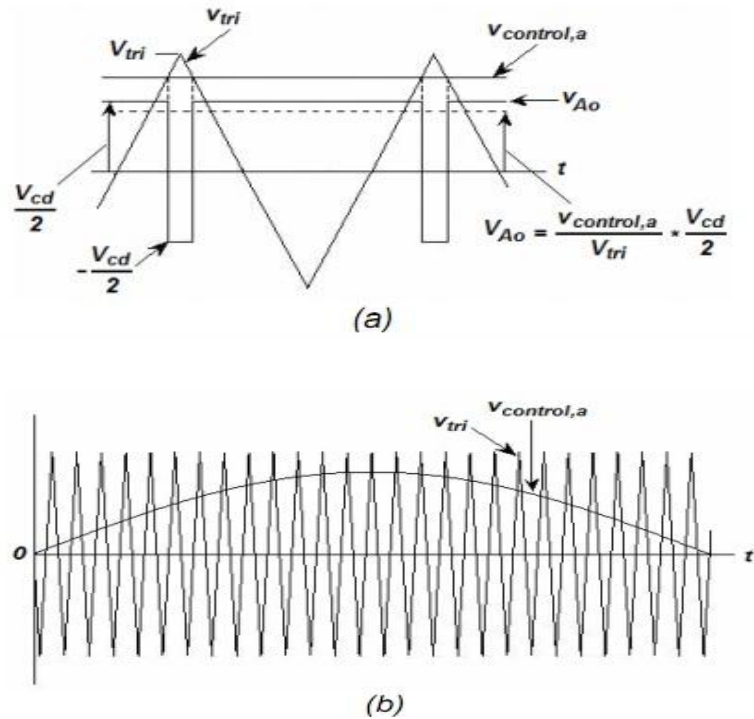


Figura 5. PWM Senoidal: señal de control constante en un período de tiempo de conmutación; (b) señal portadora triangular y de control de la fase a.

De hecho, $V_{control}$ se escoge senoidal para proporcionar una salida de voltaje senoidal con menos armónicos. Considerándose que el voltaje de control varía senoidalmente a la frecuencia $f_1 = \omega \cdot 1 / 2\pi$, la cual es la frecuencia deseada (fundamental) a la salida del inversor.

El hecho de que la componente de frecuencia fundamental V_{A0} varía senoidalmente y en fase con $V_{control}$ como función de tiempo, se obtiene que

$$\begin{aligned}
 (v_{A0})_1 &= \frac{V_{control}}{V_{tri}} \sin \omega_1 t \frac{V_{cd}}{2} \\
 &= m_a \sin \omega_1 t \frac{V_{cd}}{2} \quad \text{para } m_a \leq 1.0 \\
 (V_{A0})_1 &= m_a \frac{V_{cd}}{2} \quad \text{para } m_a \leq 1.0
 \end{aligned}
 \tag{1.32}$$



1. Los armónicos a la salida del inversor aparecen como bandas laterales centradas en la frecuencia de conmutación y sus múltiplos (alrededor de los armónicos m_f , $2m_f$ y así en adelante) es útil observar que el voltaje de fase está dado por

$$v_{an} = v_{a0} + \frac{1}{2}V_{cd} \quad (1.33)$$

Por lo tanto, los componentes armónicos de (V_{an}) y (V_{a0})

2. El armónico m_f es un entero impar. El escogerlo de esta forma resulta una simetría impar y de media onda. De esta forma los armónicos pares desaparecen de la forma de onda V_{A0} .

Si se hacen las consideraciones anteriores a las otras dos fases se tienen el esquema completo para el inversor.

Como puede observarse el esquema en la figura 5 (a), existe una cantidad idéntica de componente promedio de corriente directa presentes en los voltajes de salida V_{an} y V_{bn} , los cuales son medidos al bus negativo de corriente directa. Estos componentes se cancelan en los voltajes de línea a línea, como se muestra en la figura 5(B).

En los inversores trifásicos sólo los armónicos de los voltajes de línea a línea son de interés. Los armónicos a la salida de cualquiera de las ramas del inversor, por ejemplo, V_{an} en la figura 6(a) son idénticos a los armónicos de V_{A0} en la figura 4.

Considerando el armónico de m_f (lo mismo se aplica para los múltiplos impares), la diferencia de fase entre el m_f armónico en V_{an} y V_{bn} es $(120m_f)^\circ$. Esta diferencia de fase será cero (múltiplo de 360) si m_f es impar y múltiplo de 3. Como consecuencia, el armónico en m_f se suprime del voltaje de la línea V_{AB} . El mismo argumento se aplica en la supresión de armónicos en los múltiplos impares de m_f si m_f es un múltiplo impar de 3 (de esta forma se eliminan los armónicos pares). De esta forma, algunos armónicos dominantes considerando solo una fase pueden eliminarse del voltaje línea a línea del inversor trifásico, como se muestra en la figura 6(c).

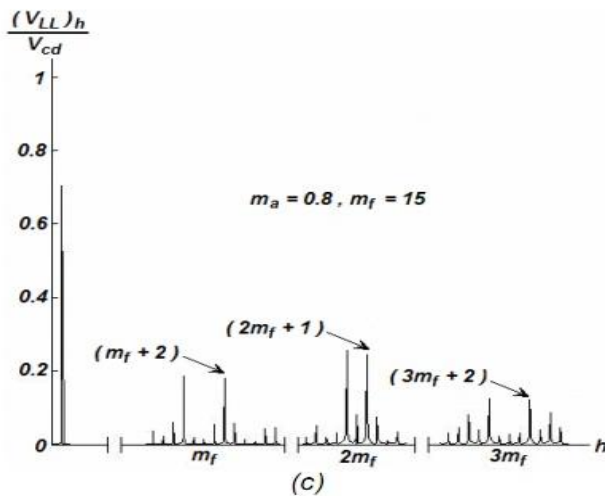
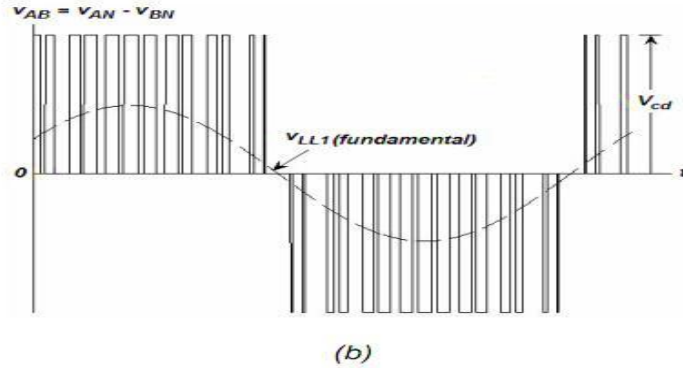
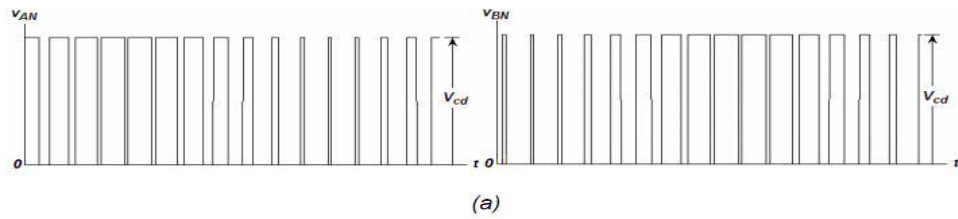


Figura 6 Formas de onda del PWM senoidal 3- (a) voltajes de fase de salida; (b) voltajes de línea a línea de salida y componente fundamental; (c) espectro armónico

Para el PWM sinodal se debe considerar lo siguiente:

1. Para valores pequeños de m_f , para armónicos pares, debe utilizarse un PWM sincronizado y m_f debe ser impar. Si m_f es múltiplo de 3 se cancelan los armónicos más dominantes en el voltaje de línea a línea.



2. Para valores grandes de m_f , las amplitudes de los subarmónicos debidos a un PWM no sincronizados son pequeñas. Pude ser usado cuando la frecuencia de la señal triangular es constante y la frecuencia de $V_{control}$ varía, resultando en valores no enteros de m_f . Sin embargo el inversor acciona a un motor de corriente alterna, los subarmónicos cercanos a frecuencia cero, a pesar de ser pequeños en amplitud, resultan corrientes de una amplitud grande indeseables.
3. Durante la sobremodulación, independientemente del valor de m_f , la condición 1 debe ser observada.

La selección de la frecuencia de conmutación f_s y el índice de modulación de frecuencia m_f son de gran importancia. Debido a la relativa facilidad para filtrar voltajes armónicos a alta frecuencia, es deseable utilizar una frecuencia de conmutación lo más alta posible. Sin embargo existe una desventaja; las pérdidas en los interruptores del inversor se incrementan proporcionalmente con la frecuencia de conmutación f_s . Por lo tanto, dicha frecuencia de se selecciona en muchas ocasiones mayor a 20 KHz para que sea superior al rango audible. En aplicaciones como la del motor de inducción (50 – 60 Hz) donde la frecuencia fundamental a la salida del inversor puede ser requerida tan alta como 200 Hz, m_f puede ser 9 o menor para una f_s a 2 KHz. Sin embargo, m_f será mayor a 100 para frecuencias de conmutación mayores a 20 KHz.

Asimismo, si los valores de control pico son mayores que el valor pico de la señal portadora triangular (caso de sobremodulación), la magnitud del voltaje fundamental no se incrementa proporcionalmente con m_a . en la figura 6 se muestra el valor rms del voltaje fundamental de línea a línea V_{LL1} como función m_s . Para valores muy altos de m_s el PWM degenera a la operación en onda cuadrada del inversor, el cual resulta un máximo valor de V_{LL1} igual a $0.78 V_{cd}$. En la región de sobre- modulación existen más armónicos centrados alrededor de las frecuencias de los armónicos m_f y sus múltiplos, pero los dominantes no tienen una amplitud tan grande como en la modulación lineal. Por lo tanto, las pérdidas en la carga debido a frecuencias armónicas no son tan altas.



1.7 Aspectos teóricos y uso de variadores de velocidad en nuestra instalación.

Gran parte de los equipos utilizados en la industria moderna funcionan a velocidades variables, como es el caso del arranque y frenado de los transportadores y la regulación de la productividad en los transportadores. El estudio para cada caso particular tiene una gran importancia práctica, para la elección correcta de las características de los motores y variadores a instalar. La regulación de velocidad puede realizarse por métodos mecánicos, como poleas o engranajes, o por medios eléctricos. La máquina de inducción alimentada con corriente C.A., especialmente la que utiliza un rotor en jaula de ardilla, es el motor eléctrico utilizado para el accionamiento de estos sistemas de transportadores. Pero no basta conectar un motor a la red para utilizarlo correctamente, sino que existen diversos elementos que contribuyen a garantizar un funcionamiento seguro. En la fase de arranque el par debe ser el necesario para mover la carga con una aceleración adecuada hasta que se alcanza la velocidad de funcionamiento en régimen permanente, procurando que no aparezcan problemas eléctricos o mecánicos capaces de perjudicar al motor, a la instalación eléctrica o a los elementos que hay que mover, como es, la banda. La velocidad del motor asíncrono depende de la forma constructiva del motor y de la frecuencia de alimentación. El método más eficiente de controlar la velocidad de un motor eléctrico es por medio de un variador electrónico de frecuencia. No se requieren motores especiales, son mucho más eficientes y tienen precios cada vez más competitivos. El variador de frecuencia regula la frecuencia del voltaje aplicado al motor, logrando modificar su velocidad. Sin embargo, simultáneamente con el cambio de frecuencia, debe variarse el voltaje aplicado al motor para evitar la saturación del flujo magnético con una elevación de la corriente que dañaría el motor. Los variadores usados en nuestra instalación son de la serie ALTIVAR 71 HU40M3 Es uno de los variadores que existen el mercado mundial, ofrecidos por el fabricante Telemecanique. Este tipo de variadores en sus partes constructivas cuenta con un terminal gráfico extraíble que es el encargado de brindarle la información adecuada al operador, este contiene un terminal gráfico desviable: el mismo se fija en la parte delantera del variador y es el encargo de facilitar la comunicación del variador



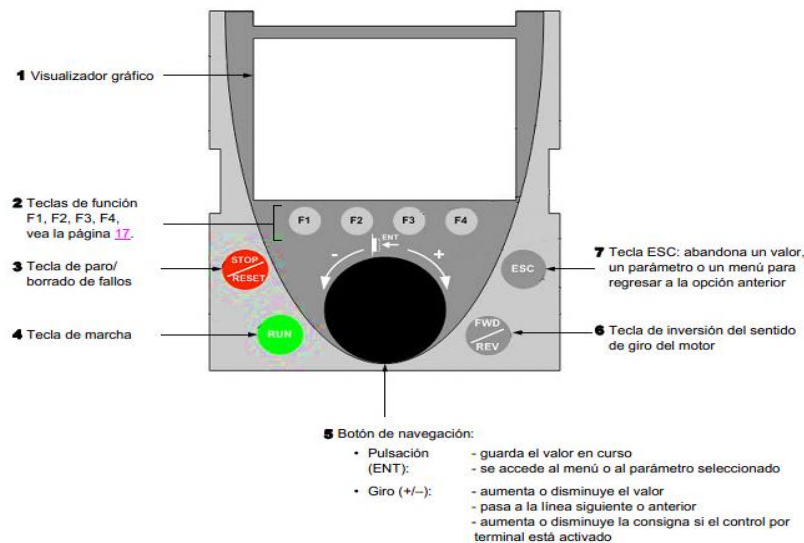
para la obtención de datos, realizar órdenes directas, entre otras. Este terminal gráfico en esencia se utiliza:

- Para controlar, ajustar y configurar el variador.
- Para ver los valores actuales (motor, entradas/salidas...).
- Para memorizar y telecargar configuraciones; se pueden memorizar hasta 4 ficheros de configuración.

Es importante señalar que el controlador gráfico puede conectarse a una distancia determinada con ayuda de accesorios para el montaje en una puerta, e incluso puede conectarse a varios ventiladores con la ayuda de conexión multipunto.

La temperatura máxima que utiliza es de 60 °C, su grado de protección es de IP54 y en

Descripción del terminal



el mercado este controlador puede ser adquirido junto con el variador o por separado.

Figura 7. Terminal gráfico

Componentes del terminal gráfico:

1 Visualizador gráfico:

– 8 líneas, 240 × 160 píxeles.



– Visualización de grandes dígitos legibles a una distancia de 5 m.

– Visualización de barras gráficas.

2 Teclas de funciones asignables F1, F2, F3, F4:

– Funciones de diálogo: acceso directo, pantallas de ayuda, navegación.

