



**República de Cuba**  
**Ministerio de Educación Superior**  
**INSTITUTO SUPERIOR MINERO METALÚRGICO**  
**“Dr. Antonio Núñez Jiménez”**

# **TRABAJO DE**

# **DIPLOMA**

En opción al título de  
**INGENIERO ELÉCTRICO**

**Título:** Sistema experto de eficiencia en accionamientos con variadores de velocidad en la Empresa Cmdte. Ernesto Che Guevara de Moa.

**Autor:** Sergio Enrique Pedroso Tarafa  
**Tutores:** Dr. Luís Delfín Rojas Purón  
Ing. Ernesto Coello Velázquez.

Moa, Holguín  
Junio 2009  
“Año del aniversario 50 de la Revolución”

## Declaración de autoridad

Yo, Sergio Pedroso Tarafa, autor de este trabajo de diploma titulado: “Sistema experto de eficiencia en accionamientos con variadores de velocidad en la Empresa Cmdte Ernesto Che Guevara de Moa”, certifico su 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.

---

Sergio E. Pedroso Tarafa

Diplomante

---

Dr. Luis Rojas Purón

Tutor

## Pensamientos

*"Hay que ingeniárselas, por encima de todo, para que cada una de nuestras acciones nos proporcionen fama de hombres grandes y de ingenio excelente".*

*El Príncipe (Maquiavelo)*

*El que quiere hacer algo busca soluciones, el que no quiere nada busca justificaciones.*

*Ernesto Che Guevara*

*Lo que eres es el don de dios para ti, lo que haces contigo mismo es el don tuyo para dios*

*Proverbio danés*

## Dedicatoria

*Dedico este trabajo de diploma a mis padres Ana y Juan Esteban, a mi hermano Juan Carlos.*

## Agradecimientos

*La realización de este Trabajo de Diploma y mi éxito profesional no fuese posible sin la contribución de algunas personas a quienes quisiera agradecer:*

*De manera especial a mis padres que han sido la guía en mi desarrollo educacional y a mi hermano por haberme apoyado cuando más lo necesité.*

*A mis tutores Dr. Luis D. Rojas Purón y Ing. Ernesto Coello Velásquez por su consejo y orientación durante la realización de este trabajo.*

## Índice

<b>Declaración de autoridad .....</b>	<b>1</b>
<b>Pensamientos.....</b>	<b>2</b>
<b>Dedicatoria .....</b>	<b>3</b>
<b>Agradecimientos .....</b>	<b>4</b>
<b>Índice .....</b>	<b>5</b>
<b>Abstract .....</b>	<b>8</b>
<b>Capítulo I: Eficiencia en los accionamientos con variadores de velocidad .....</b>	<b>14</b>
<b>1.1-Introducción .....</b>	<b>14</b>
<b>1.2-Características Generales de los Variadores de Velocidad Industriales.....</b>	<b>15</b>
<b>1.3-Trabajos precedentes.....</b>	<b>16</b>
<b>1.4 Caracterización del sistema de accionamientos de bombas centrífugas para transporte de pulpa laterítica.....</b>	<b>26</b>
<b>1.5- Características del accionamiento escogido .....</b>	<b>31</b>
<b>1.6- Conclusiones .....</b>	<b>34</b>
<b>Capítulo II: Fundamentos sobre Sistemas expertos.....</b>	<b>36</b>
<b>2.1- Introducción .....</b>	<b>36</b>
<b>2.2- Historia de los sistemas expertos .....</b>	<b>36</b>
<b>2.3- Principios del sistema experto .....</b>	<b>40</b>
<b>2.4- Arquitectura y funcionamiento de los sistemas expertos .....</b>	<b>41</b>
<b>2.5- Aplicaciones de los sistemas expertos .....</b>	<b>46</b>
<b>2.6- Conclusiones .....</b>	<b>49</b>
<b>Capítulo III: Técnicas de inteligencia artificial.....</b>	<b>51</b>
<b>3.1- Introducción .....</b>	<b>51</b>
<b>3.2- Historia de la lógica difusa .....</b>	<b>51</b>

<b>3.3- Sistemas Difusos .....</b>	<b>52</b>
<b>3.4- Funciones de pertenencia.....</b>	<b>54</b>
<b>3.5- Conjuntos difusos .....</b>	<b>64</b>
<b>3.6- Elementos básicos y reglas de un sistema de lógica difusa .....</b>	<b>65</b>
<b>3.7- Fuzzificación .....</b>	<b>69</b>
<b>3.8- Inferencia difusa .....</b>	<b>69</b>
<b>3.9- Defuzzificación.....</b>	<b>69</b>
<b>3.10- Sistemas expertos difusos .....</b>	<b>70</b>
<b>3.11- Tipos de sistemas basados en reglas difusas .....</b>	<b>70</b>
<b>3.12- Aplicaciones de la lógica difusa.....</b>	<b>71</b>
<b>3.13- Conclusiones .....</b>	<b>74</b>
<b>Capítulo IV: Programa experto de eficiencia en accionamientos.....</b>	<b>76</b>
<b>4.1- Introducción .....</b>	<b>76</b>
<b>4.2- Mediciones e instrumentos utilizados .....</b>	<b>76</b>
<b>4.3- Características del sistema experto hecho con el GUI de MATLAB .....</b>	<b>77</b>
<b>4.4- Metodología Propuesta. ....</b>	<b>83</b>
<b>4.5- Conclusiones. ....</b>	<b>93</b>
<b>Capítulo V: Evaluación técnico-económica del trabajo.....</b>	<b>95</b>
<b>5.1- Introducción .....</b>	<b>95</b>
<b>5.2- Valoración Económica .....</b>	<b>95</b>
<b>5.3- Estado actual de las pérdidas en el accionamiento de hidrotransporte de pulpa laterítica.....</b>	<b>98</b>
<b>5.4- Conclusiones .....</b>	<b>99</b>
<b>Recomendaciones .....</b>	<b>100</b>
<b>Bibliografía .....</b>	<b>101</b>

## Resumen

Debido a la ausencia de un programa evaluador que incluya todos los criterios y todos los componentes principales de un sistema de accionamiento eléctrico de velocidad regulable se hace este trabajo. Para esto se desarrolla el caso de estudio de accionamientos alimentados por variadores de velocidad en la planta de lixiviación en la empresa Ernesto Che Guevara.

Se elabora una base de datos a partir de mediciones directas desde la planta, y se expone un sistema informativo que mantiene actualizado el comportamiento de las variables del inversor de tensión, del motor de inducción, así como del mecanismo industrial (en este caso, las bombas centrífugas).

Como principal mérito está la metodología de evaluación de la eficiencia a partir de indicadores técnico-económicos y los impactos medio ambientales con el uso de un sistema experto.



## Abstract

Due to the absence of a program appraiser that includes all the approaches and all the main components of a system of electric working of adjustable speed this work it is made. For this the case of study of workings is developed fed by a varispeed in the leaching out plant in the company Ernesto Che Guevara.

A database is elaborated starting from direct mensurations from the plant, and an informative system is exposed that maintains up-to-date the behavior of variables of the inverter and the induction motor, as well as of the industrial mechanism (in this case, the centrifugal pumps).

As main merit it is the methodology of evaluation of the efficiency starting from technician-economic indicators and the half environmental impacts with the use of an expert system.

## Introducción General

En todos los países industrializados, la mayoría del consumo eléctrico no domestico es de los motores eléctricos. En promedio, 65% de la energía eléctrica consumida por la industria es usada por los motores y de esto un 95% por los motores de inducción.

Pero una alternativa eficiente es el control de la velocidad. Reemplazando los métodos mecánicos del control de flujo con el método del control de la velocidad ofrece una manera más efectiva en términos de energía y costo. Otros beneficios, tales como la calidad y la confiabilidad, surgen a consecuencia del uso de un sistema de control de velocidad.

El control de la velocidad hace más eficiente las aplicaciones de control de flujo de fluidos a consecuencia de las leyes que gobiernan los ventiladores y bombas centrifugas. Estas leyes plantean que el flujo es proporcional a la velocidad y que la potencia absorbida por un ventilador o bomba centrifuga es proporcional al cubo de la velocidad. Pues una reducción de 20% en el flujo da un aumento de casi 50% de reducción de la potencia.

Una de las maneras en que se puede controlar la velocidad de los motores de inducción es a través del uso de los variadores de velocidad. Estos dependen del control de la frecuencia de la fuente suministradora para su operación. El concepto básico de estos tipos de accionamientos es que un rectificador convierte el suministro de la red (el cual viene con una frecuencia fija) a corriente directa, luego un vinculo de corriente directa mejora la salida rectificada a un voltaje estable de corriente directa. Este voltaje es luego invertido para dar una forma de onda de corriente alterna. La frecuencia y potencia del suministro de corriente alterna del variador es controlada por un microprocesador que viene con el inversor.

En muchos sectores, el potencial de ahorro de energía es relativamente pequeño, de modo que una mejora de eficiencia energética de unos pocos puntos porcentuales se celebra como un gran éxito. Bajo tales condiciones, la perspectiva de conseguir

importantes ahorros de energía parece poco prometedora. Sin embargo, existen tecnologías que pueden conseguir reducciones muy importantes. Entre ellas está, en primer lugar, un dispositivo que a primera vista carece de la espectacularidad de los procesos de gran volumen y alta potencia. Pero esta tecnología, aplicada en todas las instalaciones industriales relevantes del mundo, permitiría reducir el consumo de energía en un 42 %. Este dispositivo es el accionamiento de motor.

El principio es sencillo: en el pasado, los motores que movían las bombas funcionaban permanentemente a plena potencia y la potencia de salida se regulaba por medio de válvulas. Un accionamiento regula el caudal controlando directamente la potencia eléctrica suministrada al motor y prescindiendo así de los controles basados en la fricción, con las consiguientes pérdidas.

## Capítulos

Capítulo I: Eficiencia en los accionamientos con variadores de velocidad

Capítulo II: Fundamentos sobre Sistemas expertos.

Capítulo III: Técnicas de inteligencia artificial.

Capítulo IV: Programa experto de eficiencia en accionamientos.

Capítulo V: Evaluación técnico-económica del trabajo.

## **Problema**

La ausencia de una metodología que permita evaluar la eficiencia atendiendo varios criterios e incluya cada componente principal de un accionamiento eléctrico con variador de velocidad, en las condiciones de explotación minero metalúrgicas de Moa.

## **Hipótesis**

Con la identificación de las variables y los diferentes criterios que internacionalmente se utilizan para evaluar la eficiencia en los accionamientos industriales con variadores de velocidad, es posible elaborar un programa experto que evalúe la eficiencia del sistema para las condiciones de operación en las plantas minero- metalúrgicas de Moa.

## **Objetivo**

Proponer un sistema experto para evaluar eficiencia de accionamientos con variadores de velocidad a partir de varios criterios usando la inteligencia artificial.

## **Resultados esperados**

- Elaborar la matriz de variables que participan en la evaluación de eficiencia en los accionamientos con variadores de velocidad en la planta de lixiviación de la empresa Cmdte. Ernesto Che Guevara de Moa.
- Ofrecer un programa experto para la evaluación inteligente de la eficiencia a partir de varios criterios utilizados internacionalmente
- Brindar una base experimental bien ordenada que permita elaborar un sistema inteligente de medición de eficiencia.
- Desarrollar un caso de estudio para la validación de la metodología de evaluación de eficiencia a través del sistema experto.

# CAPITULO I

# Capítulo I: Eficiencia en los accionamientos con variadores de velocidad

## 1.1-Introducción

La mayoría de los controles están pensados para trabajar a flujo nominal, con el fin de obtener una rápida respuesta del par. Sin embargo, mantener el flujo nominal en operaciones con cargas pequeñas implica un elevado porcentaje de pérdidas en comparación con la potencia desarrollada por la máquina, disminuyendo su eficiencia.

Dada la importancia que en los últimos años ha adquirido el ahorro de energía, se han propuesto diseños de sistema de control de máquinas de inducción que permiten reducir las pérdidas en las mismas, mediante la regulación del flujo en concordancia con el régimen de funcionamiento del motor, con el objetivo de obtener el rendimiento óptimo. De todos los recursos de los que depende la fabricación moderna, la energía es probablemente el más importante. Pero durante mucho tiempo se ha considerado este recurso como algo evidente, como algo garantizado.

En muchos sectores, el potencial de ahorro de energía es relativamente pequeño, de modo que una mejora de eficiencia energética de unos pocos puntos porcentuales se celebra como un gran éxito. Bajo tales condiciones, la perspectiva de conseguir importantes ahorros de energía parece poco prometedora. Sin embargo, existen tecnologías que pueden conseguir reducciones muy importantes. Entre ellas está, en primer lugar, un dispositivo que a primera vista carece de la espectacularidad de los procesos de gran volumen y alta potencia. Pero esta tecnología, aplicada en todas las instalaciones industriales relevantes del mundo, permitiría reducir el consumo de energía en un 42 %. Este dispositivo es el accionamiento de motor.

El principio es sencillo: en el pasado, los motores que movían las bombas funcionaban permanentemente a plena potencia y la potencia de salida se regulaba por medio de válvulas. Un accionamiento regula el caudal controlando directamente la potencia eléctrica suministrada al motor y prescindiendo así de los controles basados en la fricción, con las consiguientes pérdidas. Este capítulo constituye el marco teórico donde se ejemplifican los diferentes criterios que internacionalmente se utilizan para evaluar la eficiencia en los accionamientos industriales con variadores de velocidad y se identifican las diferentes variables que influyen en este proceso. Además de analizar de forma general los variadores de velocidad industriales y de caracterizar el

accionamiento escogido en la planta de lixiviación de la empresa comandante Ernesto Che Guevara

## 1.2- Características Generales de los Variadores de Velocidad

### Industriales.

Los variadores de velocidad permiten adecuar la potencia suministrada con la carga arrastrada al variar velocidad, logrando trabajar en condiciones óptimas la mayor parte del tiempo. Los variadores de velocidad pueden convertirse en un instrumento esencial para la reducción del consumo de energía. Estos dispositivos son especialmente recomendables para cargas variables, puesto que permiten un mejor ajuste del motor y los subsistemas mecánicos a las necesidades del proceso. Normalmente estos son los conocimientos básicos que tenemos sobre ellos pero estos también aportan las siguientes ventajas:

- Reducción de picos de corriente.
- Ahorro en costes de mantenimiento debido al aumento de la vida útil del motor.
- Eliminación del golpe de ariete.

Pero las principales ventajas de un variador de velocidad moderno esta dada porque es todo un sistema de control digital del accionamiento eléctrico que lleva a cabo importantes y variadas funciones. Estas funciones son:

- Realizar el proceso de arranque del accionamiento en el tiempo y con la forma y características que requiere el mecanismo accionado.
- Seleccionar el diapasón de frecuencias y velocidades de trabajo del accionamiento.
- Escoger, dentro del diapasón seleccionado, los valores de frecuencia y velocidad deseados y las acciones externas que el operador o el sistema de automatización superior a que pertenece el equipo debe realizar para esta selección.
- Seleccionar y hacer operar el accionamiento en el modo de trabajo que sea capaz de cumplir los requerimientos estáticos y dinámicos del mecanismo y su posible utilización como componente de un sistema de control de procesos.

*Sistema experto de eficiencia en accionamientos con variadores de velocidad en la Empresa Cmdte. Ernesto Che Guevara de Moa.*



- Integrarse a un sistema de automatización mediante la comunicación con otros variadores, un Controlador Lógico Programable o una computadora personal. Esto se hace normalmente a través de un bus de campo tal como el PROFIBUS o el FIELDBUS.
- Proteger al motor eléctrico accionado de sobrecargas y sobretensiones.
- Proteger al inversor, el rectificador y el resto de las componentes del convertidor de frecuencia.
- Garantizar el cumplimiento de la compatibilidad electromagnética del equipo mediante sus características constructivas de acuerdo a las normativas internacionales, las orientaciones para una correcta instalación del equipo y la utilización de dispositivos adicionales, tales como filtros de línea.
- Realizar todo un sistema de alarmas y diagnóstico de fallos mediante un monitoreo continuo de las variables más importantes. Esto permite al usuario un conocimiento continuo de la condición de trabajo del equipo.

### 1.3-Trabajos precedentes

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

Las fuentes bibliográficas indican que existe una apreciable reserva de aspectos investigativos en las partes de los mecanismos de producción (figura 1.1), las cuales deben ser más adecuadamente estudiadas desde su proceso. Es por esto que nuestro objeto de estudio es el motor de inducción y la bomba centrífuga.

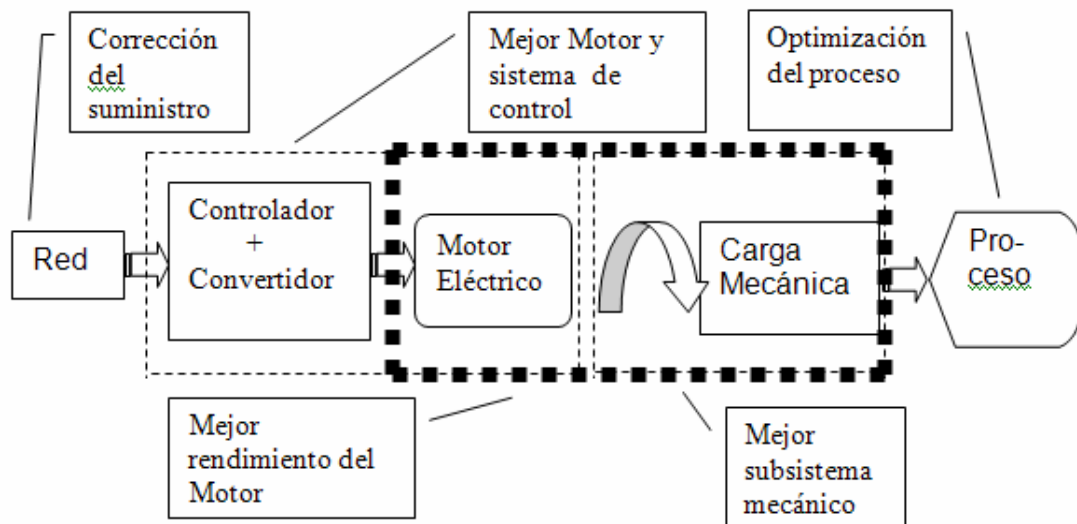


Figura 1.1 Sistema de accionamiento eléctrico y oportunidades de mejoramiento de sus eficiencias.