– Funciones de aplicación: “Local Remote”, velocidad preseleccionada.

3 Tecla “STOP/RESET”: control local de parada del motor/borrado de los fallos.

4 Tecla “RUN”: control local de marcha del motor.

5 “Joystick” de navegación:

– Pulsación: grabación del valor en curso (ENT).

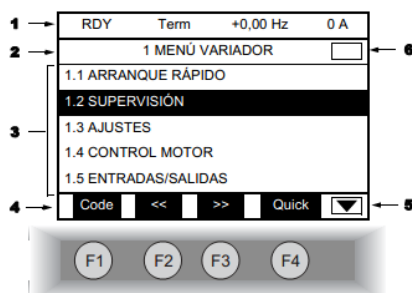
– Rotación \pm : incrementa o disminuye el valor, pasa a la línea siguiente o anterior.

6 Tecla “FWD/REV”: inversión del sentido de rotación del motor.

7 Tecla “ESC”: abandono de un valor, de un parámetro o de un menú para volver a la elección anterior.

Nota: las teclas 3, 4 y 6 permiten controlar directamente el variador.

Descripción de la pantalla gráfica



1. Línea de visualización: su contenido es configurable. Con el ajuste de fábrica, indica:



- Estado del variador.
- Canal de control activo:
 - Term: Bornero
 - HMI: Terminal gráfico
 - Mdb: Modbus integrado
 - CAN: CANopen integrado
 - Carta COM.: Carta comunicación
 - APP: Tarjeta Controller Inside
- Referencia de frecuencia
- Corriente en el motor

2. Línea de menú: indica el nombre del menú o del submenú en curso.

3. Visualización de menús, submenús, parámetros, valores, barras de LED, etcétera, en forma de ventana desplazable, en cinco líneas como máximo.

La línea o el valor seleccionado por el botón de navegación se visualizan resaltados.

4. Visualización de las funciones asignadas a las teclas F1 a F4, alineadas sobre ellas.

5. Significa que esta ventana de visualización no sigue más abajo.

Significa que esta ventana de visualización sigue más abajo.

6. Significa que esta ventana de visualización no empieza más arriba.

Significa que esta ventana de visualización empieza más arriba.

MENU GENERAL



1-Menú variador.

2-Nivel Acceso.

3-Abrir/guardar.

4-Codigo de acceso.

5-Idioma.

6-Pantalla Supervisión.

1.7.1 Esquema de potencia. Circuito de mando.

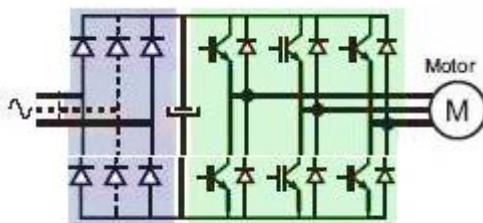


Figura 8 Esquema de potencia, circuito de mando

El control de los motores eléctricos mediante conjuntos de conmutación “Todo o Nada” es una solución bien adaptada para el accionamiento de una amplia gama de máquinas. No obstante, conlleva limitaciones que pueden resultar incómodas en ciertas aplicaciones.

1.7.2 Ventajas de la utilización del variador de velocidad en el arranque de motores asíncronos.

- El variador de velocidad no tiene elementos móviles, ni contactos.
- La conexión del cableado es muy sencilla.
- Permite arranques suaves, progresivos y sin saltos.
- Controla la aceleración y el frenado progresivo.



- Limita la corriente de arranque.
- Permite el control de rampas de aceleración y deceleración regulables en el tiempo.
- Consigue un ahorro de energía cuando el motor funcione parcialmente cargado, con acción directa sobre el factor de potencia.
- Puede detectar y controlar la falta de fase a la entrada y salida de un equipo.
- Protege al motor.
- Puede controlarse directamente a través de un autómatas o microprocesador.
- Se obtiene un mayor rendimiento del motor.
- Nos permite ver las variables (tensión, frecuencia, rpm, etc....).

1.7.3 Inconvenientes de la utilización del variador de velocidad en el arranque de motores asíncronos.

- Es un sistema caro, pero rentable a largo plazo.
- Requiere estudio de las especificaciones del fabricante.
- Requiere un tiempo para realizar la programación

1.8 Conclusiones.

En este capítulo se tuvo en cuenta los trabajos que han precedido el tema que se está tratando, que es la gestión energética en accionamientos industriales con bandas transportadoras, en el mismo se realizó el marco teórico donde se muestran las características principales del accionamiento y las fórmulas que se van a utilizar para así tener una mejor noción del estudio de estos sistemas.



CAPÍTULO II

Técnica de Lógica Fuzzy como agentes inteligentes.

2.1 Introducción.

Establecida desde hace varios años como una tecnología de vanguardia, la lógica difusa o Fuzzy logic está penetrando con fuerza en el mundo del control y promete convertirse en el método de mando universal de toda clase de dispositivos eléctricos y electrónicos. La Lógica Difusa es, desde un punto de vista práctico, un método de razonamiento estadístico que permite especificar los problemas de control del mundo real en términos probabilísticos, sin necesidad de recurrir a modelos matemáticos y con un nivel de abstracción mucho más elevado. En contraste con la lógica convencional, que utiliza conceptos absolutos para referirse a una realidad, la lógica difusa la define en grados variables de pertenencias a los mismos, siguiendo patrones de razonamientos similares a los del pensamiento humano. Dentro del universo de la lógica difusa. Esta última nos permite ser relativamente imprecisos en la representación de un problema y aun así llegar a la solución correcta.

2.2 Breve reseña sobre la lógica difusa.

La lógica difusa es una ciencia relativamente reciente, aunque la idea de vaguedad que promulga ya había sido discutida desde el siglo XVIII por Berkeley, Hume, Kant, Bayes y otros pensadores. Incluso Aristóteles, creador de la lógica formal, admitía la existencia de diferentes grados de verdad y falsedad. Sin embargo, es Lofti Zadeth, profesor de computadores de la Universidad de Berkeley, quien en 1965 propone un método de razonamiento abstracto similar a un patrón de pensamiento humano para representar



los problemas de control del mundo real y crea la lógica difusa. A comienzos de los setenta 70s, el ingeniero Ebrahim Mandani, basado en la teoría de Zadeh, desarrolla el primer sistema de control fuzzy práctico, aplicado a una máquina de vapor. El sistema de Mandani combinaba la experiencia de un operador humano con un conjunto de reglas lógicas para controlar automáticamente la cantidad de vapor o throttle y la temperatura de la caldera de acuerdo a la presión de esta última y la velocidad de la máquina. Las dos entradas (velocidad y presión) eran procesadas de acuerdo a un algoritmo y producían dos salidas (vapor y temperatura) que actuaban sobre el proceso en la forma deseada. A finales de los 70s, los ingenieros daneses Lauritz Meter Holmblad y Jens Jurgen Ostergaard desarrollan el primer sistema de control fuzzy comercial, destinado a una planta de cemento. A pesar de que han transcurrido muchas décadas desde su creación, hasta hace poco el mundo occidental está reconociendo el verdadero valor de la fuzzy logic. Además de factores culturales, dos razones explican esta actitud. En primer lugar la palabra fuzzy sugería algo confuso y sin forma. Esto alejaba psicológicamente a la comunidad técnica de la idea de utilizarla prácticamente. En segundo lugar, no había forma de probar analíticamente funcionaba correctamente debido a que la fuzzy logic, en contraste con la teoría de control convencional, no estaba basada en modelos matemáticos.

Los japoneses aceptaron fonéticamente la palabra fuzzy, sin traducción y libre de las connotaciones negativas normalmente asociadas con el término, y adoptaron la teoría de Zadeh como propia. Esto le permitió evolucionar más tempranamente que los occidentales a la fase experimental. Así lograron comprobar que no eran necesarias las imposiciones para desarrollar y producir sistemas inteligentes.

Actualmente Japón es el líder mundial en la producción de aplicaciones basadas en fuzzy logic, con ventas estimadas para 1997 en 6.1 billones de dólares. En Japón funcionan también el más espectacular de todos los sistemas fuzzy creados por el hombre: el subterráneo de Sendai, inaugurado en 1987. Desde entonces, un controlador inteligente ha mantenido los trenes rodando velozmente



a lo largo de la ruta, frenando y acelerando suavemente, deslizándose entre estaciones y deteniéndose exactamente, sin perder un segundo ni sacudir bruscamente un solo pasajero.

El interés actual en la lógica difusa surge también de la necesidad impuesta por nuevas tecnologías como la inteligencia artificial y las redes neuronales de disponer de sistemas expertos capaces de procesar información, tomar decisiones y responder a estímulos en forma similar al cerebro humano. Los investigadores están utilizando técnicas fuzzy para diseñar redes neuronales y estas, a su vez, para producir reglas de lógica difusa.

En la actualidad, muchos productos de uso corriente (cámaras fotográficas y de video, electrodomésticos, etc.); así como una gran variedad de controladores industriales, dispositivos médicos y otros sistemas relativamente complejos, están basados en lógica fuzzy. La tendencia continuará a medida que los diseñadores encuentren nuevas aplicaciones para esta tecnología. Otros usos de la lógica fuzzy incluyen:

1. Modelos de control de trenes, aviones, botes y otras naves.
2. Sistemas de seguridad para el hogar y la oficina.
3. Sistemas de control y predicción climáticos.
4. Controladores de velocidad de motores AC y DC.
5. Servomecanismos y robots.
6. Control de líneas de producción.

La facilidad de la lógica difusa para adquirir y representar conocimientos ha estimulado también su aplicación en la solución de problemas sociológicos, psicológicos, políticos, administrativos, económicos, epidemiológicos y de otras disciplinas.

En general existen cinco tipos de situaciones en las cuales la aplicación de técnicas de control fuzzy resulta ventajosa o necesaria:

1. Sistemas complejos que son difíciles de modelar por métodos convencionales.
2. Sistemas controlados por expertos humanos.
3. Sistemas con entradas y salidas complejas y continuas.



4. Sistemas que utilizan la observación humana como entrada o como base de las reglas.
5. Sistemas que son confusos por naturaleza, como los encontrados en las ciencias sociales y del comportamiento.

2.2.1 Conceptos y reglas básicas.

En lógica difusa, los diferentes valores que pueden adoptar una variable del mundo real se subdividen o clasifican en grupos y cada valor dentro de un grupo se le asigna una cuota de pertenencia al mismo denominada grado de asociación o membresía. Esta última se designa generalmente como μ y puede adoptar valores entre 0 y 1. Los grupos se denominan conjuntos difusos (ajustes difusos ó fuzzy sets).

En la figura 2.1 se muestra un ejemplo de representación en forma de conjuntos difusos, de temperatura de un recinto. Los valores de temperatura medidos se grafican sobre el eje x y el grado de membresía de cada uno, asignado por experiencia práctica, sobre el eje y. El resultado es una serie de formas convexas, generalmente triángulos o trapecios, llamadas funciones de membresía o de pertenencias.

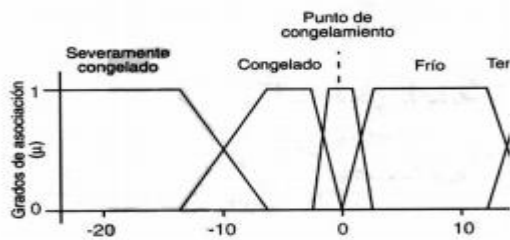


Figura 2.1 Valores reales y valores difusos.

En este caso, la información de temperatura se divide en nueve conjuntos difusos, clasificados desde severamente congelados hasta muy caliente. El rango de valores de cada conjunto determina la base de la respectiva forma y los valores para los cuales la situación representada se cumple en un cien por ciento determinan el techo o vértice. En el caso de la (figura 2.1), por ejemplo, todas las temperaturas entre 17 °C y 24°C tienen un determinado grado de pertenencia con respecto al conjunto –ambiente-, pero el recinto está verdaderamente a la temperatura ambiente ($\mu=1,0$) entre 20°C y 21 °C.



Las formas triangulares y trapezoidales son las más utilizadas en aplicaciones de control difuso debido a que simplifican la manipulación aritmética y representan adecuadamente la experiencia humana. Sin embargo, son también posibles otras formas (figura 2.2), incluyendo la función rectangular utilizada por la lógica tradicional.

Todos los valores de una representación de lógica difusa deben poseer un μ definido. Aunque no es obligatorio, se recomienda permitir que las fronteras o flancos entre dos formas adyacentes se traslapen con un grado de pertenencia combinado del 100 % ($\mu=1$), como sucede con los puntos 21 °C y 24 °C del ejemplo anterior, comunes a los conjuntos –ambiente- y –cálido- .

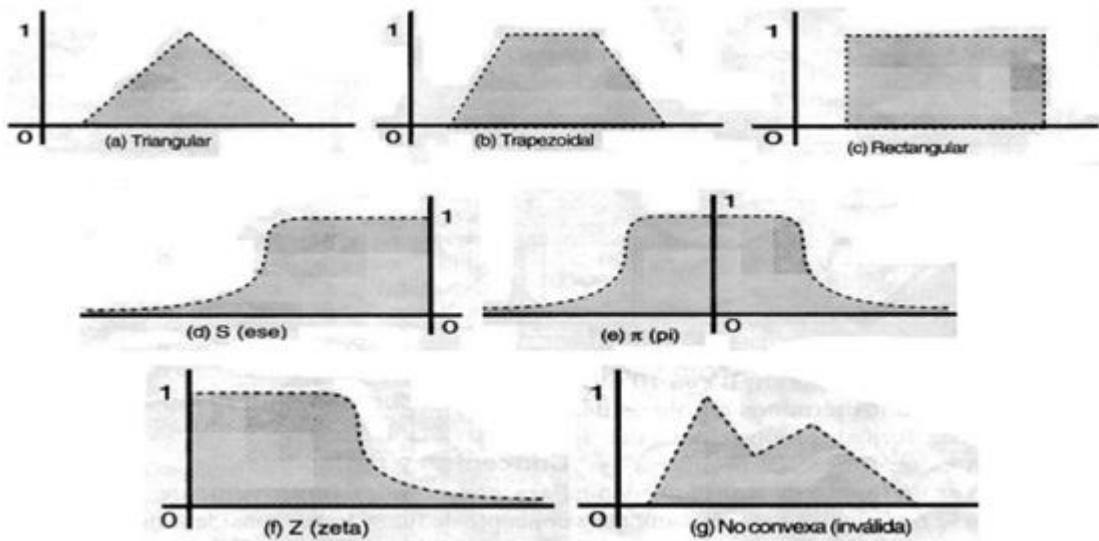


Figura 2.2 a),b),c),d),e),f),g) Funciones de pertenencia comunes.

Una vez representadas en forma de conjuntos o valores de lógica difusa, las variables de entrada y de salida de un proceso deben ser relacionadas mediante reglas lógicas. Estas reglas, derivadas de la experiencia práctica o por ensayo y error, son las que describen y determinan el comportamiento final del sistema.

2.2.2 Operadores básicos de la lógica difusa.

- AND.
- OR.



- NOT.

Las operaciones AND, OR y NOT definidas por estos operadores se denominan también en su orden, conjunción o intersección, disyunción o unión y negación o complemento. En la figura 2.3 se ilustra la forma de evaluar cada una de ellas. Aunque en este caso las reglas se aplican sobre dos entradas (S1 y S2), las mismas son extensivas a múltiples entradas.

La operación AND (Y) de dos valores difusos μ_x igual al menor de los valores de entrada.

Por ejemplo, si $\mu_A = 0.8$ y $\mu_B = 0.3$, entonces $\mu_x = 0.3$.

En el caso de la figura 2.3 a), la regla IF S1 AND S2 THEN... se aplica para los valores de entrada con $\mu > 0$ comprendidos dentro del área sombreada. Por tanto, los valores difusos que se transfieren a la salida son los que siguen el contorno dibujado en línea oscura.

La operación OR (O) de dos valores difusos μ_A y μ_B produce como resultado un valor difuso μ_x igual al mayor valor de entrada. Por ejemplo, si $\mu_A = 0.6$ o $\mu_B = 0.4$, entonces $\mu_x = 0.6$. En el caso de la figura 2.3 b), la regla IF S1 OR S2 THEN... se aplica para todos los valores de entrada con $\mu > 0$ comprendidos dentro de cualquier forma. Nuevamente, los valores difusos que se transfieren a la salida son los que siguen el contorno dibujado en línea oscura. Si la regla contiene más de un operador OR, el valor difuso que se aplica a la salida es el máximo de cada combinación individual.

La operación NOT (NO) de un valor difuso μ_A produce como resultado un valor difuso μ_x igual a $1 - \mu_x$. Por ejemplo, si $\mu_A = 0.1$, entonces $\mu_x = 0.1$. en el caso de la figura 2.3, la regla IF NOT S1 THEN ... se aplica para todos los valores dentro de la forma de S1 con $\mu > 0$. Los valores difusos que se aplican a la salida son los que siguen el contorno dibujado en línea oscura. La zona sombreada corresponde a los valores originales complementados. El efecto neto del operador NOT es, por tanto, la inversión de las formas. Las figuras 3d y 3e ilustran como traba el operador NOT en operaciones AND y OR.

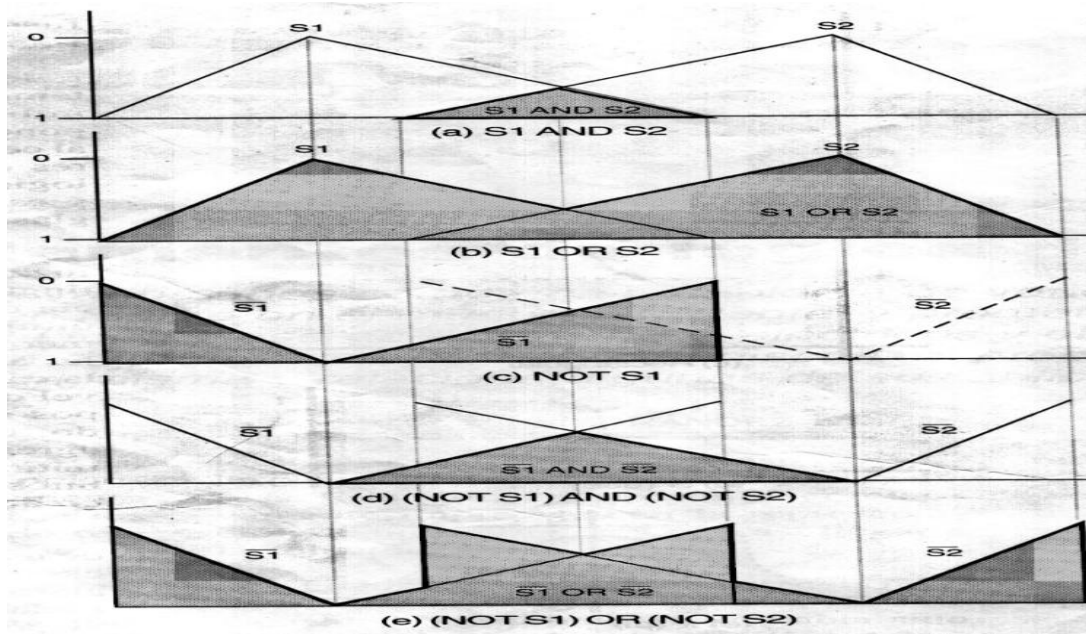


Figura 2.3. Operadores de lógica difusa.

2.3 El uso de modelos difusos.

La implementación de modelos difusos en el motor de inducción es una técnica notable para extraer el máximo comportamiento de los motores eléctricos modernos. [7][Cleland y Turner, 1996]. La aplicación de técnicas difusas se justifica por las ventajas que esta ofrece en los sistemas de accionamientos de velocidad variable utilizando dispositivos avanzados de potencia y medios programables, lo cual ha propiciado el mejoramiento de su control debido a su alta exactitud en la simulación de los procesos complejos, en sistemas no lineales (con algún grado de incertidumbre), así como en aquellos mecanismos que exigen un control optimizado y predictivo en el comportamiento del sistema.

Así por ejemplo, mientras dentro del marco rígido de la lógica formal, un recinto está solamente "oscuro" (0) o claro (1), para la lógica difusa son posibles también todas las condiciones relativas intermedias percibidas por la experiencia humana como "muy claro", "algo oscuro", "ligeramente claro", "extremadamente oscuro", etc. Las condiciones extremas o absolutas asumidas por la lógica formal son sólo un caso particular dentro del universo de la lógica difusa. Esta última nos permite ser



relativamente imprecisos en la representación de un problema y aun así llegar a la solución correcta.

Resumiendo, el diseño de un sistema de control difuso implica:

- Identificar las entradas y salidas, así como sus rangos de variación.
- Especificar las funciones de pertenencias para cada entrada y para cada salida.
- Construir la estructura de reglas bajo las cuales el sistema debe operar.
- Evaluar cada regla y determinar el valor de la salida para cada entrada.

Hay que tener siempre en cuenta que el desarrollo de cualquier sistema difuso parte de la experiencia de un experto humano. La primera tarea del diseñador es, por tanto, comprender como el experto trabaja en el área de su dominio. Por ejemplo ¿Cómo un impresor controla la velocidad, las presiones y el balance de agua y tinta de una máquina litográfica para producir copias de alta calidad? Este proceso de asimilación no es fácil porque la verdadera maestría no se utiliza paso a paso sino en forma intuitiva. Una vez traducido este conocimiento a unas reglas, el sistema difuso resultante debe ser capaz de controlar la máquina casi en la misma forma como lo haría el experto.

2.3.1 Lógica difusa en inteligencia artificial.

En Inteligencia artificial, la lógica difusa, o lógica borrosa se utiliza para la resolución de una variedad de problemas, principalmente los relacionados con control de procesos industriales complejos y sistemas de decisión en general, la resolución la comprensión de datos. Los sistemas de lógica difusa están también muy extendidos en la tecnología cotidiana, por ejemplo en cámaras digitales, sistemas de aire acondicionado, lavarropas, etc. Los sistemas basados en lógica difusa imitan la forma en que toman decisiones los humanos, con la ventaja de ser mucho más rápidos. Estos sistemas son generalmente robustos y tolerantes a imprecisiones y ruidos en los datos de entrada. Algunos lenguajes de programación lógica que han incorporado la lógica difusa serían por ejemplo las diversas implementaciones de Fuzzy PROLOG o el lenguaje Fril.



Consiste en la aplicación de la lógica difusa con la intención de imitar el razonamiento humano en la programación de computadoras. Con la lógica convencional, las computadoras pueden manipular valores estrictamente duales, como verdadero/falso, sí/no o ligado/desligado. En la lógica difusa, se usan modelos matemáticos para representar nociones subjetivas, como caliente/tibio/frío, para valores concretos que puedan ser manipuladas por los ordenadores.

La lógica difusa es una herramienta de inteligencia artificial y su uso se justifica cuando hay un problema complejo, cuando el modelo matemático es complejo y no se tienen los valores exactos de los coeficientes del modelo matemático de la máquina o el proceso. El motor de inducción (MI) y la banda transportadora (BT) son objetos complejos y el proceso de transporte del mineral depende de muchas variables, el procedimiento de alimentación es variable por múltiples factores de tal forma que la medición directa del peso del mineral es la única forma medible y esto constituye una aproximación, no se tiene una precisión del resto de las variables que participan es por eso que usando la lógica difusa se puede elaborar un regulador que tenga en cuenta a través de las reglas difusas la alta variabilidad de la carga mecánica debido a lo variable que es la alimentación del inversor sinusoidal. Es mejor usar lógica difusa porque permite la combinación de las variables y esto mejora el resultado en relación con la identificación neuronal que parte del algoritmo de desarrollo de la máquina o proceso.

2.4 Procedimientos de modelación difusa.

Como es conocido, la modelación por Lógica Difusa es una manera de modelar la incerteza natural del lenguaje humano aplicada a la teoría de conjuntos, desarrollada por Lofti Zadeh en 1960.

Un sistema de Lógica Difusa está formado por tres bloques principales:

- Fuzificación.
- Mecanismo o máquina de inferencia.
- Defuzificación.

Etapas de fuzificación: Es la transformación de las variables entregadas por sensores del proceso en variables de tipo lingüística que conforman particiones definidas en el



universo en discusión. Se obtienen los valores de pertenencia de los conjuntos difusos para los valores medidos.

Base de conocimientos: Compuesto por la base de datos y la base de reglas. La base de datos caracterizan las reglas de control difuso; las bases de reglas permiten la toma de acciones de control. Estas bases son definidas por expertos.

Las reglas de control operan con la siguiente estructura:

Si <condición> entonces <acciones>

Motor de inferencia: es el conjunto de procedimientos a la toma de acciones de control por el uso de implicaciones y reglas lingüísticas.

Defusificación: Como resultado de las etapas anteriores se obtienen las acciones de control de alguna variable en particular. El objetivo de la defuzificación es la transformación de las acciones de control de tipo cuantitativo o determinístico, que permitan un adecuado funcionamiento del o los actuadores del sistema bajo control, los que naturalmente forman parte del mundo real y no del universo difuso en discusión.

La aproximación clásica de la modelación de un sistema de accionamiento eléctrico no comienza como una suficiente representación de los sistemas actuales. Los modelos no 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 artículos [14][M. Sugeno y T. Tanaka, 1991][17][L. X. Wang y J. Mendel, 1992], 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][P. J. Costa Branco y J. A. Dente, 1996] [6][P. J. Costa Branco y J. A. Dente, 1998].

Por otra parte, 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.



2.5 Como diseñar un modelo difuso.

Una vez comprendido el efecto de cada operador, el desarrollo de las reglas para una aplicación particular es un proceso inmediato. Como ejemplo, consideremos el diseño de un sistema de control de lazo abierto para un motor con la estructura mostrada en la figura 2.4 y la característica de transferencia en forma de campana.

Se asume que la señal de entrada U_{in} y la velocidad del motor (MOT) son más o menos proporcionales, en su orden, a la posición del potenciómetro lineal rotatorio (POT) y al valor de la señal de salida (UOUT). Las funciones de pertenencias de entrada y de salida preliminares se representan en las figuras 2.4 y 2.5.

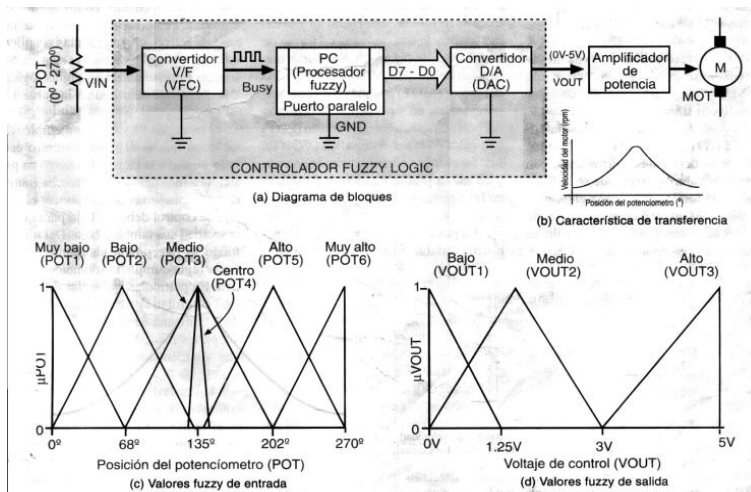


Figura 2.4. Diseño de un controlador difuso.

La posición del cursor del potenciómetro, variable entre 0 °C y 270 °C se convierte a través de UFC (convertidor de tensión a frecuencia) en un tren digital de pulsos que se aplica a la línea de entrada BUSY del puerto de impresora del PC. Detectando la frecuencia o el duty cycle del tren de pulsos, el PC determina cada valor de entrada y lo procesa de acuerdo a un programa o algoritmo de control que contiene toda la base de conocimientos del sistema (valores difusos, reglas lógicas, funciones de pertenencias, etc.). Un vez procesada esta información se suministra a un DAC y se convierte en una



tensión de salida entre 0 y 5 volts que se utiliza para excitar un amplificador de potencia e impulsar el motor en la forma deseada.

Las reglas se formula de la misma manera como se le explicarían a alguien el funcionamiento del sistema, definiendo para cada función de pertenencia de entrada el comportamiento esperado de salida. El número de reglas requerido depende del número de entradas del sistema y las formas o funciones de pertenencias de cada una. En nuestro caso, tenemos un sistema de una entrada con seis formas. Por tanto, para cubrir todas las posibles condiciones de entrada, se necesitan como mínimo 6 entradas. Posteriormente puede ser necesario introducir más reglas o aplicar una misma varias veces para optimizar el resultado. Las reglas lógicas del sistema se resumen en la figura 2.5.

No.	IF	Entrada	THEN	Salida
1		POT3		UOUT3
2		POT2 OR POT3		UOUT2
3		POT4		UOUT3
4		POT1 OR POT6		UOUT1
5		POT1 OR POT6		UOUT1
6		POT1 AND POT2		UOUT3
7		POT6 AND POT3		UOUT3

Figura 2.5 Diseño de las reglas de un controlador difuso.