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.
- Subsistema Mecánico, constituye la carga mecánica rotacional del accionamiento y está determinado por el enlace del árbol del motor con el mecanismo, que en este caso es la bomba centrífuga. En él existen

posibilidades reales de estudio accediendo a las relaciones mecánicas del subsistema y su concatenación con la máquina eléctrica.

- Subsistema Proceso, es en nuestro caso la instalación hidráulica de transporte de pulpa sin incluir la bomba centrífuga que constituye la carga mecánica rotacional; y este subsistema proceso (tuberías, codos, accesorios, recipientes, hidromezclas, etc.) tiene una de las mayores reservas de oportunidades para obtener elevadas eficiencias.

Una idea integral con la apreciación que se tiene en términos de eficiencia en un accionamiento de bombas centrífugas que es muy típico en cualquier instalación industrial, se muestra en la figura 1.2

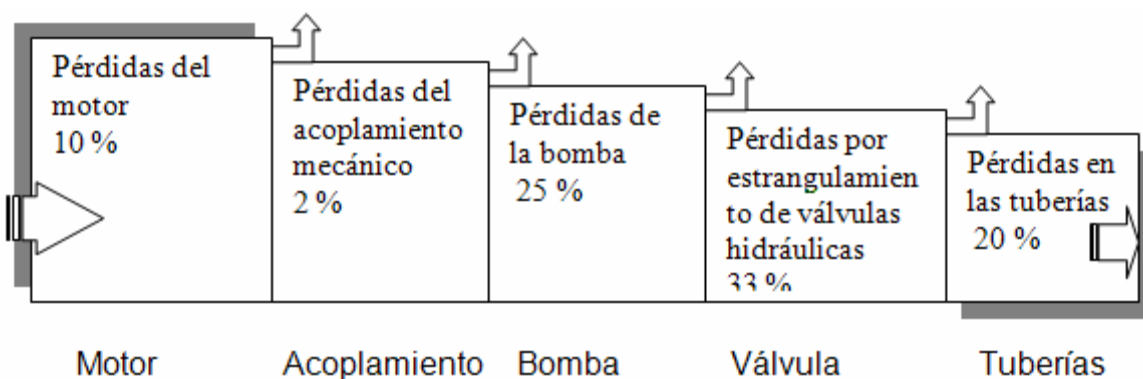


Figura 1.2. Diagrama de pérdidas en un sistema de accionamiento eléctrico de bombas centrífugas.

Como se conoce, los motores de inducción tienen una elevada eficiencia cuando operan con sus cargas y torques nominales [8] [Bodson, 1994]. Así mismo operando con cargas ligeras, las pérdidas del hierro se incrementan dramáticamente, reduciendo considerablemente la eficiencia [47] [Kusko y Galler, 1983]. Este hecho lo explicamos más adelante, y nos parece bueno utilizarlo en nuestro estudio porque es una forma de disminuir las pérdidas en el motor de inducción mediante el control del flujo magnético de acuerdo a la demanda de la carga mecánica en el árbol del motor.

Por otra parte, muchas de las aplicaciones de los motores de inducción corresponden a bombas, ventiladores y compresores; y en la mayoría de las cuales, los motores operan significativamente por debajo de sus valores nominales de carga; la tensión aplicada al estator, crea un campo magnético rotatorio que induce corrientes en el

rotor, generándose par en el eje; si no se requiere el par nominal, el máximo campo magnético tampoco se requerirá; la corriente que produce el campo magnético adicional aumenta las pérdidas del acero, disminuyendo la eficiencia del motor.

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.

La mejora de la eficiencia de los accionamientos para bombas se ha tratado con el uso de un accionamiento a velocidad variable por control del caudal de la bomba centrífuga, a cambio de velocidad constante y válvula de estrangulación, lo cual muestra mejoras en el consumo de energía; la mejora se obtiene en el aumento de la eficiencia de la bomba; para la mejora de la eficiencia del motor en régimen estacionario varios autores han buscado los puntos de operación óptimos por diferentes técnicas; [45][D.S. Kirschen y otros, 1984] propusieron un método heurístico para variar el flujo en línea, buscando disminuir la potencia total de entrada para controles de tipo vectorial; [32][P. Famouri y otros, 1991] utilizan las ideas de Kirschen para obtener el deslizamiento óptimo para un control  $U/f$ ; [81][M.H. Park y S.K. Sul, 1984] obtienen, experimentalmente, los deslizamientos óptimos para diferentes puntos de operación en controles  $U/f$ ; otros autores han atacado el problema de manera analítica; [47][A. Kusko y D. Galler 1983] calculan el deslizamiento óptimo que minimiza las pérdidas por efecto Joule de la máquina; [73][S.I. Seleme Jr. y C. Canudas de Wit, 1992] consideran adicionalmente la energía magnética almacenada en las inductancias; [34][García y otros, 1992] estimando adicionalmente las pérdidas en el núcleo. La mayoría de los procedimientos heurísticos fueron validados en bancos

de prueba de laboratorio; estos procedimientos resultan relativamente complejos para su aplicación en un accionamiento industrial comercial con control U/f.

A pesar de presentarse un resultado que permite calcular una curva óptima U/f que mejora el rendimiento del motor cuando éste acciona bombas centrífugas o ventiladores, donde el par varía con el cuadrado de la velocidad [65][Ramírez, 1998]; y además se aplica la condición de flujo óptimo obtenida por [73] S.I. Seleme Jr. y C. Canudas de Wit (1992), adaptado a bombas y ventiladores con resultados experimentales realizados en el Laboratorio de Accionamientos Eléctricos de la Universidad del Valle; no se tiene en cuenta, las fluctuaciones de carga mecánica debido por ejemplo a posibles vibraciones provocadas por la cavitación en la bomba centrífuga.

La mayor parte de los trabajos en busca del mejoramiento de la eficiencia del motor de inducción basan sus razonamientos sobre el estudio de sus principales pérdidas, las cuales están usualmente comprendidas dentro de cinco componentes: las pérdidas del cobre del estator, las pérdidas del cobre del rotor, las pérdidas en el hierro, las pérdidas mecánicas y las pérdidas adicionales. El mejoramiento ha sido obtenido mediante el balance entre las pérdidas del cobre y el hierro de la máquina manteniendo constante el flujo. En esto se ha llegado establecer una estrategia de control de pérdidas en base un analizador óptimo de energía que opera mediante el manejo escalar del accionamiento [1] [Abrahamsen, 2000]. Parece más completo llevar acabo este propósito a través de un esquema de control vectorial.

Resultan meritorios los trabajos aportados por [74] P. Van Roy, B. Slaets y Ronnie Belmans, en ICEM-2000, en cuanto a detectar el grado de imprecisiones que contienen las diferentes normas (IEC, IEEE, NEMA, JEC) para establecer standards de eficiencias. Ellos concluyen que para motores de una misma capacidad y tipo (ver la tabla 1.3), la diferencia puede llegar a ser de hasta de un 2 % de la potencia de entrada en la determinación de las pérdidas adicionales de la máquina, y la eficiencia con carga parcial es tan importante como a plena carga con respecto a la energía consumida.

Tabla 1.1. Rendimientos con carga nominal de cuatro motores del mismo diseño

<b>Carga parcial</b> <b>(%)</b>	<b>Motor A</b> <b>(%)</b>	<b>Motor B</b> <b>(%)</b>	<b>Motor C (%)</b>	<b>Motor D (%)</b>	<b>Promedio</b> <b>(%)</b>

50	91.95	92.07	91.75	91.77	91.88
75	92.98	92.86	92.53	93.00	92.84
100	93.75	93.39	93.11	93.84	93.53
125	93.88	93.22	93.19	93.62	93.48

Fuente: Artículo, Induction motor efficiency: a number with many meanings, [Van Roy, Slaets y Belmans, 2000].

En cuanto a los métodos y cálculo del rendimiento en los diferentes motores eléctricos John S. Hsu y otros [39], en 1998 ofrecen un detallado estudio en el que explican ocho formas diferentes de evaluar el rendimiento en estas máquinas, desde la inclusión de las pérdidas mediante el uso de un circuito equivalente, el método estadístico, el método de la medición de la corriente, del deslizamiento y hasta el método del torque en el entrehierro que permite conocer las asimetrías y contenidos de armónicos desde el sistema. Pero estos autores no tienen en cuenta las especificidades de carga del mecanismo industrial.

### **Mejoramiento de eficiencias de los motores eléctricos desde sus diseños**

Si observamos algunos estudios realizados en la eficiencia de los motores eléctricos atendiendo al costo desde su etapa de diseño y montaje, es significativo el hecho de que para entregar motores eléctricos preparados para operar con elevadas eficiencias, se necesita para incrementos desde un 92 % a un 95,5 % un costo productivo desde 1000 a 8000 USD, con gastos en inversiones de hasta 2,8 USD por cada KW [3][Appelbaum, Khan y Fuch, 1987], y entre más grandes son las máquinas mayor es su costo. Se establecen correlaciones en las que se incluyen  $\eta_{\max} = f(\text{costos (USD)})$ ,  $\eta_{\max} = f(\cos \varphi)$ ,  $\eta_{\max} = f(\Delta p)$ , así como los efectos del cambio de voltaje en el rendimiento y el factor de potencia. Es decir, la mejor eficiencia puede venir desde la etapa de diseño, pero la máquina eléctrica una vez puesta en explotación va teniendo su propio rendimiento determinado también por las condiciones operacionales asociadas al proceso productivo de las plantas.

### **El uso de modelos difusos**

*Sistema experto de eficiencia en accionamientos con variadores de velocidad en la Empresa Cmdte. Ernesto Che Guevara de Moa.*

La implementación de modelos difusos en el motor de inducción es una técnica notable para extraer el máximo comportamiento de los motores eléctricos modernos. [24][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.

La eficiencia del motor de inducción que opera a velocidad constante puede caer drásticamente cuando se va reduciendo su carga, especialmente por debajo del 50 % de su torque nominal. La regulación del gasto o caudal por estrangulamiento de las válvulas mecánicas en las bombas, ventiladores y compresores no sólo causan pérdidas de potencia en los motores, sino también se incrementan como pérdidas por fricción en estos sistemas.

Para minimizar las pérdidas en el motor es necesario adecuar su velocidad con los requerimientos que exigen las cargas mecánicas. Lo más avanzado, y perfeccionado que se tiene hasta ahora son los Accionamientos de Velocidad Ajustable (AVA), comercialmente llamados variadores de velocidad, que constituyen en sí convertidores de frecuencia o Inversores Sinusoidales de Tensiones con modulación por ancho de pulsos (VSI to PWM, sus siglas en inglés), aunque también pueden ser modulados por la amplitud de sus pulsos (VSI to PAM); también están los Inversores Sinusoidales de Corrientes (CSI, en inglés).

Esencialmente los AVA operan bajo el principio de rectificar la tensión alterna de entrada desde la línea de la red, filtrar la señal, y entonces conmutan la potencia de corriente directa mediante válvulas (que hacen de interruptor abierto-cerrado) hacia una sección inversora que devuelve en la entrada de los terminales del motor una tensión alterna con la misma frecuencia con que se conmutan las válvulas. Un bloque a microprocesador modifica las características de conmutación del inversor de tal forma que satisface los requerimientos exigidos por el proceso. La tensión y corriente rectificadas es directamente controlada con respecto a la frecuencia.

Con el uso de procedimientos difusos se puede efectuar la dirección del bloque de mando del AVA y analizar el sistema con retroalimentación para combinaciones de tensiones, corrientes y frecuencias que optimizan la eficiencia de la energía consumida.

La implementación de un esquema de control difuso se puede adicionar en el bloque convencional del AVA, y se ha demostrado en EE.UU. que para un mejoramiento de un 1 % de la eficiencia en motores eléctricos mayores de 5.6 kW, se consigue un efecto de hasta un 10 % en motores más grandes de 175 kW. [24] [Cleland y Turner, 1997].

### **Mejoramiento de la eficiencia desde esquemas de control**

La eficiencia de los accionamientos de motores eléctricos ha estado enmarcado en función del estudio de las pérdidas en relación con la potencia de entrada del sistema, la velocidad, el torque, el flujo en el entrehierro, la corriente del estator, el factor de potencia y el cálculo por diferentes métodos del rendimiento del motor, tal como lo reflejan las publicaciones de diferentes autores como. [39] [Hsu y otros, 1998] y [74][Slaets, Van Roy y Belmans, 2000].

Usualmente en los accionamientos eléctricos, los motores operan manteniendo el flujo en sus valores nominales o con radio de tensión / frecuencia (V/Hz) sostenidamente constante para las condiciones de cargas de diseño, ofreciendo un favorable trabajo con respuestas rápidas ante los transitorios del sistema. Pero cuando el accionamiento pasa a trabajar con cargas más bajas o ligeras, estas aproximaciones causan pérdidas en el núcleo o pérdidas en el hierro que pueden llegar a ser excesivas comparadas con las pérdidas en el cobre de la máquina, comportándose en condiciones de eficiencias mucho menores.

Varios esquemas de control de motores eléctricos a lazo abierto y cerrado son implementados basándose en:

- a) Control del deslizamiento del motor.
- b) Control de la tensión o corriente mediante una fuente inversora
- c) Control combinado de tensión y frecuencia
- d) Control vectorial
- e) Control de la perturbación de la velocidad del rotor
- f) Minimización de la potencia de entrada para el máximo rendimiento



La presente investigación prepara un esquema de control difuso sobre la base del control vectorial de corrientes, minimizando la potencia de entrada del accionamiento para mantener elevada su eficiencia a diferentes estados de cargas mecánicas del sistema.

Por otra parte se ha avanzado en el estudio de la eficiencia de los accionamientos por la vía de efectuar la dirección del motor de inducción por variación del flujo magnético, en aras de un menor consumo de corriente del estator con poca distorsión, con adecuada respuesta del flujo y el torque a los cambios repentinos en los procesos transitorios. Este aspecto es utilizado en el esquema de control, teniendo en cuenta las especificidades de cambios que ocasiona la carga mecánica del proceso.

Con este enfoque, es de interés el estudio de las pérdidas considerando el flujo magnético reducido [61][Moreno Eguilaz y otros, 2001], utilizando técnica de lógica difusa y esquemas adaptivos, el cual parte de un modelo aproximado de pérdidas, y una aproximación basada en mediciones de potencia, donde utiliza un procedimiento que permite encontrar el valor óptimo del flujo [62][Moreno Eguilaz y otros, 1996] [34][García y otros, 1994] [45][Kioskeridis y Margaris, 1996]. Ellos garantizan la estabilidad del accionamiento para las condiciones a mínimo flujo magnético en régimen estático. Nuestro estudio incorpora el comportamiento del accionamiento eléctrico atendiendo los cambios de la carga mecánica.

Zdenek Cerovsky y J. Javurek [12] en 1997 hicieron un estudio del accionamiento con mínimo consumo de la corriente desde el convertidor (fuente inversora sinusoidal), donde exponen un procedimiento a partir de definir las componentes activas y reactivas del torque electromagnético, así como las componentes reales e imaginarias de la impedancia y las corrientes que participan en la creación del flujo magnético.

Pero hasta la fecha no se reflejan en los modelos de pérdidas, las incidencias que ocasionan los cambios de magnitudes de los parámetros del mecanismo y que de forma casi cíclica exigen al motor, es decir, se separa o se excluye en los modelos la sección de carga mecánica rotacional del mecanismo de producción, que una vez puesto en marcha el accionamiento, es éste el que rige de forma permanente el comportamiento de todo el sistema. En tal sentido, los últimos estudios se han centrado en el grupo Convertidor – Motor de Inducción. [62][Moreno Eguilaz, 1997]

[37][Harnerfors, 1997] [1][Abrahamsen, 2000], [96][Vas, 2001], que aunque se han establecido límites en su manipulación, el problema de mantener elevadas eficiencias en la transferencia de energía del accionamiento para diferentes niveles y regímenes todavía no está suficientemente resuelto como para estar satisfecho en bases a estos enfoques.

Nuestro análisis sigue el comportamiento del accionamiento, a partir de la incidencia de las variables en la transferencia de potencia electromagnética en mecánica rotacional, observando los cambios u oscilaciones de la carga por causas de origen electromagnéticas y mecánicas.

El Motor de Inducción es capaz de reponerse a gran parte de estas oscilaciones, y si son de origen electromagnético y de aceptable intensidad casi siempre las absorbe y las comparte en pequeños transitorios con la red, y este aspecto está contemplado en la fase de diseño de la máquina; pero cuando éstas son más intensas y vienen desde el eje mecánico, por mucho estado inercial que tenga el sistema, al motor le resulta más difícil reponerse a los cambios, y es aquí donde aspiramos profundizar para ampliar la capacidad de respuesta del accionamiento en base a trabajar en zonas de mejores eficiencias.

Estos trabajos se enfocan a la determinación de las pérdidas en estado estático del motor de inducción, dentro de las cuales se sitúan restricciones. Todos ellos están enmarcados bajo las condiciones de una máquina de inducción ordinaria operando con frecuencias normalizadas (50 ó 60 Hz).

Las bombas trabajan con eficiencias más bajas que los motores de inducción, determinadas una parte por las limitaciones que le impone el diseñador y otra por las restricciones que le ofrece la red hidráulica donde va operar. Aunque de forma empírica se ponen coeficientes dentro de las expresiones analíticas que intervienen en el cálculo de las potencias y dimensiones de la bomba y sus instalaciones, todavía no es suficiente las especificidades que exigen los sistemas de transporte de hidromezclas, es por esto que adquiere importancia correlacionar todas aquellas variables que inciden de manera sensible en el comportamiento eficiente relacionado con la distribución de la energía que se transfiere desde el Motor hasta el mecanismo.

Todos estos estudios basan su análisis en minimizar las pérdidas de la máquinas de inducción para cargas de tipo ventilador, que con aproximación simulan las condiciones

de explotación mecánicas, pero no alcanza tener en cuenta con exactitud los diferentes regímenes de trabajo que exigen los mecanismos de transporte.