Después de establecer las reglas que controlan la variable de salida relevante, el siguiente paso en el proceso de diseño de un sistema de control difuso es evaluar la validez de cada regla para cada valor de entrada y determinar el valor concreto que debe aplicarse a la salida. En nuestro caso, esta manipulación la realiza el PC siguiendo las instrucciones del programa de control. En otros casos, puede también recurrirse a circuitos electrónicos, incluyendo sistemas de desarrollo basados en



microprocesadores o microcontroladores o DSP. Cada regla afecta en mayor o menor grado el resultado. En particular, la regla 2 lo afecta en un 70% y la 1 en un 20 %. La regla 6 no incide en el resultado. Por tanto, es de esperar que la tensión buscada esté dentro del conjunto de salida 'medio'(Uout). La pregunta obvia es ¿Cómo determinar su valor concreto? En la figura 2.6 se ilustra un método muy sencillo, basado en el cálculo de centroides o centros de gravedad de figuras geométricas.

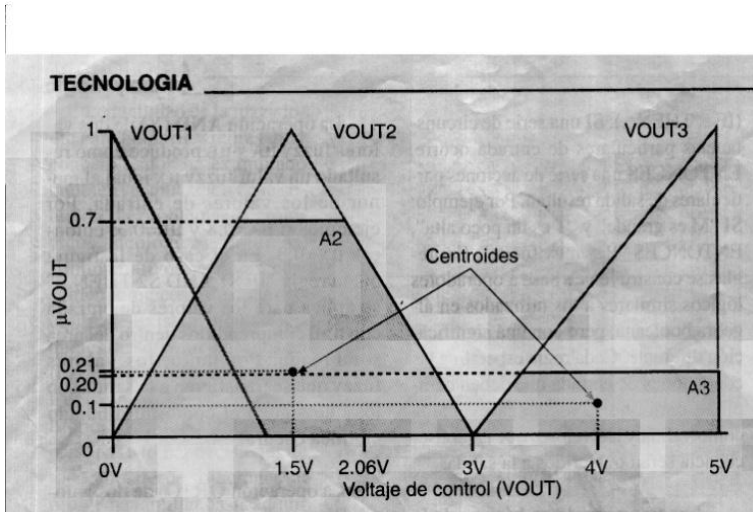


Figura 2.6 Determinación de un valor de salida.

Para aplicar el método de los centroides, se transfiere el resultado difuso de cada regla a la gráfica de salida trazando una línea horizontal hasta que ésta intersecte la función de pertenencia que afecta.



2.6 Conclusiones.

La lógica difusa tiene varias ventajas notables con respecto a las técnicas de control tradicional. En primer lugar, nos permite visualizar las situaciones dinámicas y complejas del mundo real en un lenguaje más cercano a la experiencia práctica humana que los modelos matemáticos. Estos nos liberan de la tediosa tarea de implementar la solución de un problema y nos permite concentrarnos más en la solución propiamente dicha.

De otro lado, el diseñador de un sistema difuso no necesita conocer todos los detalles del mismo. Esto facilita la creación de prototipos y el desarrollo de sistemas más exactos y estables. No obstante, la lógica difusa tiene algunas desventajas. Por ejemplo, aunque los sistemas difusos son fáciles de diseñar y rápidos de traducir a prototipos, requieren también una gran labor de simulación y depuración antes de convertirse en productos finales.



CAPÍTULO III

Modelación del sistema de accionamiento eléctrico de banda transportadora.

3.1 Introducción.

Los sistemas de accionamientos eléctricos son componentes principales en los procesos industriales, y tal es así que su nivel de automatización y productividad depende de ellos. Por otra parte, su comportamiento dinámico es usualmente representado por modelos matemáticos formulados desde postulados físicos que establecen sus variables y parámetros de operación, que en muchas ocasiones no son suficientemente conocidas. En otros casos, la descripción física del fenómeno secundario no concuerda o es difícil introducir en el modelo, es decir, el sistema no puede ser modelado con suficiente exactitud, porque no es posible tener en cuenta con precisión los efectos de determinados fenómenos. En la modelación difusa, el modelo se va siendo preciso a través del mecanismo de aprendizaje que se entrena con la información recolectada y la experiencia de los expertos. El modelo difuso contiene memoria, generaliza y adapta facultades.

3.2 Descripción del modelo.

El objeto Motor de Inducción – Banda transportadora (MI - BT), cuyo modelo ha sido preparado sobre la base de relacionar las componentes de ambas máquinas rotacionales. En virtud de enfocar el análisis con las principales expresiones donde interviene la energía y sus formas de transferirse desde el motor MI hacia el mecanismo



BT, se dedica este capítulo donde se fundamenta la implementación de una técnica que permite observar con suficiente aproximación los regímenes de trabajo del accionamiento. Para esto vamos a utilizar la Lógica Difusa o Fuzzy Logic (en inglés) que permite extraer con alta definición el comportamiento de los motores modernos mediante la simulación exitosa de los aspectos que pueden resultar muy complejos por la lógica clásica (sistemas no lineales con relaciones paramétricas con cierto grado de incertidumbre) y además sirve de mecanismo alternativo para predecir y mejorar el comportamiento del sistema de accionamiento eléctrico industrial.

El principal problema en el diseño de un modelo difuso es identificar su estructura. Esto tiene que ver con el reconocimiento de las variables que mejor caracterizan el sistema dinámico, el número de funciones de pertenencias de manera que son particionadas las variables tanto como intervienen en su distribución y grado de definición del sistema.

3.3 El diseño del controlador difuso.

Se desea mostrar el diseño del controlador difuso a partir de la base de conocimientos del accionamiento eléctrico para el transporte de mineral laterítico mediante un esquema de control que evalúa la eficiencia del sistema. Para ello se desea evaluar la eficiencia del accionamiento de banda transportadora a diferentes niveles de carga. Aquí se desarrolla una alternativa para técnicas de control clásico con el uso de lógica difusa.

En este tema varios métodos para el mejoramiento de la eficiencia, han sido expuesto en la literatura [9][Da. Souza G., K. Bose y J. Cleland, 1995] y de manera resumida se clasifican de tres tipos:

- Un programa de pre-cálculo simple del flujo magnético como una función del torque es extensamente utilizados para elevar el rendimiento de los accionamientos con cargas ligeras. El esquema del programa puede generar un flujo para tomar la dependencia de la frecuencia en consideración. Esto permite un mejoramiento parcial de la eficiencia.
- La segunda aproximación consiste en el cálculo de las pérdidas en tiempo real y la selección del nivel del flujo magnético que corresponde con las mínimas pérdidas. Como el cálculo está basado en el modelo del motor eléctrico, los



efectos causados por los cambios de temperatura y saturación de la máquina no son tenidos en cuenta y entonces el régimen de operación sería para un sub-óptimo de eficiencia.

- El tercer método basado en el control de la eficiencia mediante un procedimiento paso a paso de búsqueda del flujo hasta encontrar su valor más bajo para la mínima potencia de entrada, es uno de lo más interesante que se puede implementar.

Se va desarrollar el último método, donde se controla la eficiencia del accionamiento a partir de sus principales variables electromecánicas. Se quiere lograr un mayor ahorro de la energía a través del control del peso del mineral que es transportado por la banda, el peso del mineral que es transportado tiene relación con la carga desarrollada por la banda, de tal forma que repercute en la potencia que le exige al motor eléctrico.

3.4 Bloque del controlador difuso.

Se ha utilizado una arquitectura tipo Mamdani para el diseño del controlador difuso, en un esquema de un bloque de control con dos entradas y una salida, tal como se muestra en la figura 3.1.

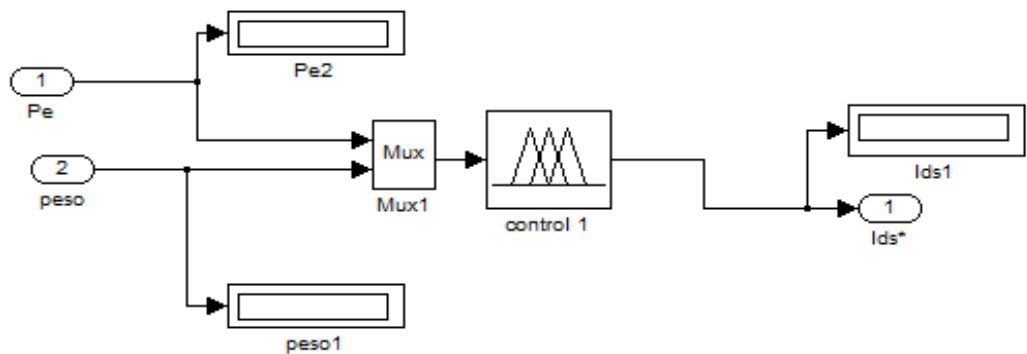


Figura 3.1 Bloque del controlador difuso, control1: P_e , PrOductividad $\rightarrow I_{ds}^*$



Usadas en el bloque de control como variables de entrada: la potencia de entrada P_e , el peso del mineral que se transporta por la banda, y salida el comando I_{ds}^* .

Entonces la máquina de inferencia difusa basada en valores de entrada lingüística, usa la apropiada base de conocimiento diseñada desde la experiencia experta para determinar la salida que es la corriente I_{ds}^* . Consecuentemente la salida implicada es transformada a un valor por defusificación.

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.

El controlador difuso ha sido diseñado siguiendo la siguiente guía:

- Se tiene un valor de referencia de La productividad Q de acuerdo a las condiciones de carga del accionamiento eléctrico, y se varía el comando de la corriente i_{ds}^* en la dirección correspondiente de reducir la potencia de entrada.
- Las variaciones de la corriente i_{ds}^* se limita hasta que los valores de la potencia de entrada ha sido minimizada.

3.5 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 3.2 y 3.3), y es controlado por el método indirecto del vector corriente I_{ds} que gobierna el flujo magnético del rotor ψ_r del motor. El controlador difuso se sintoniza con respecto a la demanda del torque de carga $M_c = f(Q)$ que es función de la magnitud del peso que hay en la banda BT; de tal forma, que elabora el comando i_{ds}^* de acuerdo a la magnitud que debe tener la corriente de magnetización para garantizar el torque electromagnético mínimo del motor para ese nivel de carga.

La base de reglas del controlador opera con el balance de las pérdidas del acero y del cobre del motor cuando la potencia útil entregada en el árbol corresponde con el trabajo eficiente de la banda. 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.

La figura 3.2 ilustra la estrategia de control, asumiendo que el motor inicialmente opera a flujo nominal. En este contexto, el flujo decrece por reducción de la componente I_{ds} de la corriente de magnetización. Esta salida ocasiona un incremento de la componente I_{qs} del remanente constante del torque desarrollado. Las pérdidas del acero decrecen con la disminución del flujo mientras una de las pérdidas del cobre se incrementan pero las pérdidas totales disminuyen mejorando así la eficiencia del motor.

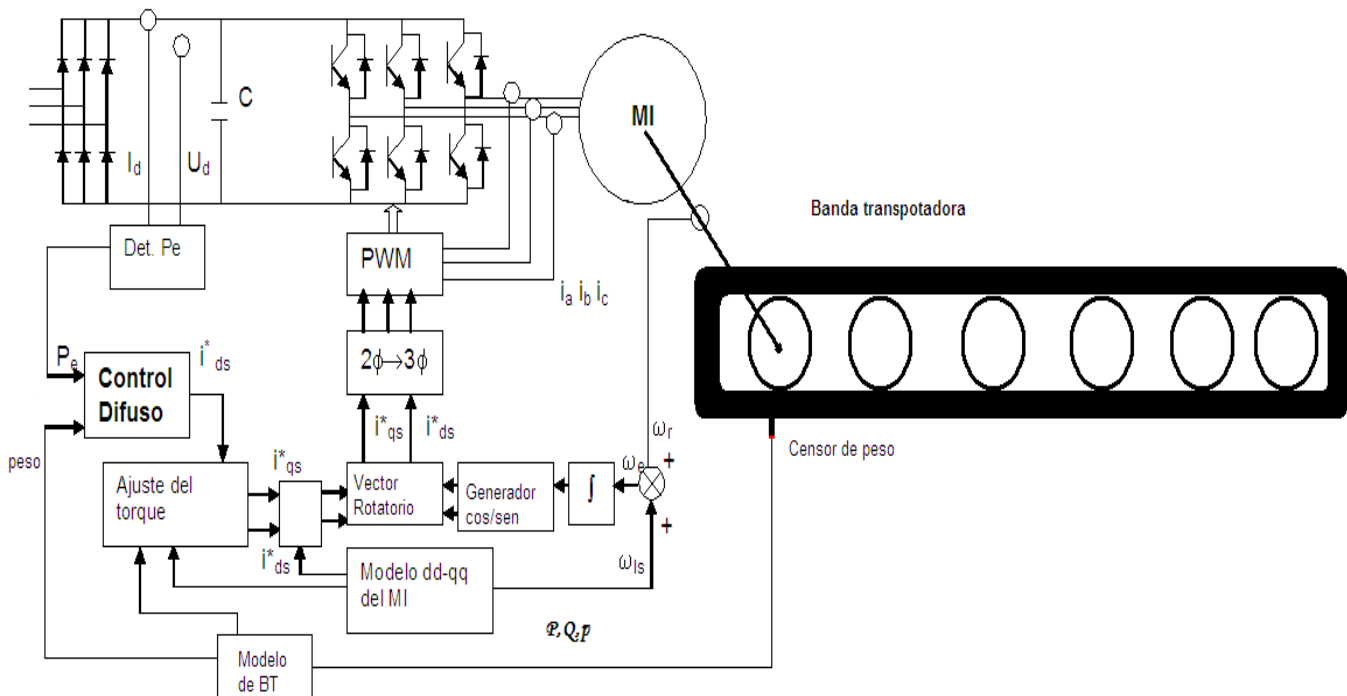


Figura 3.2 Esquema de control vectorial por método indirecto de un motor de inducción para la banda transportadora, con el objetivo de mejorar la eficiencia del accionamiento.



3.5.1 Control de la eficiencia.

La operación del controlador de eficiencia se explica a través de la figura 3.3. Las corrientes, tensiones, la frecuencia angular y el peso del mineral son muestreados y con ello son obtenidas las variables de potencia de entrada P_e , el torque electromagnético M_{em} , el torque de carga M_c , así como el flujo magnético del rotor ψ_{dr} .

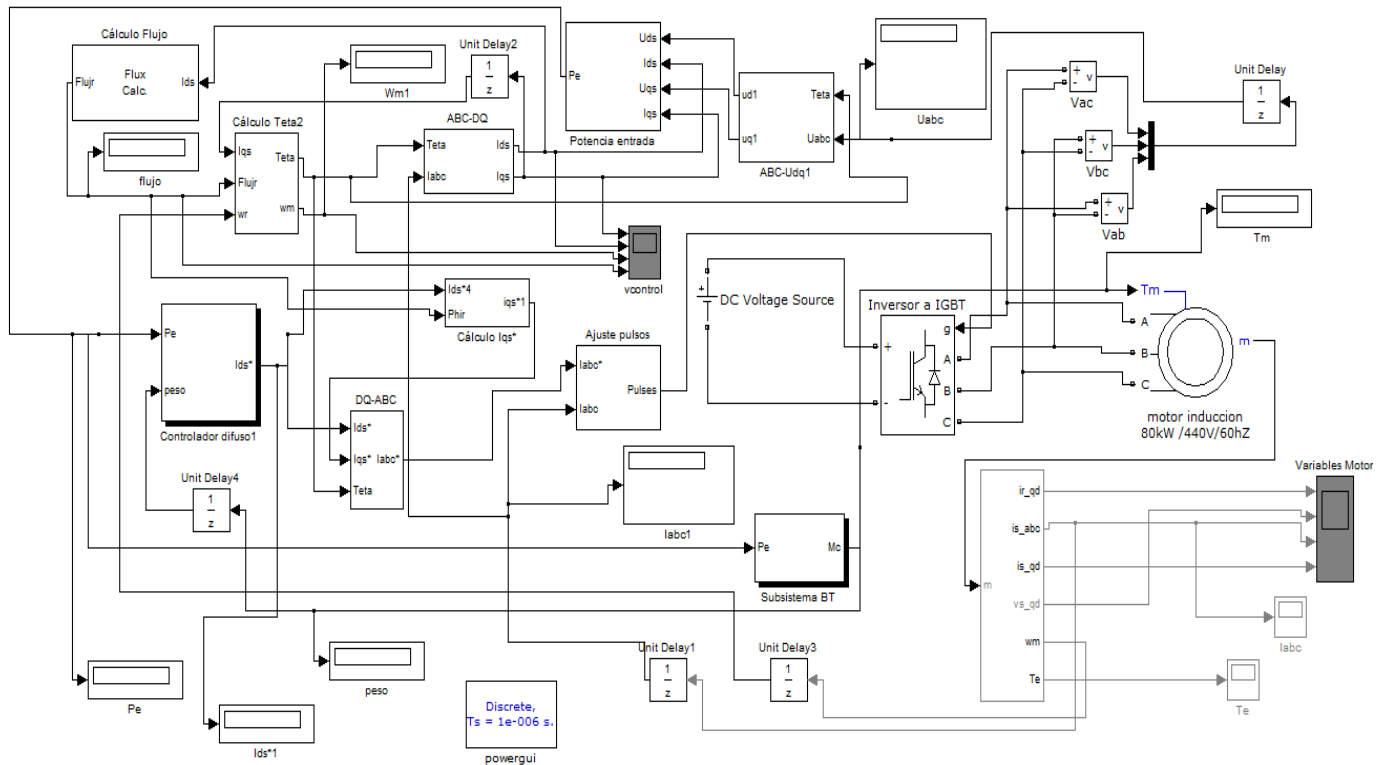


Figura 3.3 Diagrama de bloque del control difuso de eficiencia del accionamiento eléctrico para el transporte de mineral por banda.

Se usan ganancias ajustables generado por un bloque de cálculo de los factores de escalamiento, que convierten las variables de entradas P_e , peso y la de control I_{ds}^* en valor por unidad como una simple regla difusa que puede ser usada en cualquier condición del torque y la frecuencia angular.

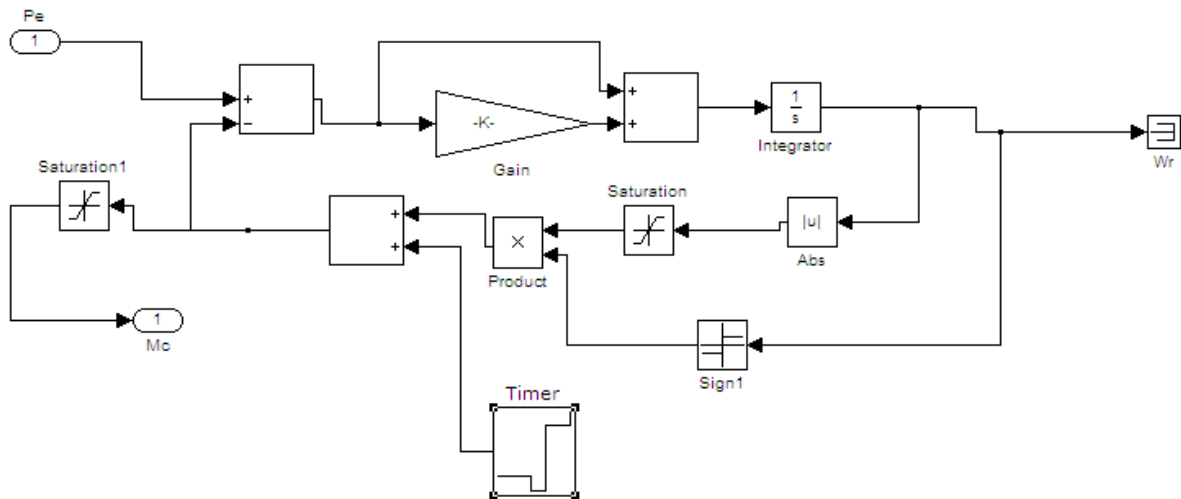
En el punto de más baja potencia de entrada se tiene la zona óptima de operación para una carga mecánica dada, pero puede ser sensible a la estabilidad del accionamiento,



aspecto que se corrige porque las ganancias de las variables de entrada y salida son una función de la velocidad y el momento.

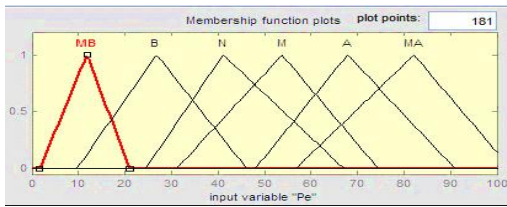
La idea básica es que si la última acción de control indicada es un decremento de la potencia de entrada P_e el proceso de búsqueda está en la misma dirección del control.

Figura 3.4 Diagrama de bloque de control de la banda transportadora.

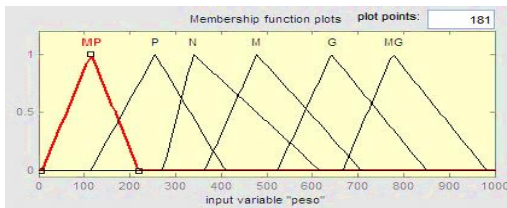




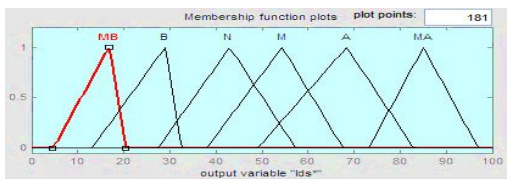
Las funciones de pertenencias de los bloques del controlador difuso son mostradas en la figura 3.4.



Pe



Peso



Ids*

Figura 3.4 Funciones de pertenencias para el controlador de eficiencia.

Tabla 3.1 Base de reglas de las relaciones de potencia P_e , peso, y el comando i_{ds}^* .

Pe	peso	Ids*
MA	MP	MA
A	P	A
M	M	M
N	N	N
B	G	B
MB	MG	MB

Indicando que para la variable P_e lingüísticamente: MA es muy alta, A es alta, M es media, N es normal, B es baja, MB es muy baja, para La variable peso: MG es muy grande, G es grande, M es mediano, N es normal, P es pequeño, MP es muy pequeño, para el caso del comando Ids^* : MA es muy alta, A es alta, M es mediana, N es normal, B es bajo y MB es medianamente bajo.

Un ejemplo de regla difusa puede ser tomado como:



IF P_e es muy alta (MA), peso es grande (G), THEN i^*_{ds} es alta (A).

3.5.2 Resultados de la simulación.

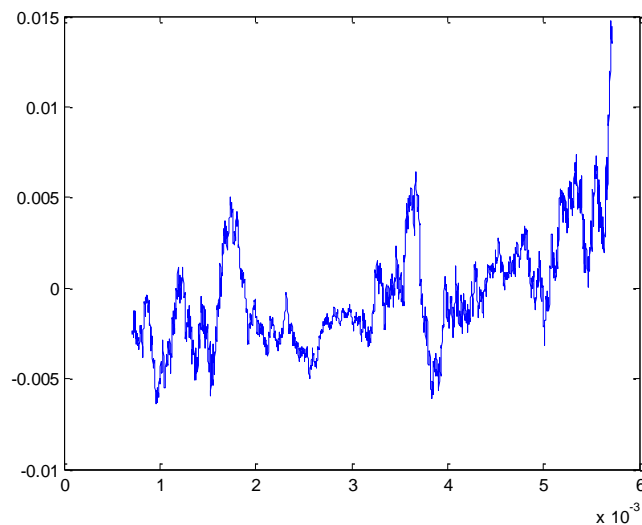
El esquema de control de eficiencia del accionamiento de banda transportadora basado en un controlador difuso que fue simulado utilizando el MATLAB 7.1.1

La simulación se realizó siguiendo los siguientes aspectos:

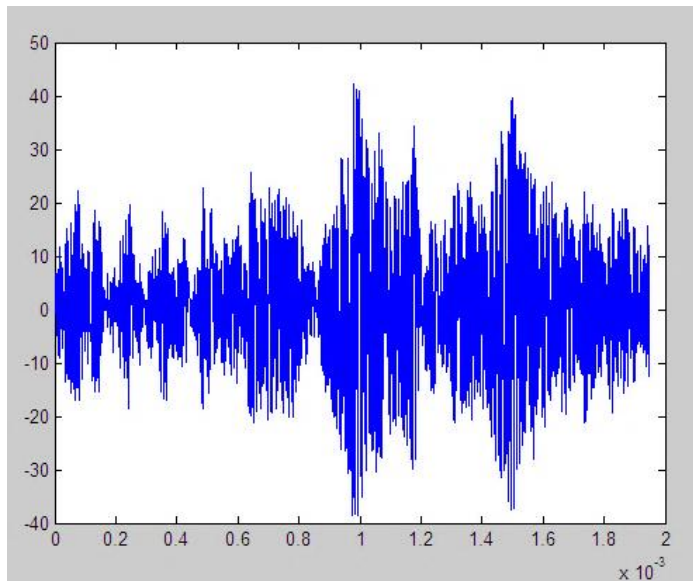
-Después de simular el modelo en el Matlab se utilizó un programa con el cual, se obtuvo el siguiente comportamiento dado en la figura 3.5.

- Ejemplo del programa usado en Matlab:

```
Ids*=plot (Ids*(:,1), Ids*(:,2));
```



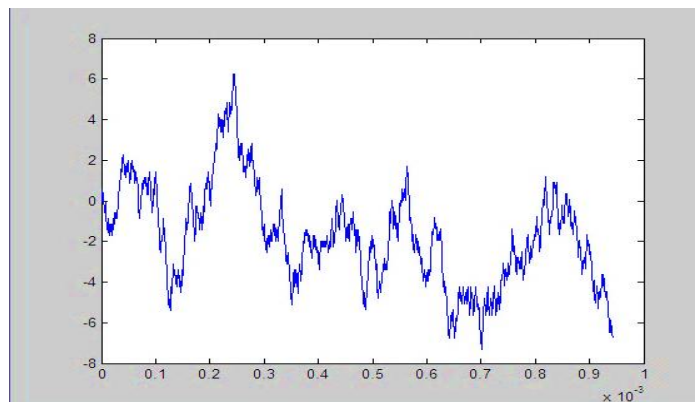
Grafica de corriente Ids.



Grafica de velocidad ω_m .

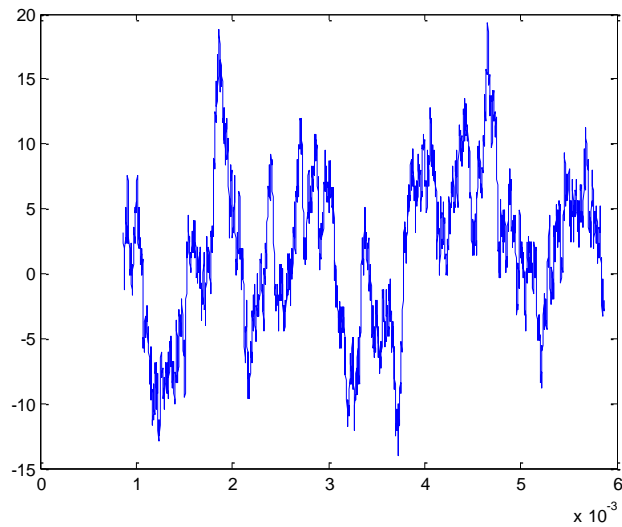
Figura 3.5 Comportamiento de I_{ds} y ω_m del motor de 80 kW, 188.4 rad/s, cargado con 50.76 N.m durante el trabajo del controlador difuso.

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. Durante esto, el torque electromagnético busca equilibrarse al torque de carga y el flujo magnético ψ_{dr} gobernado por I_{ds} se adapta a un nuevo valor, tal como se presenta en la figura 3.6 siguiente:



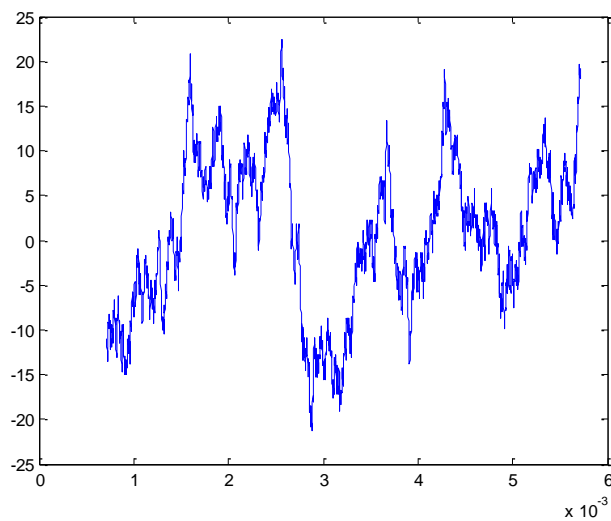


Grafica de momento electromagnético.