#### 1.4 Caracterización del sistema de accionamientos de bombas centrífugas para transporte de pulpa laterítica.

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

El esquema del proceso tecnológico simplificado en la planta Lixiviación se muestra en la figura 1.3. El proceso de lixiviación consiste en la disolución selectiva del mineral reducido de laterita que tiene una composición de 1,53 % de Ni, 0,122 % de Co, 2,1 % de Fe metálico, y de un 40 – 60 % de Fe magnético.

El mineral reducido desde cada horno se recoge en un transportador rotatorio que lo lleva al enfriador de tambor sumergido parcialmente en agua para enfriarlo desde 473 °K (200 °C) hasta 393 °K (120°C) y mezclarlo con licor amoniacal de retorno en el canal de pre-lixiviación del cual pasa al tanque de contacto. Ya en la planta de Lixiviación y Lavado, el mineral pasa a través de tres sistemas paralelos de lixiviación de dos etapas a contracorriente, la lixiviación se lleva a cabo con licor carbonato amoniacal que contiene el 6 % de amoníaco y el 3 % de ácido carbónico mediante la creación de la pulpa.

En cada etapa de la lixiviación el mineral presenta densidad variable, en la que se encuentran turboaeradores y sedimentadores conectados en serie. El turboaerador es un reactor químico con agitación intensa, cuya función primaria es inyectar aire a baja presión, cuya magnitud va estar regida por el tonelaje de mineral que entrega los hornos de reducción.

Este aire es introducido por la parte inferior del reactor en forma de bolas pequeñas y su cantidad debe ser el triple del que se absorbe en la parte superior del mismo, a fin de garantizar las reacciones de oxidación del níquel, hierro y cobalto, así como una presión negativa, establecida por los ciclones de tiro inducido en cada reactor, debido a que si fuese mayor, arrastraría pulpa para el circuito de absorción, y fuese menor,

traería consigo el llamado fenómeno de “turbo positivo”, que provoca un escape de amoníaco a la atmósfera.

El oxígeno disuelto reacciona con las partículas pequeñas de la parte metálica presente en el mineral y forma el óxido de níquel. Cuando se forman las películas de óxido sobre las partículas del metal de níquel, las moléculas reactivas de óxido de níquel entran en combinación química con las soluciones de amoníaco para formar el complejo Carbonato-Amoniacal de Níquel.

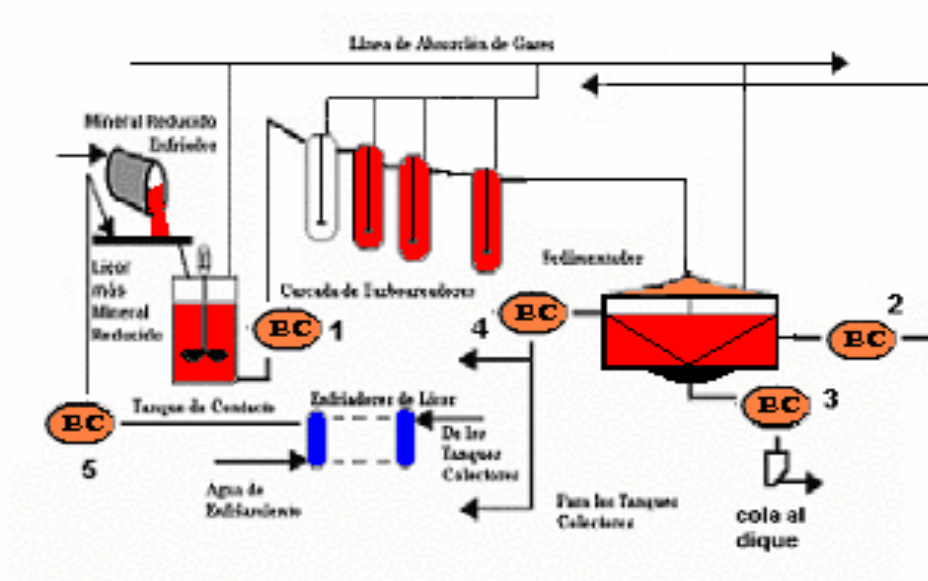


Figura 1.3.: Diagrama del flujo tecnológico en la planta de lixiviación en la empresa Cmdte. Ernesto Che Guevara de Moa, Holguín.

Después de la cascada de turboareadores de cada etapa, y antes de caer por gravedad al sedimentador, la pulpa pasa a través de un electroimán (floculador) con el objetivo de aglomerar las partículas de hierro magnesio y de esta forma, aumentar la velocidad de sedimentación.

El sedimentador es un tanque de forma cilíndrica con un diámetro nominal de 50 m y una altura de la parte cilíndrica del depósito de 5,5 m. Este es utilizado con el fin de separar los sólidos del líquido, funcionando a través del principio de decantación, disponiendo también de un dispositivo de descarga. En el sedimentador ocurre una separación del licor y de los sólidos, donde el licor, producto de la lixiviación, rico en níquel y cobalto, siendo bombeado una parte para la recuperación de amoníaco y la

otra para la sección de enfriamiento o tanques colectores, con el objetivo de incorporarse nuevamente al proceso.

Los sólidos sedimentados son llevados para el cono central y enviados fuera por la parte inferior del mismo, en forma de pulpa. Luego de la segunda etapa de lixiviación las colas se dividen y se dirigen hacia dos sistemas paralelos de cinco etapas de lavado, el cual se realiza con el licor carbonato amoniacal fuerte y fresco que se aplica en la tercera etapa de lavado.

El licor se evacua desde el sistema de lixiviación y lavado por dos puntos en forma de licor producto después de la primera etapa de lixiviación; y en forma de la fase líquida de la pulpa de cola desde la quinta etapa de lavado. Este licor producto y la pulpa de colas se bombean a la planta de Recuperación de amoníaco donde se extrae el níquel en forma de carbonato básico y se recupera el amoníaco.

Como se ha indicado con anterioridad, la investigación del accionamiento eléctrico de bombas se realiza en los accionamientos 1, 2 y 3 indicados en la figura 1.1 en la planta de lixiviación, donde la pulpa se transporta con densidad variable, debido a que sus componentes se encuentran mezclados en proporciones muy diversas en todas estas etapas.

El estudio se centra en el accionamiento con motor de inducción que acciona bombas centrífugas de marcas WARMAN, DENVER y PB-315, con rodete de trabajo cerrado, encargadas de enviar pulpa con temperaturas de 60 a 90 °C en la Planta de Lixiviación de la empresa Cmdte. Ernesto Che Guevara de Moa, Holguín.

Partes del licor proveniente desde la segunda etapa de lixiviación, la primera etapa y de los tanques colectores se enfría en los enfriadores de licor con agua y se dirigen al canal de pre-lixiviación para mezclarse con el mineral reducido.

Los gases que se evacuan desde los resecadores, así como productos de la aspiración se dirigen al sistema de captación de amoníaco, consistente en tres líneas paralelas de absorción (cinco en cada línea) que son regados con agua. Finalmente el licor amoniacal débil obtenido se enfría en el lavado y se aplica en la quinta etapa del mismo.

El licor producto pasa por tres etapas de aeración en la Planta de Recuperación de Amoníaco, con el fin de oxidar y precipitar el hierro, el cual es filtrado y enviado a los

alambiques y pasando de plato a plato es tratado con vapor que se introduce a contracorriente por la parte inferior.

Durante este proceso el amoníaco se elimina del licor y se precipita el Carbonato Básico de Níquel (C.B.N.). La pulpa de carbonato es enviada a los espesadores, el reboso de los mismos es filtrado en los filtros de cartucho y el flujo de la parte inferior en los discos de vacío. La pulpa de cola es enviada para ser destilada en los alambiques y el producto de desecho se bombea al depósito de colas.

Los gases de la destilación del licor producto y de las pulpas de colas después de haberse enfriado previamente, se envían al sistema de absorción para obtener un licor amoniacal fuerte. Este sistema está compuesto por cuatro líneas paralelas de torres de absorción unidas en serie que son regadas tanto por agua como por licor de retorno y que constituyen la primera etapa de absorción.

El licor amoniacal fuerte obtenido en el sistema de absorción se emplea en el sistema de lavado y se alimenta a la tercera etapa, las pérdidas de amoníaco se compensan suministrando  $\text{NH}_4 \text{ OH}$  del depósito al sistema de absorción. Otro componente que forma parte de la Planta de Lixiviación es lo que se conoce en la Empresa como Planta de Cobalto, la cual constituye un esquema corto de la misma. En esta se obtiene Ni y Co, en forma de sulfuro como resultado de la dosificación del licor producto como Hidrosulfuro de Amonio, rebajando el contenido de cobalto en el producto final de la Planta de Sínter. En la actualidad a pasado a ser un producto de salida más de la Empresa con un mercado estable.

Los Enfriadores de licor tienen la función de enfriar la solución utilizada en los Tanques de contacto, lo que ayuda a mantener la temperatura de la pulpa en un límite permitido en el proceso de lixiviación, favoreciendo la solubilidad del oxígeno en los licores, aspecto fundamental para la extracción de níquel y cobalto, evita incrementos en la tensión de vapor de amoníaco encima de los límites prescritos y aumenta la solubilidad del magnesio, factor este, muy negativo en el proceso, debido a que el mismo precipita en los equipamientos y líneas creando una costra endurecida.

El licor a enfriar llega de la primera y segunda etapa de lixiviación con una temperatura aproximada de 321 °K (48°C), intercambia calor con el medio enfriante, el cual es agua de retorno que llega de los Enfriadores de Agua con una temperatura de 316 °K (43°C) saliendo de los enfriadores por la red de retorno. El licor sale de los

enfriadores para el tanque de contacto con una temperatura entre 306 °K (33°C) y 308°K (35°C). El mineral reducido, proveniente de los hornos de reducción, es descargado de los enfriadores rotatorios, a una temperatura entre 446 °K (173°C) y 473 °K (200°C), con una composición de 1,53 % de níquel, 0,122 % de cobalto, 2,1 % de hierro metálico, 40 a 60 % de hierro magnético, para un total de hierro de 44,6 % además de contener 0,8 % de carbono y 0,6 % de azufre. El mineral reducido tiene una granulometría variada y una densidad de 3 300 a 3 500 kg/m<sup>3</sup>, su color es prieto. En los tanques de contacto, el mineral reducido es mezclado con el licor fresco. Este licor, también denominado licor de contacto, tiene una temperatura en el rango de 306 °K a 308 °K (33 – 35 °C) y proviene de los enfriadores de licor.

Estos componentes son mezclados en el tanque de contacto a través de un agitador que homogeniza la mezcla, formando una pulpa con una densidad de 1130 a 1140 kg/m<sup>3</sup>. La pulpa, con una proporción másica de seis partes de licor para una de sólido es bombeada para los distribuidores de pulpa. Los tanques de contacto son recipientes con un diámetro de 4,80 m y una altura de 3,86 m. La tapa cónica proyectada para servir de soporte al mecanismo de accionamiento. En esa etapa aparece también el sello hidráulico para los gases amoniacales, así como un soporte para los medidores de nivel del tanque y una abertura circular para el mecanismo de accionamiento y el agitador. La masa del recipiente de contacto es de 17162 kg y su altura total es de 7,24 m. La velocidad de rotación del agitador llega a 55 r.p.m. y en régimen permanente, su corriente está entre 30 y 40 A.

Se tienen mediciones de accionamientos eléctricos en las secciones del tanque de contacto, que consiste en un recipiente con agitador llenado a flujo variable y de este enviado a la sección de unas claves enfriadoras. La otra sección representa la llamada cola o suspensión de sólido residual o desecho lixiviado, enviado desde la planta de Lixiviación a la planta de Recuperación de Amoníaco con alto contenido de NH<sub>3</sub>, de igual forma se bombea esta cola desde esta planta a un dique almacenador con bajo contenido de NH<sub>3</sub>. En esta última sección es favorable la realización de mediciones por ser más noble el proceso tecnológico.

## 1.5- Características del accionamiento escogido

El accionamiento escogido en la planta de accionamiento esta compuesto por un motor de inducción y un variador de velocidad altivar 68 de Telemecanique. Los datos de chapa del motor son: Potencia activa 40Kw, Corriente 64A, Velocidad 1200Rev/min y tensión de 480v. Los datos de chapa del variador son:

Ur= 480V

Ui=440V

Iow=4545Ka1seg/112,5Ka

Ip=52A

Fr=60Hz

### Características del variador:

El Altivar 68 es un convertidor de frecuencia para motores asíncronos de elevada potencia, alimentados por una tensión trifásica 380 V a 500 V para las potencias comprendidas entre 75 y 630kW. El Altivar 68 presenta los últimos avances tecnológicos y realiza las funciones necesarias para las aplicaciones más corrientes, especialmente:

- Ventilación,
- Climatización
- Bombas
- Transporte
- Triturado
- Mantención

Este variador resulta fácil de configurar gracias al terminal de programación y cuenta con pre-configuraciones a medida (macros) cuyos parámetros básicos se pueden modificar libremente para crear funciones adicionales.

A pesar de sus amplias prestaciones, el variador Altivar 68 se ajusta de forma sencilla. Para obtener un fuerte torque y una óptima calidad de accionamiento, incluso a velocidades de rotación mínimas (< 0,5 Hz), basta con introducir los valores de la placa del motor y realizar un ajuste automático.

*Sistema experto de eficiencia en accionamientos con variadores de velocidad en la Empresa Cmdte. Ernesto Che Guevara de Moa.*



Opciones completas y variadas permiten su adaptación y su integración en las instalaciones eléctricas y en los automatismos complejos: Inductancias de línea, filtros RFI, inductancias motor, puentes de diodos para versión 12 pulsos (ya integrado en los calibres mayores), kit de consola remota, unidad de freno opcional, tarjetas de E/S adicionales, etc.

## Funciones

El Altivar 68 cuenta con las siguientes funciones principales:

- 4 Macro configuraciones de funciones (más de 12 aplicaciones preconfiguradas).
- 4 niveles de ahorro de energía.
- Controlador PID integrado (caudal, presión, corrección de velocidad).
- Protecciones del motor y del variador.
- Hasta 7 velocidades preseleccionadas, marcha paso a paso (JOG).
- Recuperación automática con búsqueda de velocidad (retoma al vuelo).
- Fuerte sobrepar de arranque con limitación.
- Secuencia de control de freno.
- Más/menos velocidad.
- Frecuencias ocultas.
- Función freno integrada sin necesidad del freno opcional.
- Adaptación de la limitación de corriente en función de la velocidad, temperatura.



Figura 1.4 Variador de velocidad altivar 68

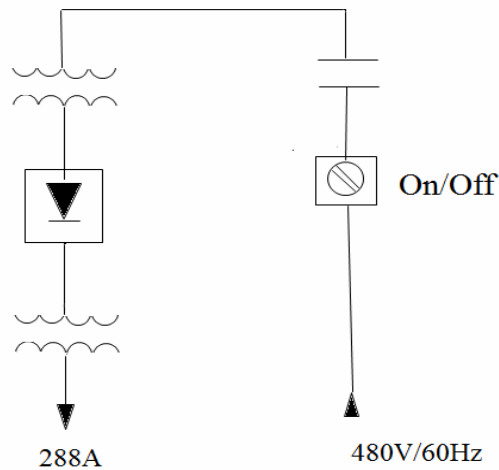


Figura 1.5 Esquema del Variador de velocidad Altivar 68

### Características del controlador PID:

El control cuadrático o Pid. Se utiliza para bombas y ventiladores centrífugos con el objetivo de aumentar la eficiencia del accionamiento y disminuir el ruido acústico.

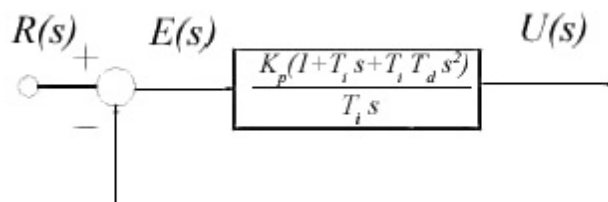
La ecuación de este control es:

$$u(t) = K_p e(t) + \frac{K_p}{T_i} \int_0^t e(t) \delta t + K_p T_d \frac{\delta e(t)}{\delta t}$$

Su función de transferencia es:

$$\frac{U(s)}{E(s)} = K_p \left( 1 + \frac{1}{T_i s} + T_d s \right)$$

Su representación en diagrama de bloques es:



Los controladores PID se usan ampliamente en control industrial, desde una perspectiva moderna, un controlador PID es simplemente un controlador de segundo

orden con integración. Históricamente, los controladores PID se ajustaban en términos de sus componentes P, I y D. Su estructura ha mostrado empíricamente ofrecer suficiente flexibilidad para dar excelentes resultados en muchas aplicaciones. El término básico en el controlador PID es el proporcional P, que origina una actuación de control correctiva proporcional al error. El término integral I brinda una corrección proporcional a la integral del error.

Esta acción tiene la ventaja de asegurar que en última instancia se aplicará suficiente acción de control para reducir el error de regulación a cero. Sin embargo, la acción integral también tiene un efecto desestabilizador debido al corrimiento de fase agregado. El término derivativo D da propiedades predictivas a la actuación, generando una acción de control proporcional a la velocidad de cambio del error. Tiende a dar más estabilidad al sistema pero suele generar grandes valores en la señal de control. Varios métodos empíricos pueden usarse para determinar los parámetros de un PID para una aplicación dada.

## 1.6- Conclusiones

- Los variadores de velocidad en los accionamientos de bombas centrífugas para el transporte de pulpa laterítica en el proceso CARON se justifica por la variabilidad de la carga mecánica en el árbol de los motores eléctricos, dada la diversidad de la densidad de la pulpa.
- Constituye un modelo complejo, el grupo Inversor Sinusoidal de Tensión-Motor de Inducción-Bomba Centrifuga, que necesita de un diagnostico permanente en línea para cuidar de sus parámetros de explotación y tiempo de vida útil.
- Las variables mas importantes que participan en la evaluación de la eficiencia de los accionamientos son: potencia activa de entrada del variador de velocidad, corriente de línea, tensión de línea, velocidad de rotación del motor, caudal o gasto de la bomba centrífuga, altura de carga de la bomba centrífuga y diferencia de presiones de succión e impulsión en la línea de descarga de la bomba centrífuga.

# CAPITULO II

## Capítulo II: Fundamentos sobre Sistemas expertos.

### 2.1- Introducción

Los sistemas expertos son programas que reproducen el proceso intelectual de un experto humano en un campo particular, pudiendo mejorar su productividad, ahorrar tiempo y dinero, conservar sus valiosos conocimientos y difundirlos más fácilmente.

A la vez, el usuario puede aprender observando el comportamiento del sistema. Es decir, los sistemas expertos se pueden considerar simultáneamente como un medio de ejecución y transmisión del conocimiento. Lo que se intenta, de esta manera, es representar los mecanismos heurísticos que intervienen en un proceso de descubrimiento. Estos mecanismos forman ese conocimiento difícil de expresar que permite que los expertos humanos sean eficaces calculando lo menos posible. Los sistemas expertos contienen ese "saber hacer".

### 2.2- Historia de los sistemas expertos

A comienzos de los años 50 el conocido Alan Mathinson Turing publicó "Inteligencia y Funcionamiento de las Máquinas" con el fin de demostrar hasta que punto estas tienen inteligencia. En estos años se dieron varias definiciones de lo que significaba la inteligencia en una máquina. Sobre lo que denominamos la inteligencia artificial.

Definición de Elaim Reich:

La inteligencia artificial es el estudio de como hacer que los ordenadores hagan cosas que, en estos momentos, hace mejor el hombre.

Definición de Alexander Sport (1971):

En su obra "Sports-Computerbuch": Bajo Inteligencia entiendo la capacidad de un ser vivo o una máquina de ordenar informaciones, extensas observaciones, experiencias, descubrir interrelaciones para abstraer de esta forma cosas y poderlas ligar entre sí.

Uno de los primeros sistemas expertos se llamo Dendral y era capaz de calcular o descubrir hechos relativos a la estructura molecular a partir de unos datos químicos sin elaborar. Otros sistemas expertos famosos son MYCIN que diagnostica enfermedades de la sangre y que sugiere un tratamiento y PUFF, un sistema similar pero para

enfermedades de pulmón. En el año 1950 el campo de la automática recibe un gran impulso cuando Wiener desarrolla el principio de la retroalimentación. La teoría de la retroalimentación es base fundamental de los sistemas de control.

En 1955 Newell y Simon desarrollan la Teoría de la lógica. Este desarrollo permitió desarrollar un programa que exploraba la solución a un problema utilizando ramas y nudos, seleccionando únicamente las ramas que más parecían acercarse a la solución correcta del problema.

En 1956, se celebra una conferencia en Vermont (USA) de gran trascendencia en el desarrollo de la I.A. John McCarthy propone por primera vez el uso del término "Inteligencia Artificial" para denominar el estudio del tema.

En 1957, aparece la primera versión de "The General Problem Solver" (GPS, Solucionador general de problemas), un programa capaz de solucionar problemas de sentido común pero no problemas del mundo real como diagnósticos médicos. El GPS utilizaba la teoría de la retroalimentación de Wiener.

En 1958 McCarthy anuncia su nuevo desarrollo el lenguaje LISP (List Processing), el lenguaje de elección para todos aquellos desarrolladores inmersos en el estudio de la IA.

En 1963, el Instituto Tecnológico de Massachusetts (MIT) recibe una subvención de 2,2 millones de dólares del gobierno de los Estados Unidos en concepto de investigación en el campo de la IA. De esa forma, se comprueba la importancia que el Gobierno concede a la investigación dentro de ese campo. En 1965 aparece DENDRAL, el primer sistema experto. Es en ese año cuando Feigenbaum entra a formar parte del departamento de informática de Stanford. Allí conoció a Joshua Lederberg, el cual quería averiguar cual era la estructura de las moléculas orgánicas completas. El objetivo de DENDRAL fue estudiar un compuesto químico. El descubrimiento de la estructura global de un compuesto exigía buscar en un árbol las posibilidades, y por esta razón su nombre es DENDRAL que significa en griego "árbol". Antes de DENDRAL los químicos solo tenían una forma de resolver el problema, estar era tomar unas hipótesis relevantes como soluciones posibles, y someterlas a prueba comparándolas con los datos. La realización de DENDRAL duró más de diez años (1965-1975).

En 1965 también se empezaron a utilizar técnicas para la resolución de problemas que se caracterizaban por la búsqueda heurística como modelo para la resolución de problemas, y con ellas comenzó la investigación y desarrollo de los sistemas expertos.

En 1972, en la Universidad de Stanford se desarrolla MYCIN, sistema experto dentro del campo de la medicina para diagnóstico de enfermedades infecciosas en la sangre. MYCIN se trataba de un sistema experto para el diagnóstico de enfermedades infecciosas. Desde los resultados de análisis de sangre, cultivos bacterianos y demás datos, el programa era capaz de determinar, o en lo menos, sugerir el microorganismo que estaba causando la infección. Después de llegar a una conclusión, MYCIN prescribía una medicación que se adaptaba perfectamente a las características de la persona, tales como el peso corporal de este.

En 1972 aparece el lenguaje PROLOG basado en las teorías de Minsky. En 1973 se desarrolla el sistema experto llamado TIERESIAS. El cometido de este sistema experto era el de servir de intérprete entre MYCIN y los especialistas que lo manejaban, a la hora introducir nuevos conocimientos en su base de datos. El especialista debía utilizar MYCIN de una forma normal, y cuando este cometiera un error en un diagnóstico (hecho producido por la falta o fallo de información en el árbol de desarrollo de teorías) TEIRESIAS corregiría dicho fallo destruyendo la regla si es falsa o ampliándola si es eso lo que se necesita.

En 1979 aparece XCON, primer programa que sale del laboratorio Su usuario fue la Digital Equipment Corporation (DEC). El cometido de XCON sería configurar todos los ordenadores que saliesen de la DEC.

En abril de 1979 el equipo de investigación que lo había diseñado pensó que ya estaba preparado para salir, y fue entonces, cuando se hizo una prueba real, esperando resolver positivamente un 95% de las configuraciones, este porcentaje tal alto se quedó en un 20% al ser contrastado con la realidad; XCON volvió al laboratorio, donde fue revisado y a finales de ese mismo año funcionó con resultados positivos en la DEC.

En 1980 se instauró totalmente en DEC. Y en 1984, el XCOM había crecido hasta multiplicarse por diez. El XCOM supuso un ahorro de cuarenta millones de dólares al año para la DEC.

Entre los años 80 a 85 se produce la revolución de los Sistemas Expertos. En estos 5 años se crearon diversos sistemas expertos como el DELTA, de General Electric Company, para la reparación de locomotoras diesel y eléctricas. "Aldo en Disco" para la reparación de calderas hidrostáticas giratorias usadas para la eliminación de bacterias. Se crearon multitud de empresas dedicadas a los sistemas expertos como Teknowledge Inc., Carnegie Group, Symbolics, Lisp Machines Inc., Thinking Machines Corporation, Cognitive Systems Inc. formando una inversión total de 300 millones de dólares. Los productos más importantes que creaban estas nuevas compañías eran las "máquinas Lisp", que se trataba de unos ordenadores que ejecutaban programas LISP con la misma rapidez que en un ordenador central, y el otro producto fueron las "herramientas de desarrollo de sistemas expertos".

En 1987 XCON empieza a no ser rentable. Los técnicos de DEC tuvieron que actualizar XCOM rápidamente llegándose a gastar más de dos millones de dólares al año para mantenimiento y algo parecido ocurrió con el DELTA. También en 1987 aparecieron los microordenadores Apple y compatibles IBM con una potencia parecida a los LISP. El software se transfirió a máquinas convencionales utilizando el lenguaje "C" lo que acabó con el LISP.

A partir de los 90 y con el desarrollo de la informática, se produce un amplio desarrollo en el campo de la IA y los sistemas expertos, pudiéndose afirmar que estos se han convertido en una herramienta habitual en determinadas empresas en la actualidad.

La evolución histórica de los métodos utilizados en el desarrollo de los sistemas expertos también se ha producido a medida que se ha ido desarrollando la IA y los diferentes métodos que se han empleado para su resolución. El desarrollo de lenguajes como LISP y PROLOG condicionó esa evolución, así como investigaciones en diversos campos relacionados. Los primeros sistemas expertos que se desarrollaron en los años 60 eran capaces de resolver solo problemas basados en situaciones determinadas, mediante sistemas de reglas. Es a partir de los 70 cuando se empiezan a resolver problemas basados en situaciones inciertas, basados en medidas difusas (sistema experto Difuso), al principio y en redes probabilísticas con posterioridad (redes neuronales).



## 2.3- Principios del sistema experto

Los sistemas expertos forman parte de un firme y verdadero avance en inteligencia artificial. Los sistemas expertos pueden incorporar miles de reglas. Para una persona seria una experiencia casi "traumática" el realizar una búsqueda de reglas posibles al completado de un problema y concordar estas con las posibles consecuencias, mientras que se sigue en un papel los trazos de un árbol de búsqueda. Los sistemas expertos realizan amablemente esta tarea; mientras que la persona responde a las preguntas formuladas por el sistema experto, este busca recorriendo las ramas más interesantes del árbol, hasta dar con la respuesta al problema, o en su falta, la más parecida a esta. Los sistemas expertos tienen la ventaja frente a otros tipos de programas de Inteligencia Artificial, de proporcionar gran flexibilidad a la hora de incorporar nuevos conocimientos. Para ello solo tenemos que introducir la nueva regla que deseemos hacer constar, sin necesidad de cambiar el funcionamiento propio del programa.

Los sistemas expertos son "auto explicativos", al contrario que los programas convencionales, en los que el conocimiento como tal está encriptado junto al propio programa en forma de lenguaje de ordenador. Los expertos de I.A. dicen que los sistemas expertos tienen conocimiento declarativo, mientras que en los demás programas es procedural.

Para realizar un sistema experto se necesitan al menos dos personas el Experto del Dominio (profesional X) y un Ingeniero de Conocimiento (programador), que estos van enlazar sus experiencias almacenándolos en la Base de conocimientos que mediante la interface va a permitir al usuario llegar a comunicarse con el motor de inferencia, el cual va a tomar la decisión de aplicar todo lo almacenado en la base de conocimientos.

La Base de conocimiento nos halla la base datos y esta está compuesta por lenguajes de predicado, este es uno de los componentes que contiene el conocimiento del experto o también llamado base de datos, su función es almacenar experiencias, conocimientos, etc. de una determinada área.

Existen dos tipos de base de conocimiento:

El procedural:

*Sistema experto de eficiencia en accionamientos con variadores de velocidad en la Empresa Cmdte. Ernesto Che Guevara de Moa.*

Se usa en los lenguajes estructurados, como son Pascal, C, Visual Basic etc.

#### El declarativo:

Está basado en hechos que vienen a ser acciones que se dan dentro del problema se utilizan los lenguajes Prolog y Lisp.

## 2.4- Arquitectura y funcionamiento de los sistemas expertos

No existe una estructura de sistema experto común. Sin embargo, la mayoría de los sistemas expertos tienen unos componentes básicos: base de conocimientos, motor de inferencia, base de datos e interfaz con el usuario. Muchos tienen, además, un módulo de explicación y un módulo de adquisición del conocimiento.

La base de conocimientos contiene el conocimiento especializado extraído del experto en el dominio. Es decir, contiene conocimiento general sobre el dominio en el que se trabaja. El método más común para representar el conocimiento es mediante reglas de producción. El dominio de conocimiento representado se divide en pequeñas fracciones de conocimiento o reglas SI ... ENTONCES (If...Then). Cada regla constará de una parte denominada condición y de una parte denominada acción, y tendrá la forma:

SI condición ENTONCES acción. Como ejemplo se puede considerar la siguiente regla médica:

SI el termómetro marca 39° Y el termómetro funciona correctamente ENTONCES el paciente tiene fiebre

Una característica muy importante es que la base de conocimientos es independiente del mecanismo de inferencia que se utiliza para resolver los problemas. De esta forma, cuando los conocimientos almacenados se han quedado obsoletos, o cuando se dispone de nuevos conocimientos, es relativamente fácil añadir reglas nuevas, eliminar las antiguas o corregir errores en las existentes. No es necesario reprogramar todo el sistema experto.

Las reglas suelen almacenarse en alguna secuencia jerárquica lógica, pero esto no es estrictamente necesario. Se pueden tener en cualquier secuencia y el motor de inferencia las usará en el orden adecuado que necesite para resolver un problema.

Una base de conocimientos muy ingenua, para identificar vehículos, podría ser la siguiente:

*Sistema experto de eficiencia en accionamientos con variadores de velocidad en la Empresa Cmdte. Ernesto Che Guevara de Moa.*

Regla 1: SI tiene 2 ruedas Y utiliza moto ENTONCES es una motocicleta.

Regla 2: SI tiene 2 ruedas Y es movido por el hombre ENTONCES es una bicicleta.

Regla 3: SI tiene 4 ruedas Y utiliza motor Y pesa menos de 3500 Kg ENTONCES es un coche.

Existen reglas de producción que no pertenecen al dominio del problema. Estas reglas se llaman metarreglas (reglas sobre otras reglas) y su función es indicar bajo qué condiciones deben considerarse unas reglas en vez de otras. Un ejemplo de metarregla es:

SI hay reglas que usan materias baratas Y hay reglas que usan materias caras ENTONCES usar antes las primeras que las segundas.

### **Arquitectura básica de los sistemas expertos**

Base de conocimientos: Es la parte del sistema experto que contiene el conocimiento sobre el dominio. Hay que obtener el conocimiento del experto y codificarlo en la base de conocimientos. Una forma clásica de representar el conocimiento en un sistema experto son las reglas. Una regla es una estructura condicional que relaciona lógicamente la información contenida en la parte del antecedente con otra información contenida en la parte del consecuente.

Base de hechos (Base de datos): es una parte de la memoria del ordenador que se utiliza para almacenar los datos recibidos inicialmente para la resolución de un problema. Contiene conocimiento sobre el caso concreto en que se trabaja. También se registrarán en ella las conclusiones intermedias y los datos generados en el proceso de inferencia. Al memorizar todos los resultados intermedios, conserva el vestigio de los razonamientos efectuados; por lo tanto, se puede utilizar explicar las deducciones y el comportamiento del sistema.

Motor de inferencia: El sistema experto modela el proceso de razonamiento humano con un módulo conocido como el motor de inferencia. Dicho motor de inferencia trabaja

*Sistema experto de eficiencia en accionamientos con variadores de velocidad en la Empresa Cmdte. Ernesto Che Guevara de Moa.*

con la información contenida en la base de conocimientos y la base de hechos para deducir nuevos hechos. Contrasta los hechos particulares de la base de hechos con el conocimiento contenido en la base de conocimientos para obtener conclusiones acerca del problema.

Subsistema de explicación: Una característica de los sistemas expertos es su habilidad para explicar su razonamiento. Usando el módulo del subsistema de explicación, un sistema experto puede proporcionar una explicación al usuario de por qué está haciendo una pregunta y cómo ha llegado a una conclusión. Este módulo proporciona beneficios tanto al diseñador del sistema como al usuario. El diseñador puede usarlo para detectar errores y el usuario se beneficia de la transparencia del sistema.

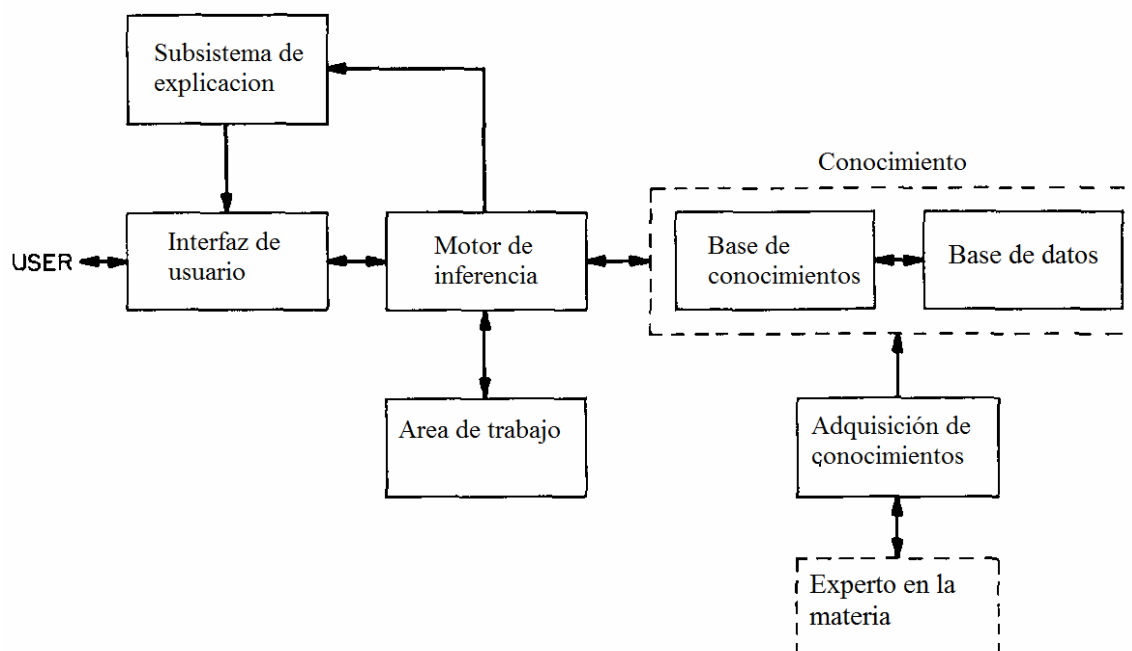


Figura 2.1 Esquema del diseño de un sistema experto.

Interfaz de usuario: La interacción entre un sistema experto y un usuario se realiza en lenguaje natural. También es altamente interactiva y sigue el patrón de la conversación entre seres humanos. Para conducir este proceso de manera aceptable para el usuario es especialmente importante el diseño del interfaz de usuario. Un requerimiento básico del interfaz es la habilidad de hacer preguntas. Para obtener información fiable del usuario hay que poner especial cuidado en el diseño de las cuestiones. Esto puede requerir diseñar el interfaz usando menús o gráficos interacción.