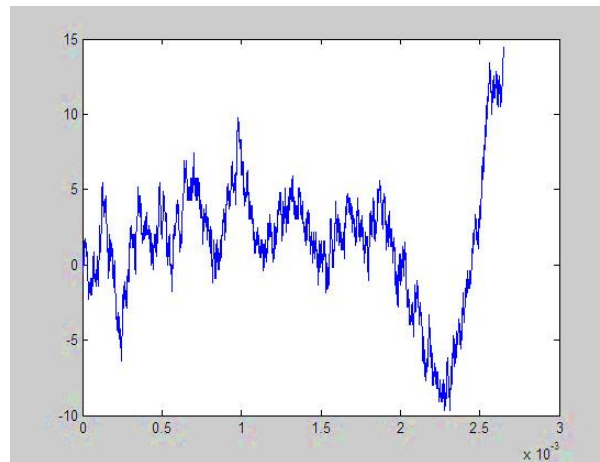


Grafica de corriente Ir.

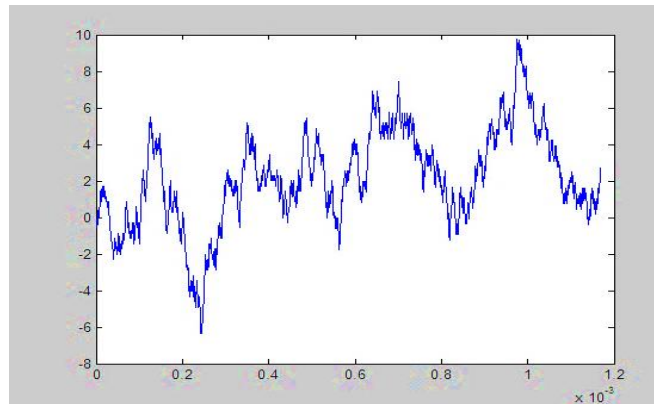
Figura 3.6 Momento electromagnético y la corriente del rotor durante el trabajo del controlador en el accionamiento eléctrico.



Grafica de corriente Iqs.



Gráfica de corriente Iabc.



Gráfica de corriente Is.

Figura 3.7 Comportamiento de las corrientes I_{abc} , I_{qs} y la corriente del estator I_s , durante el trabajo del controlador difuso.

Tomando cada valor para un determinado estado estacionario del accionamiento eléctrico; por ejemplo la eficiencia sin el uso del controlador a diferentes por cientos de carga nominal con respecto a su torque, se presenta en la tabla 3.2.



Tabla 3.2 Valores de eficiencias del motor de inducción de 80Kw, 440V, 1800rpm obtenida a diferentes cargas mecánicas.

Mc [N.m]	Mc/Mn [%]	Eficiencia [%]	Pe [kW]	Ps[kW]
50.76	35	81.4	29	23.6
67.68	39	80.9	29.45	23.82
84.6	41	79,48	30	23.844
105.75	44	83,78	33.7	28.233
122.6	46	83,23	35.8	29.796
152.28	49	85.5	37.5	32.06
169.2	50	81,57	40	32.63
207.27	52	82,9	43.6	36.144
224.19	57	81,45	48	39,09
270.72	63	78	52	40.56
287.64	77	88.5	56,01	49.57
342.63	84	71,1	60,27	42.85
380.7	95	76,98	65,97	50.78
423	100	86.5	73,3	63.04

Para esto se utilizó la expresión mencionada en la caracterización del accionamiento en

el capítulo I:
$$\eta_{MI} = \frac{P_s}{P_s + \Delta p} \quad (1.3)$$

Y con las mismas condiciones de carga pero utilizando el controlador difuso, se obtuvieron durante la simulación los valores de eficiencia en el motor eléctrico tal como se muestra en la tabla 3.3.



Tabla 3.3 Valores de eficiencias del motor de inducción de 80kW, 440V, 1800rpm obtenida durante la simulación, usando algoritmo de control difuso.

Mc [N.m]	Mc/Mn [%]	Eficiencia [%]	Pe [kW]	Ps[kW]
50.76	35	91.4	27.3	24.95
67.68	39	90.9	25.45	23.13
84.6	41	89,48	29	25.95
105.75	44	93,78	31.7	29.73
122.67	46	94,23	33.8	31.85
152.28	49	95.5	34.5	32.947
169.2	50	91,57	37.6	34.43
207.27	52	92,9	42.6	39.58
224.19	57	91,45	46	42.06
270.72	63	88.8	52	46.18
287.64	77	93.5	55,01	51.43
342.63	84	81,1	60,27	48.88
380.7	95	88,98	64,97	57.81
423	100	86.5	70,3	60.81

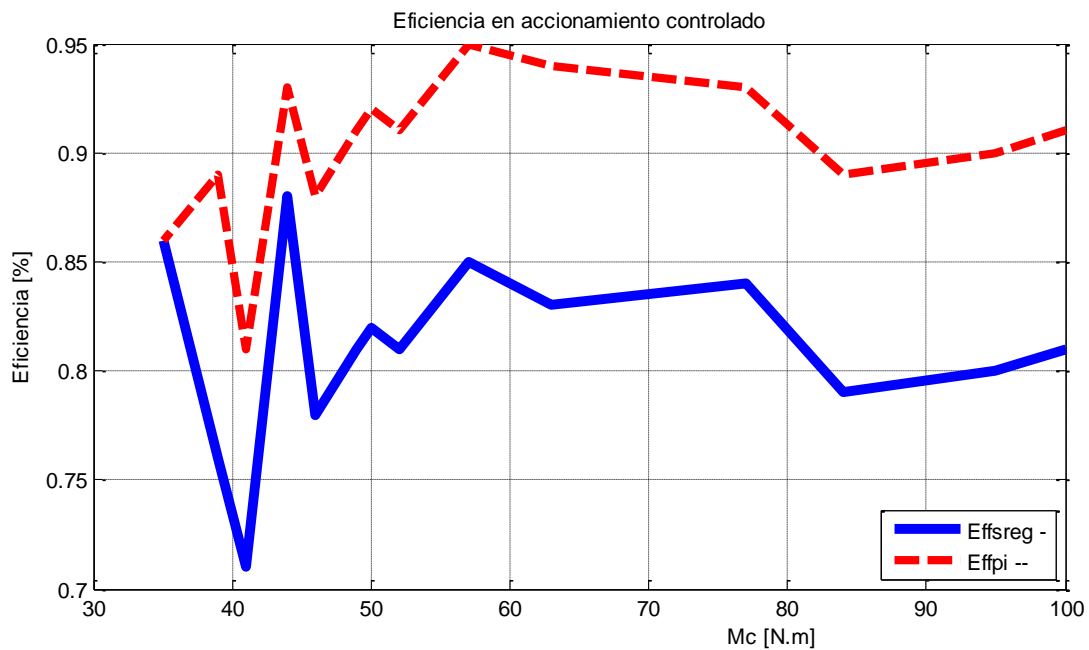


Figura 3.8 Grafica de eficiencias del motor en función del momento de carga.



```
% -- Programa para graficar eficiencia en el motor que mueve la banda transportadora.  
  
t= 1:14;  
Efsreg = [0.81 0.80 0.79 0.84 0.83 0.85 0.81 0.82 0.81 0.78 0.88 0.71 0.76 0.86];  
Efpfi = [0.91 0.90 0.89 0.93 0.94 0.95 0.91 0.92 0.91 0.88 0.93 0.81 0.89 0.86];  
Mc = [100 95 84 77 63 57 52 50 49 46 44 41 39 35];  
plot(Mc(t),Efsreg(t),'-b',Mc(t),Efpfi(t),'--r'),grid  
xlabel('                                Mc [N.m]');  
ylabel('Eficiencia [%]');  
legend('Efsreg -','Efpfi --',4)  
title('Eficiencia en accionamiento controlado')
```

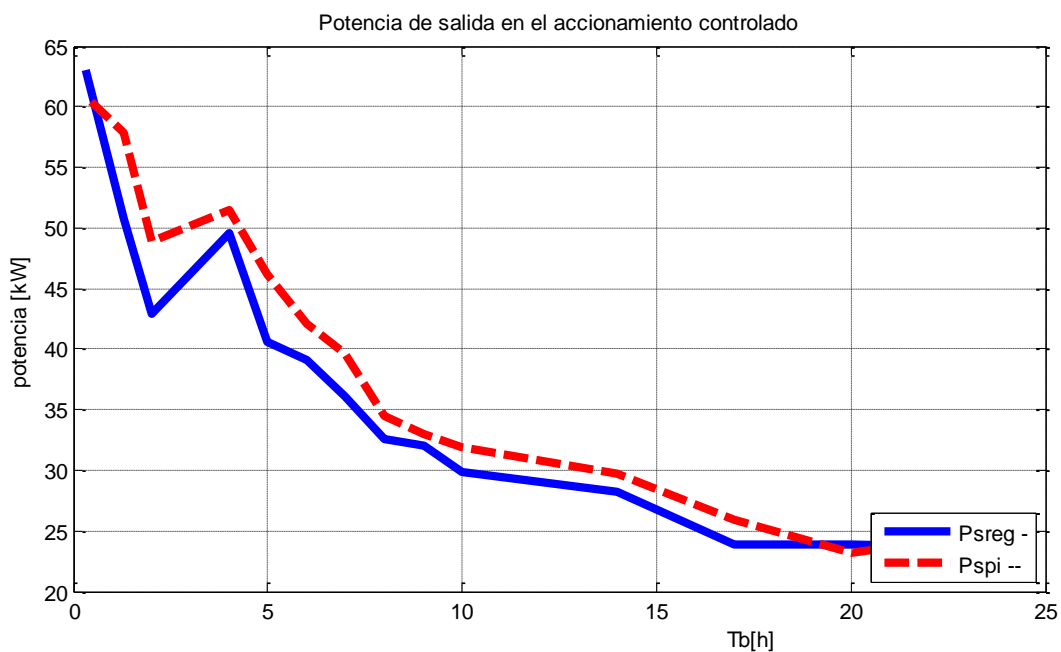


Figura 3.9 Grafica de potencias de salida del motor de inducción.



```
% -- Programa para graficar potencia de salida en el motor que mueve la banda transportadora.

t= 1:14;
Psreg = [23.6 23.82 23.844 28.233 29.796 32.06 32.63 36.144 39.09 40.56 49.57 42.85 50.78 63.04];
Pspi = [24.95 23.13 25.95 29.73 31.85 32.947 34.43 39.58 42.06 46.18 51.43 48.88 57.81 60.81];
Tb = [24 20 17 14 10 9 8 7 6 5 4 2 1.30 0.30];
plot(Tb(t),Psreg(t),'-b',Tb(t),Pspi(t),'--r'),grid
xlabel('Tb[h]');
ylabel('potencia [kW]');
legend('Psreg -', 'Pspi --',4)
title('Potencia de salida en el accionamiento controlado')
```

Esto es resultado de adecuar la frecuencia angular de rotación de la máquina eléctrica al nivel de carga mecánica exigida por la banda transportadora, la f.e.m. desarrollada por el motor de inducción ha sido controlada en el sentido de ir reduciendo sus pérdidas del acero. Evaluando la eficiencia promedio, se ha obtenido un incremento de un 8,76 % con el uso del controlador difuso.

Estos resultados de las pérdidas indican que el controlador de eficiencia opera con mayor efectividad hasta el 67 ó 78 % de la carga nominal del motor, porque a partir de ahí se va adecuando a las condiciones nominales de explotación del accionamiento.

Al irse adecuando por el controlador difuso la potencia de entrada del motor de acuerdo a la carga mecánica de la banda, van teniendo lugar menores pérdidas totales en el motor, a costa de tener el nivel de flujo magnético para la potencia activa útil en su árbol, y que corresponde con la potencia mecánica desarrollada por la banda transportadora, mejorándose así la eficiencia.

3.6 Criterios de estabilidad del controlador difuso

Los estudios de estabilidad en los sistemas de control con lógica difusa han sido tratados con mucha profundidad por numerosos investigadores [13] [Lei y Langari, 2003] [15][Takagi y Sugeno, 1998]; pero no existe un criterio único para su evaluación.

Para esto se tiene una teoría cualitativa, basada en la representación interna de la dinámica del sistema ya que muestra cómo evolucionan los estados de la planta a partir



de un valor inicial. Esta teoría tiene dos métodos, el de espacio de estados, limitado a sistemas sencillos (de dos estados) y se basa en relacionar las reglas del controlador con el espacio de estados asociado al sistema dinámico a controlar. Y el método geométrico, basado en el estudio de las contribuciones del vector de campo de la planta y el controlador. Es un método muy intuitivo y calcula los llamados índices de estabilidad y robustez.

Y la teoría general de estabilidad de sistemas borrosos, la cual estudia la energía del sistema, y evalúa la estabilidad por dos métodos:

Estabilidad por el método de Lyapunov, que está basada en que la energía interna del sistema tienda a cero.

Estabilidad de entrada y salida, que se basa en una representación externa de la energía, ya que la estabilidad externa implica estabilidad interna. De este método se derivan los siguientes criterios:

- Criterio de conicidad.
- Criterio del círculo.
- Criterio de Popov.

3.7 Conclusiones.

- Es posible mejorar en un 8.76 % la eficiencia del motor de inducción para accionamiento de banda transportadora de mineral laterítico, mediante el uso del controlador difuso diseñado para minimizar las pérdidas del acero de la máquina eléctrica.
- El controlador difuso opera con un bloque, usando arquitectura tipo Mamdani, teniendo dos variables de entradas y una de salida: (P_e , peso) $\rightarrow i_{ds*}$, cuyo dominio se estableció por el método de los clústers.
- 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 banda transportadora, y se comprobó su estabilidad.



CAPÍTULO IV

Valoración técnico- económica del trabajo.

4.1 Introducción.

En este capítulo se van a realizar los cálculos de la inversión necesaria para poder instalar un sistema inteligente con la ayuda de la lógica difusa, para mejorar la gestión energética en accionamientos industriales específicamente en los de bandas transportadoras. Para realizar el mismo se hizo una investigación de los precios de los medios usados en el mismo, como son el variador de velocidad, el PLC y el chip Fuzzy. Aunque la inversión inicial de los equipos vinculados al software puede resultar costosa, se logrará una mejor eficiencia. Esto implica, además la durabilidad del sistema.