*Sistema experto de eficiencia en accionamientos con variadores de velocidad en la Empresa Cmdte. Ernesto Che Guevara de Moa.*

## **Resumen del funcionamiento de un SE.**

El motor de inferencias: es un programa que controla el proceso de razonamiento que seguirá el sistema experto. Utilizando los datos que se le suministran, recorre la base de conocimientos para alcanzar una solución. La estrategia de control puede ser de encadenamiento progresivo o de encadenamiento regresivo. En el primer caso se comienza con los hechos disponibles en la base de datos, y se buscan reglas que satisfagan esos datos, es decir, reglas que verifiquen la parte SI. Normalmente, el sistema sigue los siguientes pasos:

1. Evaluar las condiciones de todas las reglas respecto a la base de datos, identificando el conjunto de reglas que se pueden aplicar (aquellas que satisfacen su parte condición).
2. Si no se puede aplicar ninguna regla, se termina sin éxito; en caso contrario se elige cualquiera de las reglas aplicables y se ejecuta su parte acción (esto último genera nuevos hechos que se añaden a la base de datos).
3. Si se llega al objetivo, se ha resuelto el problema; en caso contrario, se vuelve al paso 1.

A este enfoque se le llama también guiado por datos, porque es el estado de la base de datos el que identifica las reglas que se pueden aplicar. Cuando se utiliza este método, el usuario comenzará introduciendo datos del problema en la base de datos del sistema. Al encadenamiento regresivo se le suele llamar guiado por objetivos, ya que, el sistema comenzará por el objetivo (parte acción de las reglas) y operará retrocediendo para ver cómo se deduce ese objetivo partiendo de los datos. Esto se produce directamente o a través de conclusiones intermedias o subobjetivos. Lo que se intenta es probar una hipótesis a partir de los hechos contenidos en la base de datos y de los obtenidos en el proceso de inferencia.

En la mayoría de los sistemas expertos se utiliza el encadenamiento regresivo. Este enfoque tiene la ventaja de que el sistema va a considerar únicamente las reglas que

interesan al problema en cuestión. El usuario comenzará declarando una expresión E y el objetivo del sistema será establecer la verdad de esa expresión.

Para ello se pueden seguir los siguientes pasos:

1. Obtener las reglas relevantes, buscando la expresión E en la parte acción (éstas serán las que puedan establecer la verdad de E).
2. Si no se encuentran reglas para aplicar, entonces no se tienen datos suficientes para resolver el problema; se termina sin éxito o se pide al usuario más datos.
3. Si hay reglas para aplicar, se elige una y se verifica su parte condición C con respecto a la base de datos.
4. Si C es verdadera en la base de datos, se establece la veracidad de la expresión E y se resuelve el problema.
5. Si C es falsa, se descarta la regla en curso y se selecciona otra regla.
6. Si C es desconocida en la base de datos (es decir, no es verdadera ni falsa), se le considera como sub-objetivo y se vuelve al paso 1 (C será ahora la expresión E).

Existen también enfoques mixtos en los que se combinan los métodos guiados por datos con los guiados por objetivos. El interfaz de usuario permite que el usuario pueda describir el problema al sistema experto. Interpreta sus preguntas, los comandos y la información ofrecida. A la inversa, formula la información generada por el sistema incluyendo respuestas a las preguntas, explicaciones y justificaciones. Es decir, posibilita que la respuesta proporcionada por el sistema sea inteligible para el interesado. También puede solicitar más información si le es necesaria al sistema experto. En algunos sistemas se utilizan técnicas de tratamiento del lenguaje natural para mejorar la comunicación entre el usuario y el sistema experto.

La mayoría de los sistemas expertos contienen un módulo de explicación, diseñado para aclarar al usuario la línea de razonamiento seguida en el proceso de inferencia. Si el usuario pregunta al sistema cómo ha alcanzado una conclusión, éste le presentará la

secuencia completa de reglas usada. Esta posibilidad de explicación es especialmente valiosa cuando se tiene la necesidad de tomar decisiones importantes amparándose en el consejo del sistema experto. Además, de esta forma, y con el tiempo suficiente, los usuarios pueden convertirse en especialistas en la materia, al asimilar el proceso de razonamiento seguido por el sistema. El subsistema de explicación también puede usarse para depurar el sistema experto durante su desarrollo.

El módulo de adquisición del conocimiento permite que se puedan añadir, eliminar o modificar elementos de conocimiento (en la mayoría de los casos reglas) en el sistema experto. Si el entorno es dinámico es muy necesario, puesto que, el sistema funcionará correctamente sólo si se mantiene actualizado su conocimiento. El módulo de adquisición permite efectuar ese mantenimiento, anotando en la base de conocimientos los cambios que se producen.

## 2.5- Aplicaciones de los sistemas expertos

Un sistema experto es muy eficaz cuando tiene que analizar una gran cantidad de información, interpretándola y proporcionando una recomendación a partir de la misma. UN ejemplo es el análisis financiero, donde se estudian las oportunidades de inversión, dependiendo de los datos financieros de un cliente y de sus propósitos.

Para detectar y reparar fallos en equipos electrónicos, se utilizan los sistemas expertos de diagnóstico y depuración, que formulan listas de preguntas con las que obtienen los datos necesarios para llegar a una conclusión. Entonces recomiendan las acciones adecuadas para corregir los problemas descubiertos. Este tipo de sistemas se utilizan también en medicina (ej. MYCIN y PUFF), y para localizar problemas en sistemas informáticos grandes y complejos.

Los sistemas expertos son buenos para predecir resultados futuros a partir del conocimiento que tienen. Los sistemas meteorológicos y de inversión en bolsa son ejemplos de utilización en este sentido.

La planificación es la secuencia de acciones necesaria para lograr una meta. Conseguir una buena planificación a largo plazo es muy difícil. Por ello, se usan sistemas expertos para gestionar proyectos de desarrollo, planes de producción de

fábricas, estrategia militar y configuración de complejos sistemas informáticos, entre otros.

Cuando se necesita controlar un proceso tomando decisiones como respuesta a su estado y no existe una solución algorítmica adecuada, es necesario usar un sistema experto. Este campo comprende el supervisar fábricas automatizadas, factorías químicas o centrales nucleares. Estos sistemas son extraordinariamente críticos porque normalmente tienen que trabajar a tiempo real.

El diseño requiere una enorme cantidad de conocimientos debido a que hay que tener en cuenta muchas especificaciones y restricciones. En este caso, el sistema experto ayuda al diseñador a completar el diseño de forma competente y dentro de los límites de costes y de tiempo. Se diseñan circuitos electrónicos, circuitos integrados, tarjetas de circuito impreso, estructuras arquitectónicas, coches, piezas mecánicas, etc. Por último, un sistema experto puede evaluar el nivel de conocimientos y comprensión de un estudiante, y ajustar el proceso de aprendizaje de acuerdo con sus necesidades.

### **Uso de los sistemas expertos según el tipo de problema**

Interpretación: deducir situaciones a partir de datos observados Análisis de imágenes, reconocimiento del habla, inversiones financieras.

Predicción: Inferir posibles consecuencias a partir de una situación Predicción meteorológica, previsión del tráfico, evolución de la Bolsa Diagnóstico Deducir fallos a partir de sus efectos Diagnóstico médico, detección de fallos en electrónica

Diseño: Configurar objetos bajo ciertas especificaciones Diseño de circuitos, automóviles, edificios, etc.

Planificación: desarrollar planes para llegar a unas metas Programación de proyectos e inversiones, planificación militar.

Depuración: Prescribir remedios para funcionamientos erróneos Desarrollo de software y circuitos electrónicos.

Reparación: efectuar lo necesario para hacer una corrección Reparar sistemas informáticos, automóviles, etc.

Instrucción: diagnóstico, depuración y corrección de una conducta Corrección de errores, enseñanza.



Control: mantener un sistema por un camino previamente trazado. Interpreta, predice y supervisa su conducta Estrategia militar, control de tráfico aéreo.

### **Ventajas de los SE:**

El acceso al conocimiento y al juicio de un experto es extremadamente valioso en muchas ocasiones (prospecciones petrolíferas, manejo de valores bursátiles, diagnóstico de enfermedades, etc.), sin embargo, en la mayoría de los campos de actividad existen más problemas por resolver que expertos para resolverlos. Para solucionar este desequilibrio es necesario utilizar un sistema experto. En general, actuará como ayudante para los expertos humanos y como consultor cuando no se tiene otro acceso a la experiencia.

Un sistema experto, además, mejora la productividad al resolver y decidir los problemas más rápidamente. Esto permite ahorrar tiempo y dinero. A veces sin esa rapidez las soluciones obtenidas serían inútiles.

Los valiosos conocimientos de un especialista se guardan y se difunden, de forma que, no se pierden aunque desaparezca el especialista. En los sistemas expertos se guarda la esencia de los problemas que se intenta resolver y se programa cómo aplicar los conocimientos para su resolución. Ayudan a entender cómo se aplican los conocimientos para resolver un problema. Esto es útil porque normalmente el especialista da por ciertos sus conocimientos y no analiza cómo los aplica.

Se pueden utilizar personas no especializadas para resolver problemas. Además si una persona utiliza regularmente un sistema experto aprenderá de el, y se aproximará a la capacidad del especialista.

Con un sistema experto se obtienen soluciones más fiables gracias al tratamiento automático de los datos, y más contrastadas, debido a que se suele tener informatizado el conocimiento de varios expertos.

Debido a la separación entre la base de conocimiento y el mecanismo de inferencia, los sistemas expertos tienen gran flexibilidad, lo que se traduce en una mejor modularidad, modificabilidad y legibilidad del conocimiento.

Otra ventaja es que este tipo de sistemas pueden utilizar razonamiento aproximado para hacer deducciones y que pueden resolver problemas sin solución algorítmica.

### **Desventajas de los SE:**

Los sistemas expertos también tienen inconvenientes. El conocimiento humano es complejo de extraer y, a veces, es problemático representarlo. Si un problema sobrepasa la competencia de un sistema experto, sus prestaciones se degradan de forma notable. Además, las estrategias de razonamiento de los motores de inferencia suelen estar programadas procedimentalmente y se adaptan mal a las circunstancias. Están limitados para tratar problemas con información incompleta.

Un experto humano no estudia progresivamente una hipótesis, sino que decide de inmediato cuando se enfrenta a una situación análoga a otra ocurrida en el pasado. Los sistemas expertos no utilizan este razonamiento por analogía.

Los costes y duración del desarrollo de un sistema experto son bastante considerables (aunque se suelen amortizar rápidamente) y su campo de aplicación actual es restringido y específico. Finalmente, hay que tener en cuenta los problemas sociales que acarrearán al ser humano, susceptibles de influir en la estructura y número de empleos.

### **2.6- Conclusiones**

- La evaluación de la eficiencia del Accionamiento Eléctrico puede ser implementada mediante un Sistema Experto que incluya los algoritmos mostrados en este capítulo que puede ser construida a través del uso de las técnicas de Inteligencia artificial tales como la Lógica Difusa o las Redes Neuronales.
- Es factible incluir las pérdidas que ocasionan los componentes de todo el sistema de Accionamiento Eléctrico, incluyendo la calidad de la onda sinusoidal del Variador de Velocidad.

# CAPITULO III

## Capítulo III: Técnicas de inteligencia artificial.

### 3.1- Introducción

La lógica difusa es un tipo de lógica que reconoce más que simples valores verdaderos y falsos. Con lógica difusa, las proposiciones pueden ser representadas con grados de veracidad o falsedad. Por ejemplo, la sentencia "hoy es un día soleado", puede ser 100% verdad si no hay nubes, 80% verdad si hay pocas nubes, 50% verdad si existe neblina y 0% si llueve todo el día.

La Lógica Difusa ha sido probada para ser particularmente útil en sistemas expertos y otras aplicaciones de inteligencia artificial. Es también utilizada en algunos correctores de voz para sugerir una lista de probables palabras a reemplazar en una mal dicha. La Lógica Difusa, que hoy en día se encuentra en constante evolución, nació en los años 60 como la lógica del razonamiento aproximado, y en ese sentido podía considerarse una extensión de la Lógica Multivaluada. La Lógica Difusa actualmente está relacionada y fundamentada en la teoría de los Conjuntos Difusos. Según esta teoría, el grado de pertenencia de un elemento a un conjunto va a venir determinado por una función de pertenencia, que puede tomar todos los valores reales comprendidos en el intervalo  $[0,1]$ .

### 3.2- Historia de la lógica difusa

Los conjuntos difusos fueron introducidos por primera vez en 1965; la creciente disciplina de la lógica difusa provee por sí misma un medio para acoplar estas tareas. En cierto nivel, la lógica difusa puede ser vista como un lenguaje que permite trasladar sentencias sofisticadas en lenguaje natural a un lenguaje matemático formal. Mientras la motivación original fue ayudar a manejar aspectos imprecisos del mundo real, la práctica temprana de la lógica difusa permitió el desarrollo de aplicaciones prácticas. Aparecieron numerosas publicaciones que presentaban los fundamentos básicos con aplicaciones potenciales. Esta frase marcó una fuerte necesidad de distinguir la lógica difusa de la teoría de probabilidad. Tal como la entendemos ahora, la teoría de conjuntos difusos y la teoría de probabilidad tienen diferentes tipos de incertidumbre.

En 1994, la teoría de la lógica difusa se encontraba en la cumbre, pero esta idea no es nueva, para muchos, estuvo bajo el nombre de lógica difusa durante 25 años, pero sus orígenes se remontan hasta 2,500 años. Aún Aristóteles consideraba que existían ciertos grados de veracidad y falsedad. Platón había considerado ya grados de pertenencia.

En el siglo XVIII el filósofo y obispo anglicano Irlandés, George Berkeley y David Hume describieron que el núcleo de un concepto atrae conceptos similares. Hume en particular, creía en la lógica del sentido común, el razonamiento basado en el conocimiento que la gente adquiere en forma ordinaria mediante vivencias en el mundo. En Alemania, Immanuel Kant, consideraba que solo los matemáticos podían proveer definiciones claras, y muchos principios contradictorios no tenían solución. Por ejemplo la materia podía ser dividida infinitamente y al mismo tiempo no podía ser dividida infinitamente. Particularmente la escuela americana de la filosofía llamada pragmatismo fundada a principios de siglo por Charles Sanders Pierce, cuyas ideas se fundamentaron en estos conceptos, fue el primero en considerar "vaguedades", más que falso o verdadero, como forma de acercamiento al mundo y a la forma en que la gente funciona.

La idea de que la lógica produce contradicciones fue popularizada por el filósofo y matemático británico Bertrand Russell, a principios del siglo XX. Estudio las vaguedades del lenguaje, concluyendo con precisión que la vaguedad es un grado. El filósofo austríaco Ludwig Wittgenstein estudió las formas en las que una palabra puede ser empleada para muchas cosas que tienen algo en común. La primera lógica de vaguedades fue desarrollada en 1920 por el filósofo Jan Lukasiewicz, visualizó los conjuntos con un posible grado de pertenencia con valores de 0 y 1, después los extendió a un número infinito de valores entre 0 y 1. En los años sesentas, Lofti Zadeh inventó la lógica difusa, que combina los conceptos de la lógica y de los conjuntos de Lukasiewicz mediante la definición de grados de pertenencia.

### 3.3- Sistemas Difusos

#### Conceptos básicos

Un sistema difuso está compuesto por varios elementos que a continuación se detallan.

### Variables lingüísticas.

Básicamente, una variable lingüística constituye el concepto que se califica de forma difusa y estas son el centro de las técnicas de modelado difuso. Una variable lingüística es el nombre de uno o varios conjuntos difusos. Le aplicamos el adjetivo "lingüística" porque se definen sus características mediante el lenguaje hablado. Ejemplos de estas variables lingüísticas son:

Una variable lingüística encapsula las propiedades que se quiere clasificar o definir. Esto generalmente se traduce en que las variables lingüísticas son sustantivos que reflejan determinada propiedad.

### Etiquetas

Básicamente, una etiqueta constituye una de las diferentes clasificaciones que se efectúan sobre la variable lingüística. Cada etiqueta se asocia por tanto a una variable lingüística y tendrá un conjunto difuso asociado.

Una etiqueta encapsula una clasificación posible de los valores de la variable lingüística. Esto generalmente se traduce en que las variables lingüísticas son adjetivos que caracterizan a un sustantivo que sería la variable lingüística.

### Universo de Discurso.

Básicamente constituye el rango de valores que pueden tomar los elementos que poseen la propiedad expresada por la variable lingüística. Generalmente, este universo del discurso puede venir dado por el rango de valores que toma una variable numérica para la variable lingüística.

Los elementos del dominio del discurso son, los valores numéricos que puede tomar el concepto definido como variable lingüística, y que pueden ser clasificados en cada una de las etiquetas que se han asociado a la variable lingüística en cuestión.

### Función de pertenencia

La Función de Pertenencia es un elemento esencial en la definición de los conjuntos difusos. Asocia a cada elemento de un conjunto difuso el grado con que pertenece a la etiqueta asociada. En los conjuntos clásicos los elementos están o no. Por ejemplo, si se define el conjunto de los números pares de una cifra, este quedaría definido como:

- Pares De Una Cifra = {2, 4, 6, 8}

Esto deja claramente establecido, de forma explícita, que los elementos 2, 4, 6 y 8 pertenecen al conjunto. También deja claramente establecido, en este caso de forma implícita, que los demás elementos no pertenecen al conjunto. Por ejemplo, los valores 1, 3, 5, 7, 9, 10, etc. no pertenecen al conjunto visto.

Otra manera de expresar esto, es dándole valor 1 a la pertenencia al conjunto, y valor 0 a la no pertenencia, quedando por ejemplo reflejado en la tabla:

Tabla 3.1

Valor	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Pertenencia a <b>Pares De Una Cifra</b>	<b>0</b>	<b>1</b>	<b>0</b>	<b>1</b>	<b>0</b>	<b>1</b>	<b>0</b>	<b>1</b>	<b>0</b>	<b>0</b>

De esta forma, el conjunto queda definido asignando valores de pertenencia a cada uno de los elementos. Esta misma información se puede mostrar en el siguiente gráfico.

Por ejemplo, un valor de 0.9 significa que es un elemento que casi se puede decir que cumple la propiedad definida por la etiqueta, mientras que un valor de 0.1 significa que el elemento del universo del discurso casi no cumple la propiedad y por eso es muy bajo su grado de pertenencia al conjunto. Un valor de 0.5 significa un valor medio de pertenencia, es decir que está en la mitad del camino entre "pertenecer" y "no pertenecer".

Resumiendo, los conjuntos difusos son caracterizados por sus funciones de pertenencia. Diremos que un conjunto es difuso cuando el concepto al que representa tiene una función de pertenencia difusa asociada a él.

### Dominio.

El dominio da el rango de definición de la función de pertenencia. De esta manera, es una manera de restringir el universo del discurso de cara a cada etiqueta. Esto quiere decir, que a través de restringir el dominio para cada etiqueta, se está diciendo que los que no están en ese intervalo definido como dominio, no pertenecen a la etiqueta, y sólo se tendrán en cuenta los casos que están dentro del dominio definido.

## 3.4- Funciones de pertenencia

Aunque en principio cualquier función sería válida para definir conjuntos difusos, en la práctica hay ciertas funciones típicas que siempre se suelen usar, tanto por la facilidad de computación que su uso conlleva como por su estructura lógica para definir su valor lingüístico asociado.

### Funciones de Pertenencia usuales

Las funciones de pertenencia se nombran normalmente como  $\mu(X)$  o  $M(X)$ .

#### Función puntual o singleton

Uno de los casos más simples es para modelar evaluaciones estrictas. Un tipo de función frecuentemente usada es la lineal o puntual definida como:

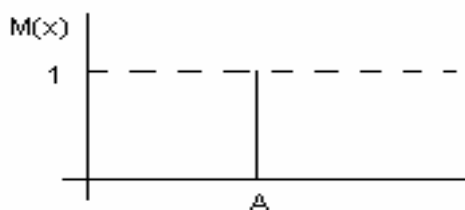


Figura 3.1 Función puntual o singleton

Formalmente quedaría:

$$M(X) = \begin{cases} 1 & \text{si } X = A \\ 0 & \text{si } X \neq A \end{cases}$$

Esta función se puede usar por ejemplo para evaluaciones estrictas como son:

- Igual a 7
- Igual a 23

Estas funciones pueden usarse en ocasiones para evaluar que se cumple un valor de referencia estricta, pero no son muy comunes. Una extensión de ellas es cuando se da un conjunto de valores en que la función vale 1, como podría ser la función Pares De Una Cifra vista antes, en que la pertenencia se daría explícitamente diciendo:

- Pertenencia es 1 para  $[2, 4, 6, 8]$
- Pertenencia es 0 en otros casos.

Esta es una de las funciones más simples, y sobretodo es útil para tratar conceptos de la forma en que lo hace la lógica clásica (sólo 0 o 1). Resumiendo, un conjunto de la lógica tradicional es expresable con una función de pertenencia. De hecho, la lógica



difusa es una extensión de la lógica tradicional y por tanto la incluye. Todas las reglas y propiedades de la lógica difusa son aplicables a la tradicional. En cierta manera, la lógica tradicional es una particularización de la difusa.

Así pues, como se dijo, un conjunto F de la lógica tradicional se puede expresar mediante un conjunto difuso cuya función de pertenencia sería:

En resumen, estas funciones formalmente quedarían:

$$\begin{aligned} M(X) &= 1 && \text{si } X \text{ pertenece al conjunto } F \\ &= 0 && \text{si } X \text{ no pertenece al conjunto } F \end{aligned}$$

### Saltos escalones estrictos

Como se dijo antes, las funciones de la lógica clásica se pueden expresar en la lógica difusa. Otro ejemplo son las funciones escalón estrictas, es decir, una función escalón centrada en el valor umbral de decisión.

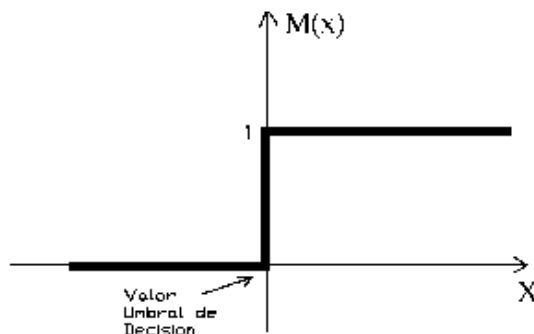


Figura 3.2 Saltos escalones estrictos

Esta función sirve por ejemplo para modelar conjuntos clásicos que se expresarían con etiquetas como las siguientes:

- Mayor o Igual que 0
- Mayor o Igual que 27

En estos casos la pertenencia sería:

- Pertenencia es 0 si X es menor que Valor Umbral De Decisión
- Pertenencia es 1 si X es mayor o igual que Valor Umbral De Decisión

Estas funciones escalón estricto ascendente formalmente quedarían:

$$\begin{aligned} M(X) &= 0 && \text{si } X < \text{Umbral} \\ &= 1 && \text{si } X \geq \text{Umbral} \end{aligned}$$

Aquí Valor Umbral De Decisión sería 0 o 27 según se quiera.

Igualmente se pueden modelar los escalones que decrecen como por ejemplo para modelar conjuntos clásicos que se expresarían con etiquetas como:

- Menor o Igual que 0
- Menor o Igual que 27

En estos casos la pertenencia sería:

- Pertenencia es 0 si X es mayor que Valor Umbral De Decisión
- Pertenencia es 1 si X es menor o igual que Valor Umbral De Decisión

Estas funciones escalón estricto descendente formalmente quedarían:

$$M(X) = \begin{cases} 1 & \text{si } X \leq \text{Umbral} \\ 0 & \text{si } X > \text{Umbral} \end{cases}$$

Aquí Valor Umbral De Decisión sería 0, 5, 16 o 27 según se quiera. Se verán más adelante como estas funciones se generalizan con algunas de las funciones que a continuación se describen.

### Función Gamma: Escalones crecientes

Esta función se representa en el siguiente gráfico, que hace que se le de el nombre de la letra griega Gamma  $\Gamma$  por su parecido con esta.

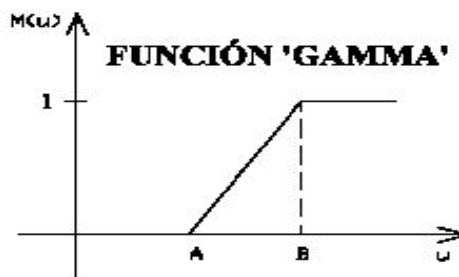


Figura 3.3 Función Gamma

Esta función es característica de las etiquetas que significa el adjetivo que caracteriza a los elementos mayores del universo del discurso. Por ejemplo, en el caso de la variable lingüística Altura, los elementos más altos del universo del discurso se clasifican como "altos". Para precisar este tipo de funciones hay que definir dos puntos:

- A: el valor por debajo del cual el grado de pertenencia es 0
- B: el valor por encima del cual el grado de pertenencia es 1

En el caso de la etiqueta "alta" para caracterizar a una persona en base a su altura, los valores de A y B pueden ser los siguientes, si tomamos en cuenta lo mismo usado en el ejemplo anterior:

- A = 1.7 m
- B = 1.9 m

Esto significa que:

- las personas por debajo de 1.7m no son altas (0 pertenencia a "altos")
- los que están por encima de 1.9m son altos (1 pertenencia a "altos")
- los valores de pertenencia entre 1.7m y 1.9m se obtienen interpolando, por ejemplo el que mide 1.8m pertenece a los altos con 0,5 ya que está a mitad de camino, el que mide 1.85 tendrá 0,75 (está a 3/4 partes), mientras que 1.75 es 0.25 "alto" (ya que está a en el primer 1/4 de distancia).

Estas funciones formalmente quedarían:

$$M(X) = \begin{cases} 0 & \text{si } X \leq A \\ (X-A)/(B-A) & \text{si } X > A \text{ y } X < B \\ 1 & \text{si } X \geq B \end{cases}$$

A este tipo de funciones, que como se dijo, normalmente se usa para las etiquetas que caracterizan los valores más altos del intervalo se le llama también como escalones crecientes. Puede verse que si  $A=B$  el escalón es drástico o estricto pasando en el mismo punto de 0 a 1. Este caso, que es similar a los conjuntos clásicos modelados con escalones crecientes estrictos vistos antes y podría usarse para etiquetas como:

- mayor o igual que 0.5 m ( $A = B = 0.5$  m)
- mayor o igual que 1.9 m ( $A = B = 1.9$  m)

Normalmente estos saltos de escalón no se usan en los sistemas difusos, pero su formulación lo permite, siendo por tanto una generalización de los conjuntos tradicionalmente conocidos.

### Función L: Escalones decrecientes

Esta función se representa en el siguiente gráfico, que hace que se le de el nombre de la letra L.

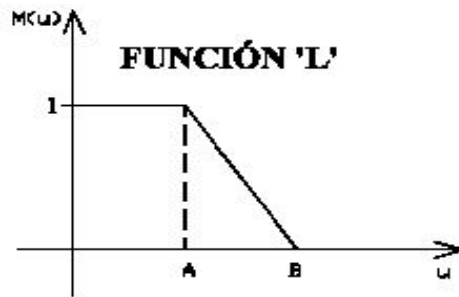


Figura 3.4 Función L

Esta función es característica de las etiquetas que significa el adjetivo que caracteriza a los elementos menores del universo del discurso. Por ejemplo, en el caso de la variable lingüística Altura, los elementos más bajos o pequeños del universo del discurso se clasifican como "bajos" (o "pequeños"). Para precisar este tipo de funciones hay que definir dos puntos:

- A: el valor por debajo del cual el grado de pertenencia es 1
- B: el valor por encima del cual el grado de pertenencia es 0

En el caso de la etiqueta "bajo" para caracterizar a una persona en base a su altura, los valores de A y B pueden ser los siguientes, si tomamos en cuenta lo mismo usado en el ejemplo anterior:

- A = 1.5 m
- B = 1.7 m

Esto significa que:

- las personas por debajo de 1.5 m son bajas (1 pertenencia a "bajos")
- los que están por encima de 1.7 m no son bajos (0 pertenencia a "bajos")
- los valores de pertenencia entre 1.5 m y 1.7 m se obtienen interpolando, por ejemplo el que mide 1.6m pertenece a los bajos con 0,5 ya que está a mitad de camino, el que mide 1.55 m tendrá 0,75, mientras que 1.65 m es 0.25 "bajo".

Estas funciones formalmente quedarían:

$$\begin{array}{ll}
 1 & \text{si } X \leq A \\
 M(X) = (B-X)/(B-A) & \text{si } X > A \text{ y si } X < B \\
 0 & \text{si } X \geq B
 \end{array}$$

A este tipo de funciones, que como se dijo, normalmente se usa para las etiquetas que caracterizan los valores más bajos del intervalo se le llama también como escalones decrecientes. Puede verse que si A=B el escalón es drástico pasando en el

mismo punto de 1 a 0. Este sería el caso de los escalones decrecientes estrictos que se vieron al principio. Este caso, que es similar a los conjuntos clásicos podría usarse para etiquetas como:

- menor o igual que 0.5 m ( $A = B = 0.5$  m)
- menor o igual que 1.9 m ( $A = B = 1.9$  m)

Normalmente estos saltos de escalón no se usan en los sistemas difusos, pero su formulación lo permite, siendo por tanto una generalización de los conjuntos tradicionalmente conocidos.

### Función LAMBDA: Funciones triangulares

Esta función se representa en el siguiente gráfico, que hace que se le de el nombre de la letra griega Lambda  $\lambda$  por su parecido con esta.

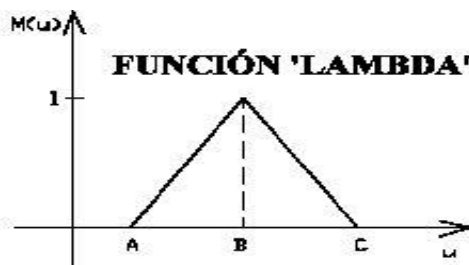


Figura 3.5 Función Lambda

Esta función es característica de las etiquetas que significa el adjetivo que caracteriza a los elementos centrales del universo del discurso. Por ejemplo, en el caso de la variable lingüística Altura, los elementos centrales o medianos (que no son ni bajos ni altos del universo del discurso) se clasifican como "mediano". Para precisar este tipo de funciones hay que definir tres puntos:

- A: el valor por debajo del cual el grado de pertenencia es 0
- B: el valor en el cual el grado de pertenencia es 1
- C: el valor por encima del cual el grado de pertenencia es 0

En el caso de la etiqueta "mediano" para caracterizar a una persona en base a su altura, los valores de A, B y C pueden ser los siguientes, si tomamos en cuenta lo mismo usado en el ejemplo anterior:

- $A = 1.5$  m

- $B = 1.7 \text{ m}$
- $C = 1.9 \text{ m}$

Esto significa que:

- las personas por debajo de  $A = 1.5 \text{ m}$  no son medianos (0 "medianos")
- los que valen exactamente  $1.7 \text{ m}$  (B) son medianos (1 " medianos ")
- los que están por encima de  $C = 1.9 \text{ m}$  no son medianos (0 " medianos ")
- los valores de pertenencia entre  $A = 1.5 \text{ m}$  y  $B = 1.7 \text{ m}$  se obtienen interpolando, por ejemplo el que mide  $1.6 \text{ m}$  pertenece a los medianos con 0,5 ya que está a mitad de camino, el que mide  $1.65$  tendrá 0,75 (está a  $3/4$  partes), mientras que  $1.55$  es 0.25 " mediano" (primer  $1/4$  de distancia).
- los valores de pertenencia entre  $B = 1.7 \text{ m}$  y  $C = 1.9 \text{ m}$  se obtienen también interpolando, por ejemplo el que mide  $1.8\text{m}$  pertenece a los medianos con 0,5 ya que está a mitad de camino, el que mide  $1.75$  tendrá 0,25, mientras que  $1.55$  es 0.75 " mediano".

Estas funciones formalmente quedarían:

$$M(X) = \begin{cases} 0 & \text{si } X \leq A \\ (X-A)/(B-A) & \text{si } X > A \text{ y si } X \leq B \\ (C-X)/(C-B) & \text{si } X > B \text{ y si } X < C \\ 0 & \text{si } X \geq C \end{cases}$$

A este tipo de funciones, que como se dijo, normalmente se usa para las etiquetas que caracterizan los valores centrales del intervalo se le llama también funciones triangulares.

Puede también verse que si  $A = B = C$  la función se convierte en una función que sólo toma valor en un punto. Este tipo de función puede servir para modelar funciones que evalúan si un punto es igual drásticamente a un valor dado, por ejemplo, el conjunto "EslgualA5", que sólo toma valor 1 en 5 y en el resto vale 0. Estos son los casos de las funciones puntuales o singleton vistas al inicio. En este caso  $A = B = C = 5$ . Aunque este tipo de evaluaciones tan estrictas no son muy usadas, es importante saber como pueden modelarse a través de funciones triangulares o LAMBDA.

### Función Pi: Funciones trapezoidales

Estas funciones pueden verse como una extensión o generalización de las tres anteriores. Esta función se representa en el siguiente gráfico, que hace que se le de el nombre de la letra griega PI  $\Pi$  por su parecido con esta.

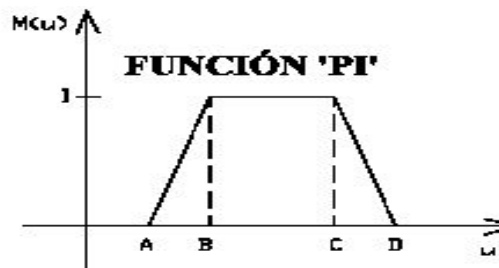


Figura 3.6 Función PI

Esta función es característica de las etiquetas que significa el adjetivo que caracteriza a los elementos centrales del universo del discurso, pero que se quiere permitir que valga 1 en más de un punto (a diferencia de las funciones triangulares en las que sólo vale 1 en un punto). Por ejemplo, en el caso de la variable lingüística Altura, los elementos centrales o medianos (que no son ni bajos ni altos del universo del discurso) se vio ya antes que son los “medianos”. Para precisar este tipo de funciones hay que definir cuatro puntos:

- A: el valor por debajo del cual el grado de pertenencia es 0
- B: el valor en el cual el grado de pertenencia comienza a ser 1
- C: el valor en el cual el grado de pertenencia deja de ser 1
- D: el valor por encima del cual el grado de pertenencia es 0 nuevamente

En el caso de la etiqueta "mediano", para caracterizar a una persona en base a su altura, también podríamos tomar los siguientes valores de A, B, C y D usando una función trapecio:

- A = 1.5 m
- B = 1.6 m
- C = 1.8 m
- D = 1.9 m

Esto significa que:

- las personas por debajo de A = 1.5 m no son medianos (0 "mediano")
- los que están entre B = 1.6 m y C = 1.8 m son medianos (1 "mediano")

- los que están por encima de  $D = 1.9$  m no son medianos (0 " mediano ")
- los valores de pertenencia entre  $A = 1.5$  m y  $B = 1.6$  m se obtienen interpolando, por ejemplo el que mide 1.55 m pertenece a los medianos con 0,5 ya que está a mitad de camino, el que mide 1.575 tendrá 0,75 (está a 3/4 partes), mientras que 1.525 es 0.25 " mediano" (ya que está a en el primer 1/4 de distancia).
- los valores de pertenencia entre  $C = 1.8$  m y  $D = 1.9$  m se obtienen también interpolando, por ejemplo el que mide 1.85m pertenece a los medianos con 0,5 ya que está a mitad de camino, el que mide 1.875 tendrá 0,25, mientras que 1.825 es 0.75 " mediano".

Estas funciones formalmente quedarían:

$$M(X) = \begin{cases} 0 & \text{si } X \leq A \\ (X-A)/(B-A) & \text{si } X > A \text{ y si } X < B \\ 1 & \text{si } X \geq B \text{ y si } X \leq C \\ (D-X)/(D-C) & \text{si } X > C \text{ y si } X < D \\ 0 & \text{si } X \geq C \end{cases}$$

A este tipo de funciones, que como se dijo, normalmente se usa para las etiquetas que caracterizan los valores centrales del intervalo (al igual que las triangulares, pero ampliando el intervalo en que vale 1) se le llama también funciones trapezoidales.

Esta función tiene casos particulares que la convierten en cada una de las funciones anteriores. Estos casos son los siguientes:

- Si  $C = D = \text{Infinito}$  (o el valor límite superior del universo del discurso), entonces la función Pi se reduce a un escalón creciente (función Gamma).
- Si  $A = B = 0$  (o el valor límite inferior del universo del discurso), entonces la función Pi se reduce a un escalón decreciente (función L).
- Si  $B = C$  entonces la función Pi se reduce a una función triangular (función Lambda).