4.2 Periodo de recuperación simple (PRS).

Este método es el más simple probablemente el más usado, especialmente cuando la inversión se recupera en periodos muy cortos de tiempos. El PRS no tiene en cuenta ni la vida útil del equipo ni el valor del dinero en el tiempo se calcula en base a la función siguiente:

$$PRS = \Delta I \div PE(Eest - Eefic) \quad (4.1)$$

En que:

PE= Precio unitario de la energía (0.048 CUC el kW)

Eest= Consumo de energía anual del equipo estándar

Eefic= Consumo de energía anual del equipo eficiente

Dependiendo del caso, ΔI puede corresponder a la diferencia entre los costos de capital de la opción eficiente y estándar; el costo de la opción eficiente y la reparación



eventual de la opción estándar existente o simplemente el costo de capital de la primera, si el equipo opera normalmente (sin necesidad de reparación en una perspectiva de corto plazo).

4.3 Cálculo de los costos de explotación.

Para el cálculo del costo de explotación se debe incluir los gastos de la instrumentación de campo, accesorio y el PLC.

$$CTI = \sum CIC + \sum CV$$

$$CTI = 17035.00 \text{ (CUC).}$$

Dónde:

$\sum CIC$: Costo total de la instrumentación de campo

No tiene

$\sum CV$: Costo total de equipos y medios de explotación.

$$CV = 17035.00 \text{ (CUC).}$$

Costo total general sería: 17035.00 (CUC). 425875.00 (CUP).

4.4 Gastos de inversiones.

En estos gastos se incluyen todos los dispositivos y la instrumentación necesaria para la aplicación del control difuso en el accionamiento.

Dispositivos:

- Variador de velocidad (Altivar 71 HU40M3) -6000.00 (CUC). 150000.00 (CUP).
- Chip Fuzzy - 10750.00 (CUC). 268750.00 (CUP).
- Autómata programable tipo Modicons de Siemens -285.00 (CUC). 7000.00 (CUP).

El monto total de la inversión es de: 17035.00 (CUC). 425875.00 (CUP).



4.5 Cálculo del tiempo de amortización.

A-1. TARIFA DE ALTA TENSIÓN CON ACTIVIDAD CONTINUA.

APLICACIÓN: Se aplicará a los servicios de consumidores clasificados como de Alta Tensión con actividad continua.

\$ 6.00 mensual por cada kW de demanda contratada durante el horario pico, comprendido entre las 17:00 y las 21:00 horas.

Por cada kWh consumido en el horario pico:

$(0.048 \text{ \$/kWh} * K + 0.0342 \text{ \$/kWh})$ - Consumo pico en kWh

Por cada kWh consumido en el horario del día:

$(0.024 \text{ \$/kWh} * K + 0.0342 \text{ \$/kWh})$ - Consumo día en kWh

Por cada kWh consumido en el horario de la madrugada:

$(0.016 \text{ \$/kWh} * K + 0.0342 \text{ \$/kWh})$ - Consumo madrugada en kWh

❖ Valores en CUC por cada kWh en los diferentes horarios del día.

(Mañana)- 0.2673 CUC

(Pico)- 0.54406 CUC

(Madrugada)- 0.17624 CUC

En un estudio práctico hecho en el taller 01 de la empresa Comandante Ernesto Che Guevara de Moa hay que indicar que con el aumento de las pérdidas no sólo disminuye el rendimiento sino también empeora el factor de potencia del motor eléctrico.

El hecho de que se puede utilizar velocidad adecuada donde tienen lugar las menores pérdidas en el sistema de accionamiento de bandas transportadoras. El cálculo



económico está dado por el ahorro de energía que puede significar cuando utilizamos el variador de velocidad controlado por el PLC.

El mejoramiento de la eficiencia del motor eléctrico determinada por la energía total ahorrada por el uso del controlador difuso que modifica el trabajo en el motor se puede estimar como (1):

$$E_{MIahorr} = Ne \cdot \frac{1}{\eta_{MI1}} - \frac{1}{\eta_{MI2}} \cdot h_{totales} \dots\dots\dots (1)$$

Donde:

- $E_{MIahorr}$ – es la energía total ahorrada en el motor eléctrico, [kWh].
- Ne – es la potencia del motor eléctrico, [kW].
- η_{MI1} – es la eficiencia del motor eléctrico sin el controlador, [%].
- η_{MI2} – es la eficiencia del motor eléctrico con el controlador, [%].
- $h_{totales}$ – horas totales de operación del accionamiento, [h].

El mejoramiento de la eficiencia de la banda transportadora determinada por el ahorro de energía en ella, se determina como (2):

$$E_{MIahorr} = Ne \cdot 1 - \frac{\eta_{MI1}}{\eta_{MI2}} \cdot h_{totales} \dots\dots\dots (2)$$

Donde:

- η_{MI1} – es la eficiencia del motor sin el controlador, [%].
- η_{MI2} – es la eficiencia del motor con el controlador, [%].

En este sistema las pérdidas existentes actualmente pueden clasificarse como:

- Pérdidas de energía eléctrica.
- Pérdidas metalúrgicas.

Calculo económico

Para Motor de inducción trifásica (MI). Datos de chapa (440 V, 60 Hz, 1800rpm, 80 kW)



$$E_{MIahorr} = Ne \cdot \left(1 - \frac{\eta_{MI1}}{\eta_{MI2}} \right) \cdot h_{totales}$$

El rendimiento actual de este motor es de 83.3 %.

Se supone que con el uso del variador de velocidad el rendimiento del motor será por lo menos 94%.

También se supone que el sistema de transporte de mineral laterítico trabaja por 24 horas diariamente, en un mes de trabajo sin interrupciones o averías.

$$E_{MIahorr} = 80 \cdot \left(1 - \frac{83}{94} \right) \cdot 270$$

$$E_{MIahorr} = 6220.8kWh$$

$$E_{MIahorr} = 6143.07 \text{ CUC} \cdot 153576.75 \text{ CUP} .$$

❖ Se tiene que :

$$T_{amortización} = \frac{\text{Inversión}}{\text{Energía Ahorrada}}$$

$$T_{amortización} = 17035.00 \div 6143.07$$

T amortización=2.774 (que representaría que en menos de dos años se alcanzaría la amortización.)

Donde:

T amortización: es el tiempo de recuperación de la inversión.

Inversión: es lo que se invierte en la compra del producto.

Energía ahorrada: es la energía que se ahorra con el producto que se propone comprar en (CUC).



Tabla 4.1 Ahorro de energía mensual con el uso de la técnica difusa en la estimación y control de accionamientos de motores con bandas transportadoras en planta de secadero en la empresa Cmdte. Ernesto Che Guevara.

Momento de carga [N.m]	η_{MI1} [%]	η_{MI2} [%]	$\Delta E_{ahorrada}$ mensual [kW.h]	Psalida [kW]	Costo de $\Delta E_{ahorrada}$ mensual (CUC)
100	86.5	91.4	3456.07	60.81	3413.21
95	86.9	90.9	2304.12	57.81	2275.54
84	71.1	89.5	12096.4	48.8	11946.40
77	88.5	93.8	3456.75	51.43	3413.88
63	83.6	94.23	6336	46.18	6257.43
57	87.45	95.5	5184.2	34.58	5119.91
49	82.9	91.6	5760	32.95	5688.57
44	81.53	92.9	7488.16	31.85	7395.30
39	85.5	91.5	4032	29.73	3982.00
20	83.2	88.8	4132.56	25.95	4081.32
Total	-	-	54246.26	-	52573.56

Es decir, se consigue un efecto económico de 52 573.56 CUC evaluando casi anual el trabajo del accionamiento con variador de velocidad con estimador difuso.

4.6 Conclusiones.

Los energía ahorrada fue de 1401.6 kWh.

Los gastos de inversión se estimaron en \$7030.00 CUC, \$ 175750.00 CUP

La inversión tiene un tiempo de amortización menor de 6 años.



Conclusiones generales.

- ❖ Se obtiene el comportamiento de las variables principales que intervienen en la evaluación de la eficiencia de las bandas transportadoras usando el modelo actualizado del accionamiento eléctrico.
- ❖ Con el uso de la Lógica difusa ha sido posible estimar los indicadores energéticos del accionamiento de bandas transportadoras para las condiciones de explotación en la empresa Cmdt. Ernesto Che Guevara de Moa.
- ❖ Con el uso del controlador difuso se garantiza el llenado más eficiente de las bandas transportadoras.



Recomendaciones

- ❖ Continuar el estudio de estos sistemas de accionamientos eléctricos controlados usando los recursos de sistemas inteligentes pero implementando la comunicación inalámbrica.
- ❖ Utilizar el esquema de supervisor y control presentados para la automatización de procesos análogos en la industria.



REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.

1. Abrahamsen F. Energy optimal control of induction motor drives. Doctoral thesis. Aalborg, Denmark. February 2000.
2. Bodson J. Digital control improves variable speed drives. EPE Journal. Vol. 2. No. 4. December 1992.
3. Bose B. K., Pestel N., Kaushik R. A neuro-fuzzy based on line efficiency optimisation control of a stator flux oriented direct vector controlled induction motor drive. IEEE vol 44. no.2. April 1997.
4. Chapman S. Máquinas Eléctricas. Editorial McGraw Hill. New York. 2003.
5. Costa Branco P. J., Dente J. "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, 1996.
6. Costa Branco P. J. Dente A. Control of an electro-hydraulic system using neuro-fuzzy model and real time learning approaches. IEEE. Trans. On systems, Man and Cybernetics, vol 28, no.2 Mayo 1998.
7. Cleland J., Turner W. Fuzzy logic control of electric motors and drives: feasibility study.- Project Summary. EPA. April 1996.
8. Cleland J. Turner W. McComick V.. Efficiency optimisation control of AC induction motors initial laboratory results. Project. EPA. Mayo 1997.
9. Da Souza G., Bose B., Cleland J. Fuzzy logic based on line efficiency optimization control of an direct vector controlled induction motor drive. IEEE Transaction on Industrial Electronics. Vol.42. No.2. April 1995.
10. Kostenko M., Piotrovski L., Máquinas Eléctricas. Tomo II. Editorial Mir. Moscú 1976.
11. Kusko A., Galler D., Control means for minimization of losses in ac and dc motor drives. IEEE Transactions on Industry Applications, Vol 19, No. 4. July – august 1983.



12. Lascu C., Boldea I., Blaabjerg. The torque vector controlled (TVC) universal AC drive. Implementation aspects. IEEE Transaction on Power Electronics. Vol IA 20. No. 3. 2000.

13. Lei S., Langari R. Synthesis and approximation of fuzzy logic controllers for nonlinear system. International Journal of Fuzzy Logic. Vol. 5. No. 2. Junio 2003.

Postwaiter B. Empirical comparison of methods of fuzzy relational identification. IEE Proc.-D. vol. 138, 1998.

14. Sugeno M., Tanaka K. "Successive identification of a fuzzy model and its applications to prediction of a complex system," Fuzzy Set Syst., vol. 42, 1991.

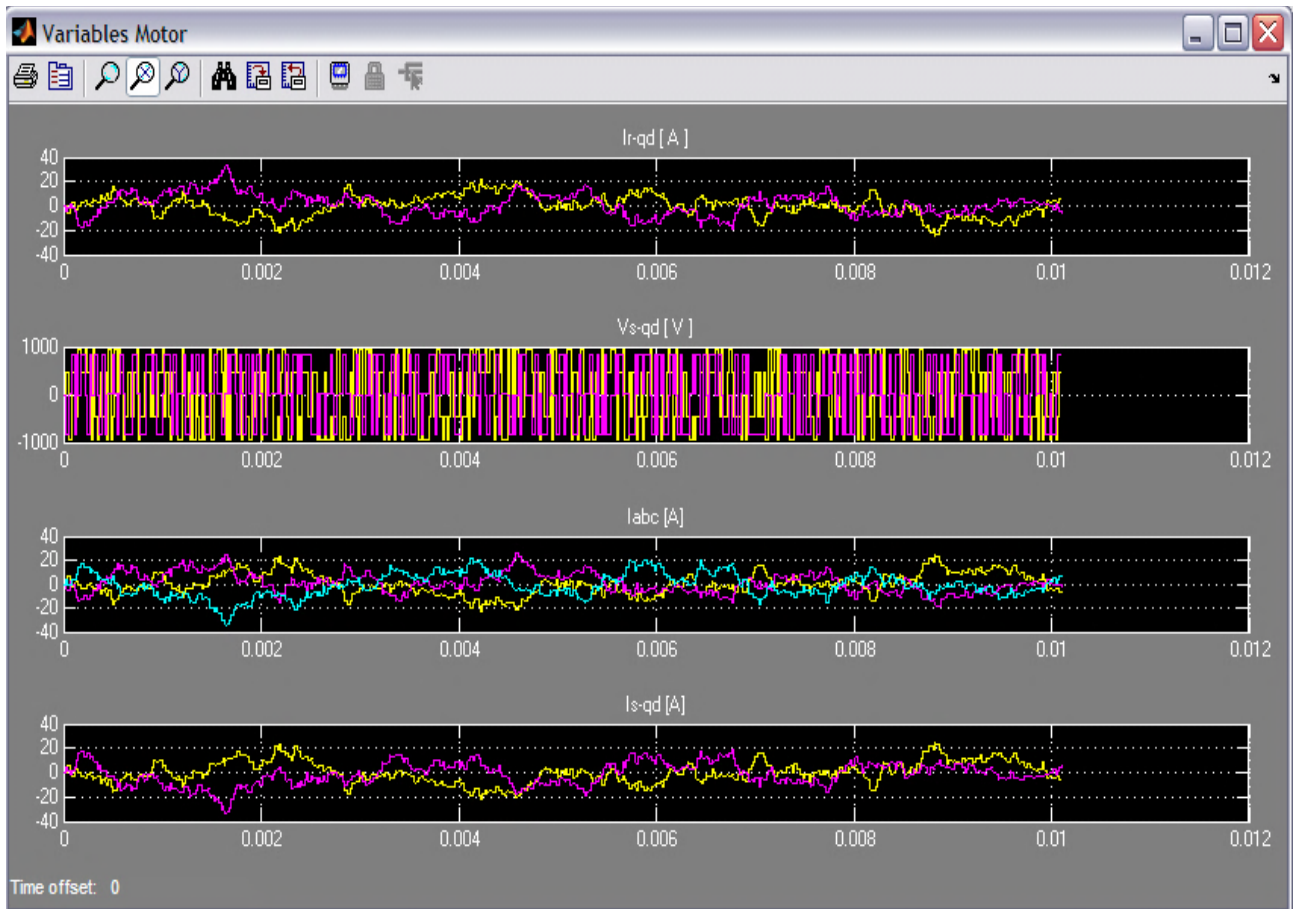
15. Takagi T. Sugeno M. Fuzzy identification of systems and its applications to modeling and control. IEEE. Trans. on systems Man and Cybernetics. Vol. SMC-15. No.1 1998.