Además, se puede reducir a los casos particulares de cada una de las funciones anteriores, por ejemplo:

- Si  $C = D = \text{Infinito}$  (escalón creciente o función Gamma) y  $A = B$  es un salto escalón estricto, por ejemplo para "MayorOIgualQue7".
- Si  $A = B = 0$  (escalón decreciente o función L), y  $C = D$  es un salto escalón estricto, por ejemplo para "MenorOIgualQue7".



- Si  $A = B = C = D$  es una función que sólo vale 1 en un punto, por ejemplo para modelar la función estricta “EslgualA5” como se vio antes para la función Lambda o triangular.

Además, esta función permite modelar funciones estrictas como:

- “Valor entre 6 y 9”, haciendo  $A = B = 6$ , y  $C = D = 9$  que sería un salto o pulso que sólo vale 1 entre 6 y 9, y vale 0 antes de 6 y después de 9.

Por todas estas razones, muchas veces se usa la función trapecio para describir cualquiera de las anteriores.

### 3.5- Conjuntos difusos

#### Definición de conjunto difuso

La Teoría de Conjuntos Difusos puede utilizarse para representar expresiones lingüísticas que se utilizan para describir conjuntos o algoritmos. Los conjuntos difusos son capaces de captar por sí mismos la vaguedad lingüística de palabras y frases comúnmente aceptadas, como "gato pardo" o "ligero cambio". La habilidad humana de comunicarse mediante definiciones vagas o inciertas es un atributo importante de la inteligencia.

Sea  $F$  un conjunto difuso definido sobre el universo  $U$ .

$F = \{(u, M(u))\}$  para todo  $u$  que pertenece a  $U$

que indica que  $F$  está formado por todos los pares ordenados " $u$ " y el resultado de la función de pertenencia para todo elemento " $u$ " dentro del universo de discurso " $U$ ". La función de pertenencia para cada elemento del conjunto difuso (etiqueta) viene dada de cualquiera de las maneras vistas antes.

#### Operaciones sobre conjuntos difusos.

##### Operadores básicos

- Intersección:  $fA \cap B(x) = T(fA(x), fB(x)) \rightarrow$  la intersección de dos conjuntos se obtiene aplicando la operación T-Norma que puede ser sustituida por cualquiera de las funciones posibles asociadas a ella (las que se muestran posteriormente). El

proceso de intersección visto desde el punto de vista de la Teoría de Hajek es lo que ocurre en las funciones de Hajek de CONJ (conjunción) y CTR (contribución).

- Unión:  $f_{A \cup B}(x) = S(f_A(x), f_B(x)) \rightarrow$  la unión de dos conjuntos difusos se obtiene aplicando la operación S-Norma que puede ser sustituida por cualquiera de las funciones que posibles asociadas a ella (las que se muestran posteriormente). El proceso de unión visto desde el punto de vista de la Teoría de Hajek es lo que ocurre en las funciones de Hajek de DISY (disyunción) y GLOB (global).
- Negación o complemento:  $f_{\neg A}(x) = 1 - f_A(x) \rightarrow$  La negación o complemento de un conjunto difuso se obtiene aplicando esta fórmula, dado que los valores de la función de pertenencia oscilan entre 0 y 1. El proceso de negación (complemento) visto desde el punto de vista de la Teoría de Hajek es lo que ocurre en la función de Hajek de NEG (negación). Es importante notar que en la Teoría Difusa no se puede usar la función de Hajek  $NEG(X) = -X$  ya que implicaría obtener valores negativos. Por eso aquí se hace el mismo proceso de reflexión alrededor del centro que se hace en Hajek, pero tomando el 0.5 como centro en lugar del 0 como es en Hajek. De esta manera, la función difusa de NEG es  $NEG(X) = 1 - X$ . Por ejemplo, si la etiqueta “alto” vale 0 para un caso, su negación vale  $NEG(0) = 1 - 0 = 1$ . Esto significa que si es “alto” con 0, es lo mismo que decir que “no es alto” con 1.

### 3.6- Elementos básicos y reglas de un sistema de lógica difusa

Las reglas utilizadas en la lógica difusa son de tipo:

**Si** (tal cualidad ó expresión) y (tal cualidad ó expresión)... **Entonces**... (Resultado) (If and then).

**Si** una serie de circunstancias particulares de entrada ocurre, **ENTONCES** una serie de acciones particulares de salidas resultan. Por ejemplo **SI** M es grande y T es un poco alta, **ENTONCES** P es muy fuerte. Las reglas se construyen en base a operadores lógicos similares a los utilizados en álgebra booleana, pero con una significación diferente. Cada regla especifica las condiciones de entrada que deben cumplirse para que la regla sea evaluada como válida y los valores que en consecuencia serán transferidos a la salida.

Los tres operadores básicos de la lógica difusa son:

- 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 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  $\mu_x$  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 3.7a, 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  $\mu_A$  y  $\mu_B$  produce como resultado un valor difuso  $\mu_x$  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 3.7b, 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  $\mu_A$  produce como resultado un valor difuso  $\mu_x$  igual a  $1-\mu_x$ . Por ejemplo, si  $\mu_A = 0.1$ , entonces  $\mu_x = 0.1$ . en el caso de la figura 3.7c, la regla IF NOT S1 THEN ... sea 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 3.7d y 3.7e ilustran como traba el operador NOT en operaciones AND y OR.

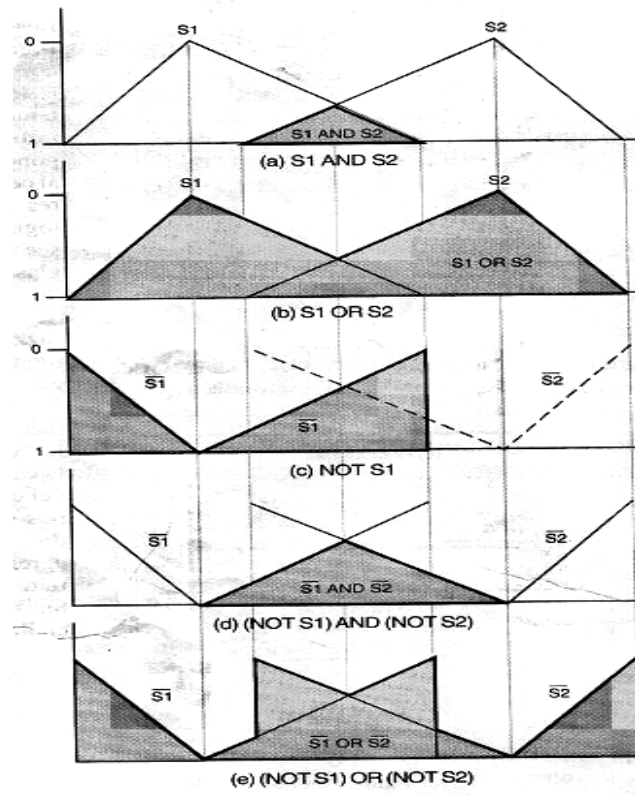


Figura 3.7 Ejemplo de representación de las diferentes reglas.

### Esquema general

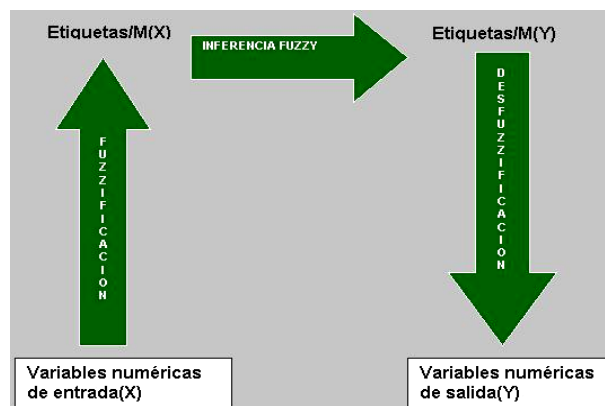


Figura 3.8 Esquema de un sistema difuso.

En este esquema se ve que el proceso completo de un sistema difuso:

- Comienza con los valores numéricos de entrada. Por ejemplo, los resultados medidos en unos controladores como pueden ser las medidas de la turbiedad del agua y el peso del tanque en una lavadora automática con “Fuzzy Logic”. Estos son los valores que se les llama Variables numéricas de entrada.
- Estos valores se convierten en valores de pertenencia a etiquetas difusa que son equivalentes a los valores de certeza. Por ejemplo, a partir de la turbiedad y del peso se puede decir el valor de pertenencia de la turbiedad a las etiquetas “muy turbia”, o “poco turbia”, o el grado de pertenencia del peso del tanque a las etiquetas “tanque muy pesado” o “tanque ligero”. Este proceso se llama **Fuzzificación** ya que convierte valores numéricos en difusos (pertenencia a etiquetas  $M(x)$ ).
- A partir de las etiquetas de entradas (que se toman como valores de certeza) ocurre el proceso de propagación de certeza de una manera muy similar a como ocurre en el modelo de Hajek, usando las RP que se hayan definido. En este proceso de **Inferencia Difusa** se usan las fórmulas vistas antes de T-norma y S-norma para NEG, CONJ. DISY, CTR y GLOB. Esto da como resultado valores de certeza  $M(Y)$  que se refieren a las pertenencias a los conjuntos de salida. Ejemplo de estas etiquetas inferidas pueden ser “la válvula de entrada del agua debe abrirse” “mucho” o “poco”, o “debe echarse detergente” “bastante” o “poco”. Estos son valores de pertenencia a la etiqueta “muchacha” o a la etiqueta “poca” asociadas a la variable lingüística “apertura de la válvula de entrada de agua”, o de pertenencia a las etiqueta “muchacha” o “poca” asociadas a la variable lingüística “cantidad de detergente a echar”.

Por último, a partir de los valores de pertenencia a las variables lingüística de salida, hay que obtener los valores numéricos de estas. Es decir, hay que convertir ahora los valores difusos de pertenencia que se han obtenido en la inferencia a valores numéricos en las variables numéricas de salida. Esto quiere decir que, por ejemplo, hay que convertir los valores difusos de pertenencia asociados a las etiquetas “muchacha” o a la etiqueta “poca” asociadas a la variable lingüística “apertura de la válvula de entrada de agua” en el un valor numérico que puede ser el ángulo que hay que girar el control de entrada de agua, o el flujo de agua que hay que dejar pasar. Por su parte, a partir de la pertenencia a las etiqueta “muchacha” o “poca” asociadas a la variable lingüística “cantidad de detergente a echar” se determina la cantidad de detergente (gramos).

### 3.7- Fuzzificación

Para cada variable numérica de entrada se obtiene su valor de pertenencia a cada uno de los conjuntos difusos en que se divide el universo de discurso. Por ejemplo, si la altura de un individuo es de 1.70, y se usan las funciones de pertenencia vistas antes, los valores de pertenencia serían los siguientes:

- $M_{\text{pequeña}}(1.70) = 0$
- $M_{\text{mediana}}(1.70) = 1$
- $M_{\text{alta}}(1.70) = 0$

Este proceso se hace para todas las variables numéricas existentes obteniendo para cada una los valores de pertenencia a todas las etiquetas definidas.

### 3.8- Inferencia difusa

La elección de todas las posibles variables de diseño del controlador difuso da un amplio abanico de posibilidades. El posible diferente modelado de los operadores lingüísticos **y**, **también**, **entonces**; los diferentes modelos de funciones de implicación; la subjetividad en la elección de la forma y tamaño de particiones difusas de los antecedentes y del los consecuentes; el método de defuzzificación, todo ello da una gran número de diferentes y posibles combinaciones. Sin embargo, multitud de estudios teóricos y de implementaciones prácticas han desembocado en una simplificación del panorama, dejándolo en unos pocos diferentes **métodos de inferencia**. Un método de inferencia es un mecanismo de obtención de la respuesta del sistema que incluye la elección de todas las variables antes mencionadas.

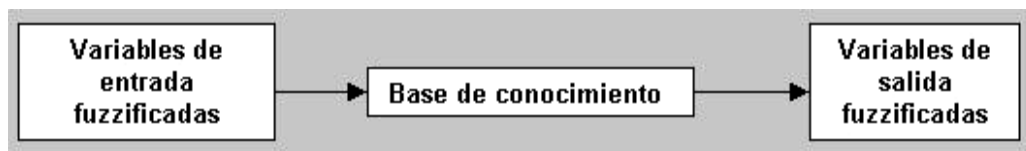


Figura 3.9 Representación de la inferencia Difusa

### 3.9- Defuzzificación

El objetivo de la defuzzificación es la transformación de las acciones de control de tipo cuantitativo o determinístico, a valores que permitan un adecuado funcionamiento de

los actuadores del sistema bajo control, los que naturalmente forman parte del mundo real y no del universo difuso en discusión.

El método de inferencia provee una función de pertenencia resultante  $\mu_{gr}(x_u(k))$ , para la variable de salida  $x_u$ . Usando el proceso de defuzzificación, esta función de pertenencia final, es obtenida por la combinación de todas las funciones de pertenencia, como una consecuencia de cada regla, y es luego convertido a un valor numérico, llamado  $u(k)$ . La estrategia de defuzzificación puede ser el método de Centro de Área (COA). Este método genera un valor de salida  $u(k)$ , lo cual es la abscisa del centro de gravedad del área de la resultante función de pertenencia, dado por la siguiente relación:  $u(k) = (\sum_{i=1}^m \mu_{gr}(x_u(k)) x_u(k)) / \sum_{i=1}^m \mu_{gr}(x_u(k))$

### 3.10- Sistemas expertos difusos

El diseño general de los sistemas expertos difusos tiene este modelo

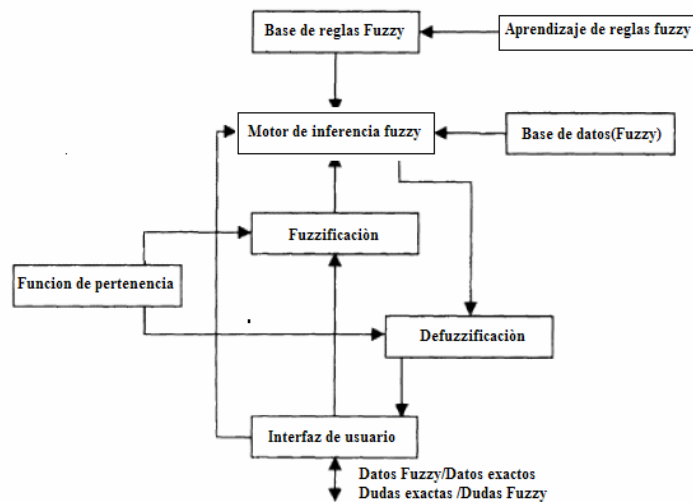


Figura 3.10 Esquema del diseño de un sistema experto difuso

### 3.11- Tipos de sistemas basados en reglas difusas

En función del tipo de regla difusa que utilicen se puede distinguir:

#### SBRDs tipo Mamdani

*Sistema experto de eficiencia en accionamientos con variadores de velocidad en la Empresa Cmdte. Ernesto Che Guevara de Moa.*

SI X1 es Alto y X2 es Bajo ENTONCES Y es Alto

### **SBRDs tipo TSK (Takagi – Sugeno – Kang)**

SI X1 es Alto y X2 es Bajo ENTONCES  $Y=f(X1,X2)$

No necesitan interfaz de defuzzificación

El motor de inferencia funciona de distinta forma

### **VENTAJAS Y DESVENTAJAS SBRD TIPO MADANI**

#### **Ventajas:**

Facilidad para la derivación de reglas.

Interpretabilidad de las reglas difusas.

Fueron propuestos antes y se han utilizado con más frecuencia.

#### **Desventajas:**

No garantizan la continuidad de la superficie de salida.

Menor eficiencia computacional.

### **3.12- Aplicaciones de la lógica difusa**

En realidad, la primera aplicación práctica de la lógica borrosa ya tuvo lugar en 1973, cuando el científico británico Ebrahim H. Mamdani inventó un controlador borroso para un motor de vapor controlado por 24 reglas. Pero el primer éxito espectacular japonés de la aplicación de la lógica borrosa se situó unos años después, con el Metro de la ciudad japonesa de Sendai.

**METRO DE SENDAI.** El proyecto era difícil, ya que un Metro es un sistema que funciona en tiempo real y, por tanto, los sistemas de control deben regular los cambios no solo en el momento de producirse sino anticipándose a ellos. El tema fue abordado por los investigadores Shoji Miyamoto y Seiji Yasunobu y el 15 de julio de 1987 tuvo lugar la inauguración. La conducción resultó ser más suave que cualquier otra previamente conocida controlada, humana o mecánicamente. La precisión de la frenada fue de 7 cm, mientras que la realizada por un conductor suele superar los 20 cm. Las aceleraciones y desaceleraciones resultaron ser mucho más suaves. El número de cambios de marcha se redujo a un tercio de los de la conducción humana o

*Sistema experto de eficiencia en accionamientos con variadores de velocidad en la Empresa Cmdte. Ernesto Che Guevara de Moa.*



de los controlados informáticamente por sistemas no borrosos. Todo ello redundó, además, en un ahorro del 10% de energía. No es de extrañar que pronto el Ayuntamiento de Tokio contratase a Hitachi para que instalase sistemas borrosos de control en buena parte de la gran red del Metro de Tokio.

Tampoco fue ilógico el que en Japón, hacia 1988, se produjese una especie de "boom" de la lógica borrosa. En consecuencia, actualmente más de cien empresas, entre ellas muchas de las mayores, realizan Investigación y desarrollo en estos campos, con miles de patentes realizadas, de las que, aproximadamente, un millar están en explotación.

**CHIPS BORROSOS.** Los productos borrosos ejecutan algoritmos borrosos de inferencia. Para ello usan sensores que miden las condiciones de entrada variables así como microprocesadores especiales diseñados para almacenar y procesar las reglas borrosas suministradas por los Sistemas Expertos. El primer circuito digital borroso se produjo en 1985 en los laboratorios AT&T BELL. Procesaba unas 80.000 inferencias lógicas borrosas por segundo. Diez años después la capacidad se había multiplicado por un factor de 30.

La mayoría de las empresas de microprocesadores investigan el desarrollo de circuitos borrosos, aunque una buena parte de los productos ofrecidos comercialmente siguen basándose en microprocesadores corrientes a los que los ingenieros programan con unas pocas líneas de códigos de inferencia borrosa. A pesar de ello, el mercado mundial de los microprocesadores borrosos alcanza cuantías superiores a los miles de millones de dólares anuales.