16. Wasyncsuk O., Sudhoff, Corzine K., Tichenor J., Krause P., Hausen I., Taylor L. A maximum torque control ampere control strategy for induction motor drives. IEEE-Vol. 4. 2000.

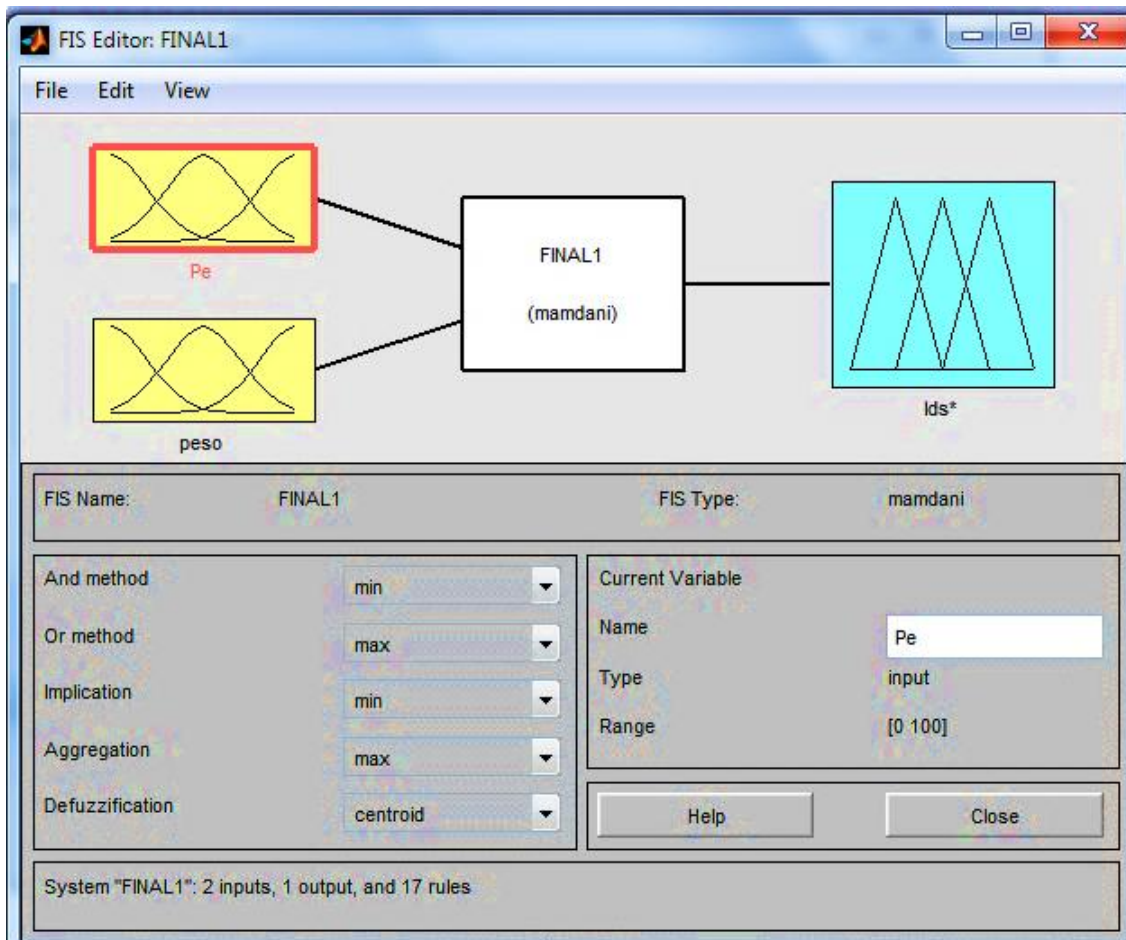
17. Wang L. X. y Mendel J. "Generating fuzzy rules by learning from examples," IEEE Trans. on Syst. Man and Cybernetics, vol. 22, no. 6, July 1992.



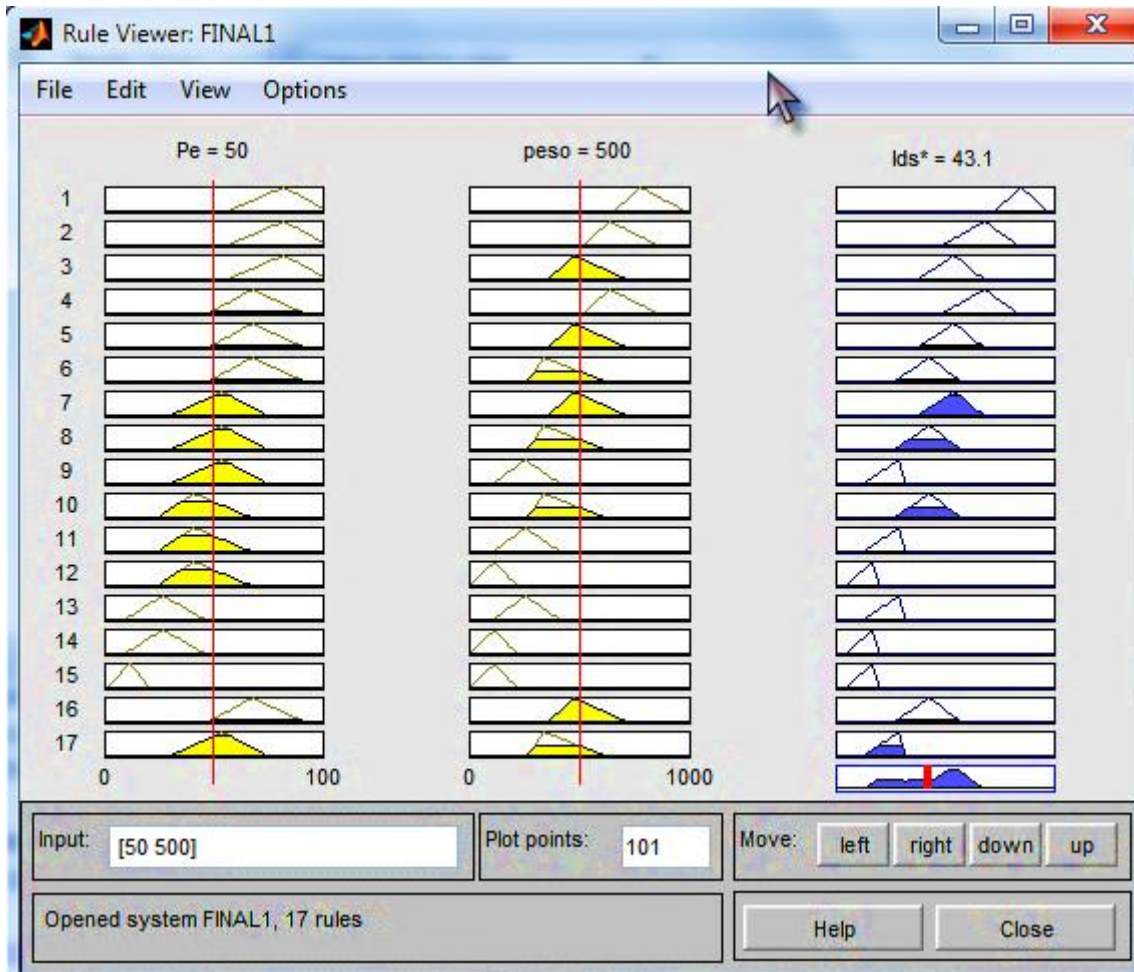
ANEXOS.



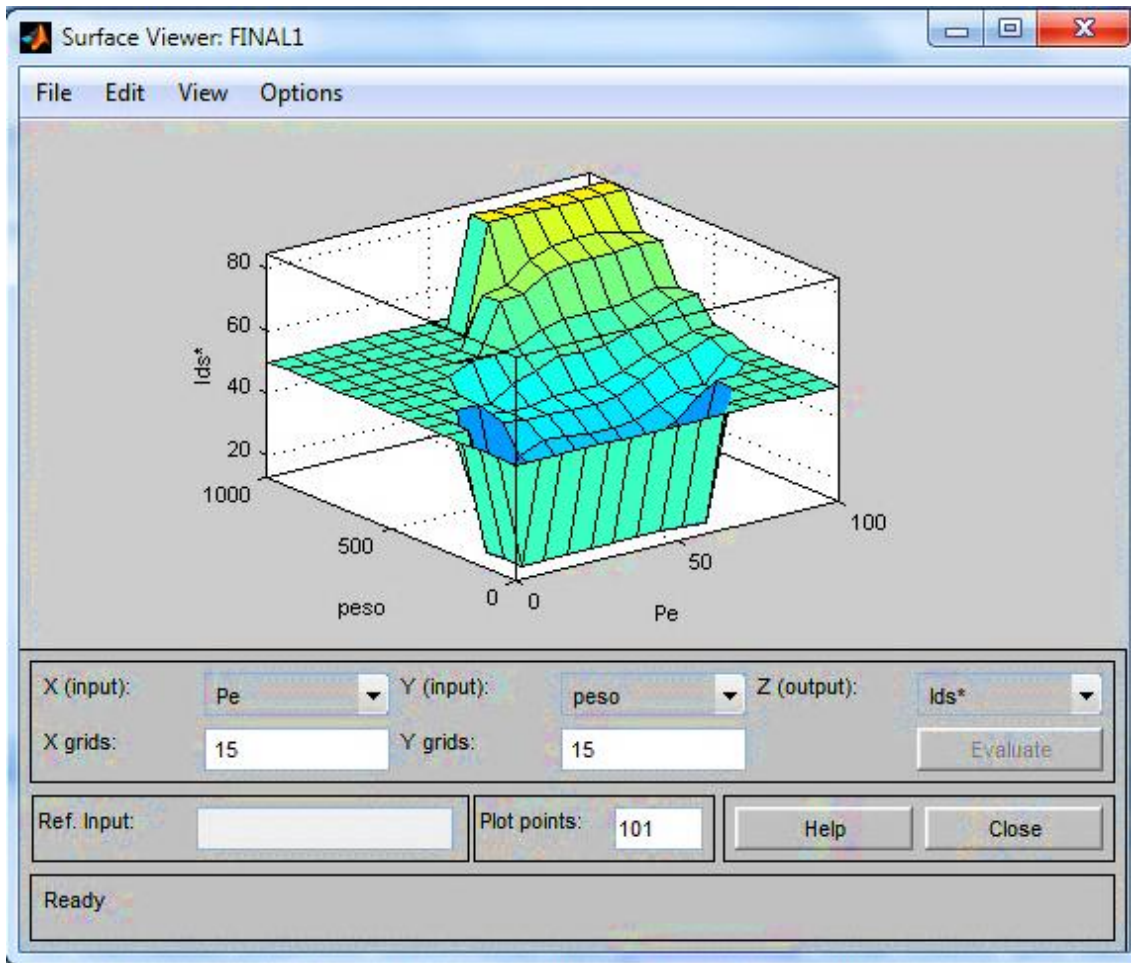
- ❖ Anexo 1.1. Escape tomado de la simulación que muestra las variables del motor.



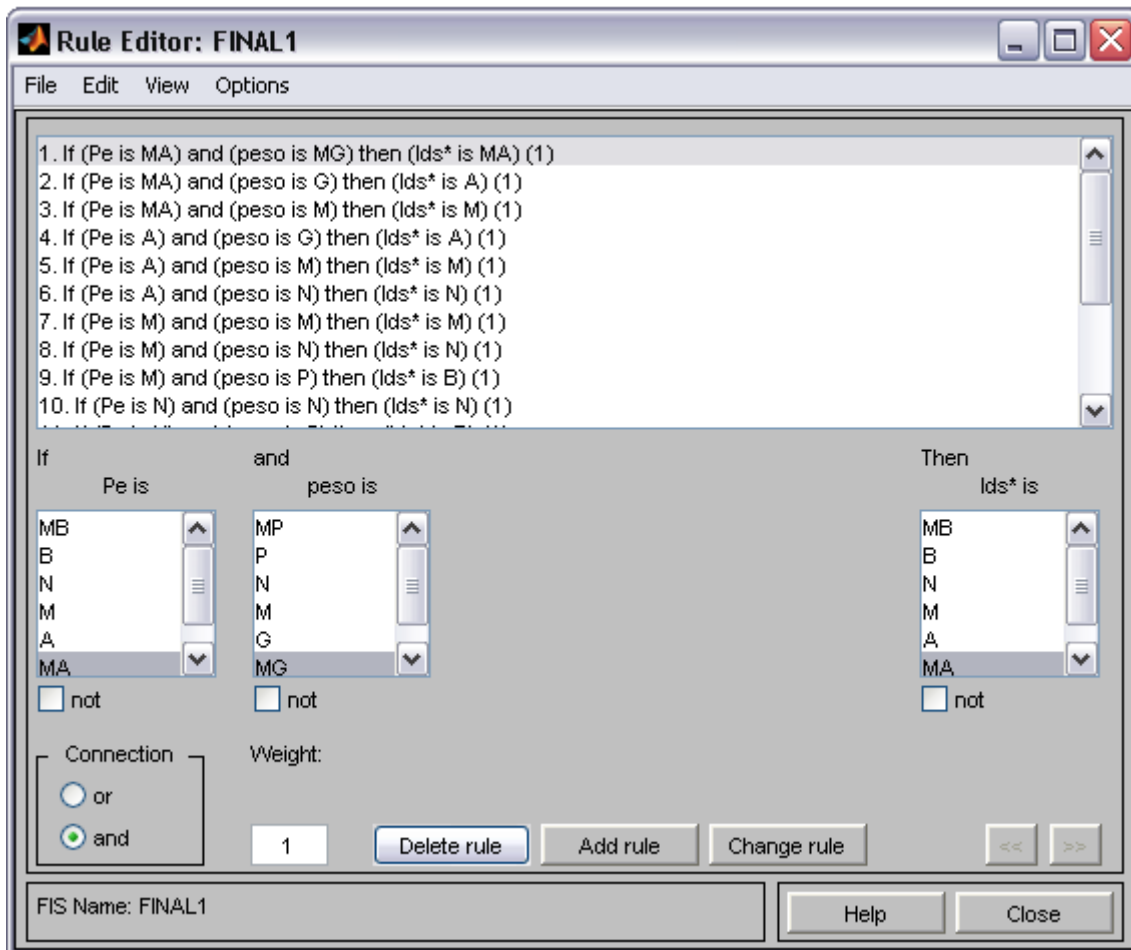
Anexo 1.2 Editor FIS de Matlab.



Anexo 1.3 Editor de reglas difusas de Matlab.



Anexo 1.4 Editor de superficie de Matlab.



Anexo 1.5 Editor de reglas difusas de Matlab.