En cualquier caso, las reglas de los sistemas borrosos, su dependencia de instrucciones confeccionadas por expertos, constituye su punto débil. Para automatizar el proceso se intentan construir sistemas adaptativos basados en las conocidas como redes neuronales artificiales que puedan llegar a ser capaces de afinar, o incluso formular, las reglas iniciales. Constan de "neuronas" y "sinapsis" (componentes de silicio o ecuaciones escritas en soportes lógicos), que simulan el comportamiento neuronal, modificándose los valores en respuesta a los estímulos procedentes de sinapsis y neuronas circulantes, de modo que cada "neurona" procesa todas las

*Sistema experto de eficiencia en accionamientos con variadores de velocidad en la Empresa Cmdte. Ernesto Che Guevara de Moa.*

señales de entrada procedentes de otras "neuronas" y emite una señal en forma de respuesta numérica.

**APLICACIONES.** Las aplicaciones de los sistemas borrosos inteligentes se han ido haciendo innumerables, en cualquier campo que consideremos. Así, a partir de 1975, en Europa se desarrollaron sistemas de control borroso, iniciados con una planta de agua caliente en Holanda, sistemas intercambiadores de calor en Dinamarca, o una planta de sinterización para la BRITISH STEEL Co. en el Reino Unido. También en Dinamarca el científico Holmblad desarrolló un sistema de control borroso para un horno cementero que constituyó el primer gran éxito industrial al ahorrar combustible y mejorar a los operadores humanos. Desde 1982 se pudo aplicar un lenguaje especial de programación numérico sustitutivo de las previas reglas lingüísticas de control, con lo que el proceso se aplicó a centenares de instalaciones industriales.

En Japón, la ingeniería borrosa se hizo realidad con el control de una planta de purificación de agua, para la compañía FUJI ELECTRIC, en 1982. Otro hito fue el desarrollo de un robot (un automóvil en miniatura) con capacidad de reconocimiento del habla y de comprensión, adaptando las instrucciones "con sentido común", a las condiciones concretas de la conducción. En 1988 se lanzó el primer producto borroso mundial de consumo: un aparato para regular a voluntad la temperatura de salida del agua de un grifo con suministro de agua fría y caliente. Las válvulas correspondientes obedecen a un controlador borroso, un microprocesador de 4 bits, que determina la temperatura y flujo de salida en respuesta a un mando manual exterior.

Actualmente existen todo tipo de instrumentos, máquinas y procedimientos controlados borrosamente, adaptándose "inteligentemente" a cada situación particular: acondicionadores de aire, frigoríficos, lavadoras / secadoras, aspiradoras, hornos microondas, mantas eléctricas, ventiladores, autoenfoques fotográficos, estabilizadores de imágenes en grabadoras de vídeo, transmisiones de automóviles, suspensiones activas, controles de ascensores, dispensadores de anticongelantes para los aviones en los aeropuertos, sistemas de toma de decisiones industriales o económicas, y un largo etcétera en el que se incluye hasta un helicóptero no tripulado, cuyo prototipo, de más de 4 m. de envergadura ha sido capaz de mejorar al convencional, consiguiendo

su estabilización tras perder una pala, cosa que ningún piloto humano ha logrado jamás.

Una vez más la experiencia nos demuestra, pues, como un concepto inicialmente básico, tan abstracto como el de los conjuntos o la lógica borrosa, puede convertirse, en relativamente poco tiempo, en aplicaciones útiles para nuestra vida diaria y el progreso de la Humanidad.

### 3.13- Conclusiones

- La arquitectura más adecuada para la construcción del modelo de sistema experto encargado de evaluar y estimar eficiencia es el de tipo Mamdani, porque se parte de los conocimientos de los gráficos y la experiencia experta de los operadores e investigadores del tema.
- Resulta conveniente la utilización de las funciones de pertenencia de tipo triángulo con ajustes difusos de hasta cinco cualidades porque caracterizan mejor el comportamiento de las variables que participan en el proceso de estimación de la eficiencia del accionamiento.
- Se recomienda la utilización de bloques de dos entradas por una salida para que resulte más fácil la construcción de las reglas.

# CAPITULO IV

## Capítulo IV: Programa experto de eficiencia en accionamientos.

### 4.1- Introducción

En este capítulo se muestra el programa en forma de software para evaluar la eficiencia en el sistema de Accionamiento Eléctrico con Variadores de Velocidad usando los recursos que ofrece el GUI del MATLAB, con el fin de estimar las características de funcionamiento del accionamiento para determinada carga mecánica.

Tiene entre sus ventajas ofrecer un programa, que evalúa con suficiente simplicidad, las principales variables del accionamiento teniendo en cuenta las componentes y factores de explotación de la industria, y como ejemplo: sistemas de accionamientos eléctricos de bombas centrifugas con fines de docencia e investigación.

Tiene previsto la evaluación experta de la eficiencia del accionamiento eléctrico usando la técnica de Lógica Difusa. Tiene prevista una alternativa de cómo utilizar entradas y salidas analógicas en PLCs con interfaces a estación de trabajo de su PC.

### 4.2- Mediciones e instrumentos utilizados

Para la realización del estudio es necesario contar con algunos parámetros que nos permitan caracterizar el objeto, dentro de estos encontramos: la potencia activa, potencia reactiva, factor de potencia y por ciento de la tasa total de distorsión de armónicos, que se obtendrán con las mediciones, necesarias para la implementación de cualquier variante de solución.

Se realizaron mediciones en el Variador de Velocidad conectado en la subestación **1TP-3** para conocer el contenido de armónicos que introduce a la red así como el comportamiento del mismo ante los distintos tipos de carga a la que se ve sometido y la repercusión de este factor en la cantidad de corrientes armónicas inyectadas a la red por el Variador de Velocidad. Además, se obtuvieron una serie de parámetros eléctricos como; factor de potencia, potencia activa, potencia reactiva y potencia

aparente todos estos valores fueron obtenidos en intervalos de 10 minutos entre cada medición. Los resultados de las mediciones se muestran en el anexo.

### **Programación de las mediciones:**

El programa de mediciones se estructura para secuencias de 24 horas con muestras cada 10 minutos durante una semana. Debido al sistema de trabajo del objeto bajo estudio y a la densidad de datos requerida para lograr una aproximación aceptable entre el cálculo y las mediciones.

### **Características del equipamiento utilizado:**

Las mediciones realizadas se efectuaron con un analizador de red digital PQMPC (Power Quality Meter). Este instrumento está destinado estrictamente a la medida de calidad. Suele medir únicamente los tres canales de tensión y registra simultáneamente los parámetros de calidad: Valor eficaz y armónicos.

El analizador de red permite capturar y registrar gran cantidad de datos. Estos datos suelen ser tratados en tiempo diferido, transfiriendo los datos del analizador a un fichero y posteriormente procesando dichos datos. Esto permite obtener registros gráficos donde se puede tener una visión general de la evolución de cualquier magnitud eléctrica y permite también obtener tablas numéricas que muestran los valores en un determinado instante o intervalo de tiempo.

### **4.3- Características del sistema experto hecho con el GUI de MATLAB**

El programa pretende servir de herramienta para preparar su PC como estación de trabajo para la toma de datos ó señales y la comunicación sencilla con periféricos programables (Micro controladores y PLCs) y la conexión con otros software de Modelación y Simulación avanzada como el MATLAB y MATHCAD donde se aprovecha su soporte matemático y algorítmico.

Se ofrecen dos opciones de trabajo directas:

- Introducirse como sistema SCADA.
- Conexión como usuario en ambientes de Modelación y Simulación, con ayuda a pie de ventana y con acceso a redes globales de información.

*Sistema experto de eficiencia en accionamientos con variadores de velocidad en la Empresa Cmdte. Ernesto Che Guevara de Moa.*

Esto va permitir más adelante desarrollar su propio módulo para oficios de docencia, investigación y realizar tareas de Monitoreo y Supervisión en las instalaciones de los accionamientos típicos industriales como bombas, ventiladores, compresores, bandas transportadoras, equipos de molinos, secadores y máquinas herramientas. Se probó este programa simulando un modelo similar al motor que fue objeto de estudio en Fábrica Ernesto Che Guevara.

En la figura 4.1, se expone la ventana principal del programa, donde están sus principales acciones de gestión.



Figura 4.1 Primera ventana del supervisor del sistema experto de Accionamientos con variadores de velocidad.

El sistema de adquisición de datos, supervisor y control SCADA incluye los protocolos estándar usando los puertos seriados y paralelos, con extensión a tarjetas, PLCs y micro controladores PIC, INTEL y Motorola. Ver figura 4.2.

SCADA permite la visualización del comportamiento de las variables del grupo Motor – Mecanismo, y tiene opción de seguimiento también con el convertidor, ya sea Rectificador o Inversor (VSI a PWM).



Figura 4.2 Opciones de comunicación del SCADA.

Al mismo tiempo se incluyen las gestiones para planificar y registro de históricos que prevén las tareas de mantenimiento de los componentes del sistema, tanto del inversor (VSI a PWM), que es el variador de velocidad, como del motor eléctrico.

En la figura 4.3 se describen sus tareas.



Figura 4.3 Opciones de las tareas de mantenimiento que proyecta el programa.

La modelación incluye modelos hechos tanto en MATLAB, como desde otros simuladores, pero se sugiere que se trabaje con prioridad en al MATLAB.

En la siguiente figura 4.4 se tiene la ventana de esta opción.





Figura 4.4 Ventana para las opciones de simular modelos, con preferencia desde MATLAB.

Un ejemplo de las ventanas para visualizar gráficos en base a las funciones que el usuario establece desde su modelo, y las bondades de intercambiar acciones de gestiones de usuario, se muestran en la siguiente figura 4.5.

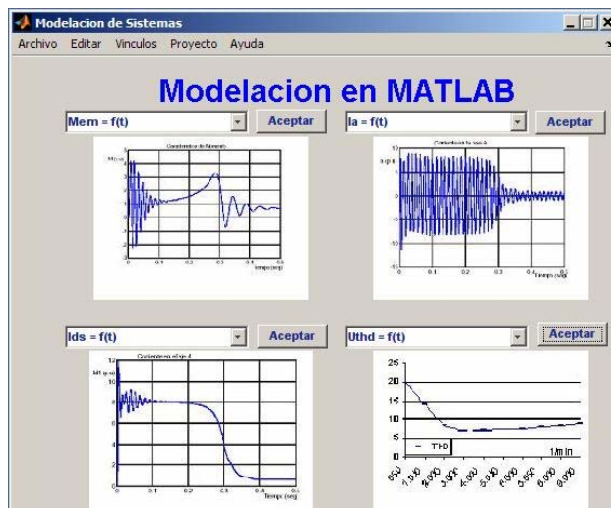


Figura 4.5 Ventana para visualizar gráficos en base a las funciones que el usuario establece desde su modelo.

La instrumentación siempre que esté disponible es posible conectarla a uno de los módulos de la configuración.

Otra opción está orientada a modelar el comportamiento entre el motor eléctrico y el mecanismo de producción a través de expresiones analíticas que participan en los

*Sistema experto de eficiencia en accionamientos con variadores de velocidad en la Empresa Cmdte. Ernesto Che Guevara de Moa.*

regímenes estáticos y dinámicos de estas máquinas. Tiene interés los detalles que permite visualizar durante el análisis que servirían en la fase de rediseño del accionamiento.

La Modelación está disponible para la solución de problemas relacionados con la formulación del modelo matemático del Objeto: grupo Motor Eléctrico junto con su carga mecánica y la fuente de alimentación: el inversor o convertidor sinusoidal de voltaje. Este último puede ser tratado como un sistema proporcional que genera en su salida la onda sinusoidal de voltaje (o de corriente) con la frecuencia y amplitud correspondientes de control.

La tarea es mostrar las características de trabajo más significativas del accionamiento, donde se evalúa sus parámetros de explotación para diferentes condiciones de carga mecánica en su árbol.

Las gestiones del Sistema Experto son realizadas a través de la ventana que se muestra en la figura 4.6.



Figura 4.6 Supervisor del Accionamiento con variador de velocidad para estimar la eficiencia en el Inversor y el motor eléctrico.

El estimador brinda los gráficos característicos de las variables que participan en la eficiencia del Inversor Sinusoidal de Tensión y del Motor de Inducción, donde se tienen los siguientes resultados.

#### Comportamiento de la Potencia del Accionamiento Eléctrico

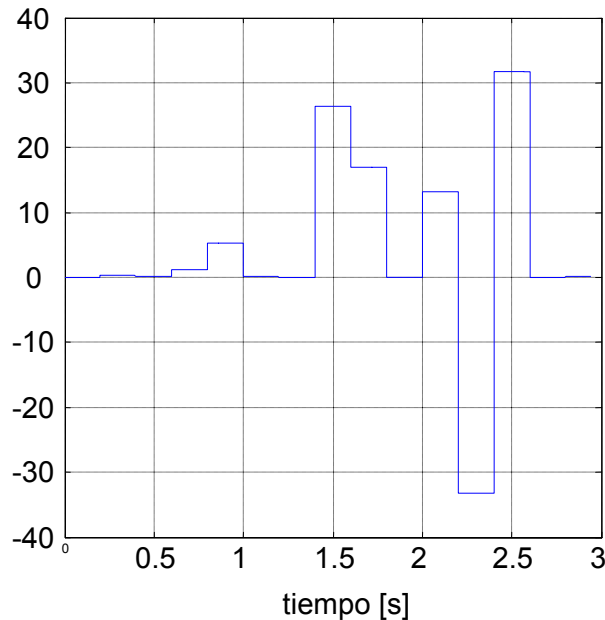


Figura 4.7 Potencia de entrada medida desde el bloque de enlace o link Dc que representa la potencia de entrada  $P_d$ .

El uso de accionamientos de velocidad variable (VSD) con motores asíncronos (AM) crece cada día. Las pérdidas debido a la presencia de armónicos de orden superior, introducidos por las fuentes moduladas por ancho de pulso (PWM); juegan un papel importante en la distribución de las pérdidas en todo el sistema de accionamiento eléctrico [1].

La evaluación de estas es fundamental para la correcta selección de los motores de inducción en aplicaciones donde se requiere alto desempeño dinámico y un amplio rango de velocidad (por ejemplo la tracción eléctrica) [1]. La determinación de las pérdidas puede realizarse mediante ensayos de vacío y corto circuito. Estos ensayos están normalizados por ejemplo IEEE-Std 112-1996, IEC 34-2, solo para tensiones de alimentación sinusoidales.

Las pérdidas en el cobre del rotor y las producidas en el hierro forman un conjunto dentro de las pérdidas en vacío. La separación de este conjunto no es tarea fácil en el

caso de que el AM se encuentre alimentado con una fuente de tensión PWM. Además muchos autores aseguran, que si el motor de inducción está alimentado por una fuente de tensión PWM, las pérdidas no pueden despreciarse como en el caso de la alimentación ideal sinusoidal, debido a las pérdidas introducidas por los armónicos de orden superior [2][3].

Es por ello que tiene sentido el uso de la Inteligencia Artificial para evaluar mediante patrones, las magnitudes de las pérdidas causadas por los armónicos, e identificar la calidad de la energía que reciben los motores desde los inversores de tensión sinusoidal modulada en estos accionamientos.

Por eso es conveniente tener en cuenta la presencia de armónicos de orden superior en los inversores modulados de tensión sinusoidal que alimentan a los motores asíncronos, afectando su eficiencia y calidad de energía.

#### 4.4- Metodología Propuesta.

Las ecuaciones para cada tensión de fase son las siguientes:

$$\begin{aligned} U_{AN} &= \frac{1}{3} \cdot (2 \cdot U_{AO} - U_{BO} - U_{CO}) \\ U_{BN} &= \frac{1}{3} \cdot (2 \cdot U_{BO} - U_{CO} - U_{AO}) \\ U_{CN} &= \frac{1}{3} \cdot (2 \cdot U_{CO} - U_{AO} - U_{BO}) \end{aligned} \quad (1)$$

La descomposición en series de Fourier de la onda de tensión de fase esta escrita en la expresión (2):

$$U_{AB} = \frac{4}{\pi} \cdot U_d \cdot \left[ \sin \omega t + \frac{1}{3} \cdot \sin 3\omega t + \frac{1}{5} \cdot \sin 5\omega t + \dots + \frac{1}{k} \cdot \sin k\omega t + \dots \right] \quad (2)$$

El valor de la componente fundamental es:

$$U_{AB1} = \frac{4 \cdot U_d}{\pi \cdot \sqrt{2}} = \frac{2 \cdot \sqrt{2} \cdot U_d}{\pi} = 0,9 \cdot U_d \quad (3)$$

Debido a la conexión trifásica la tercera armónica y sus múltiplos no aparecen en la tensión de fase. La forma de onda real puede diferir ligeramente de la forma de onda ideal debido a los efectos de conmutación y las caídas de tensión internas en el circuito del inversor.

*Sistema experto de eficiencia en accionamientos con variadores de velocidad en la Empresa Cmdte. Ernesto Che Guevara de Moa.*

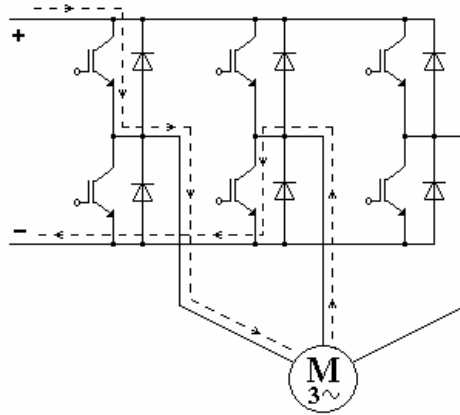


Figura 4.8 Esquema del Inversor que alimenta un motor asincrónico como carga.

Como se conoce para obtener este tipo de control se compara una onda portadora, de frecuencia  $f_c$  y de forma casi siempre triangular, con una onda modulada, de la frecuencia de la línea  $f_1$  y que inicialmente puede ser rectangular, tal como se muestra en la figura 4.9. El resultado de dicha comparación da la secuencia de encendido de los transistores de cada fase, la cual se muestra, para la fase A, en la figura 4.10. Para variar la tensión se varía la relación entre los valores máximos de la onda moduladora y portadora. Esta relación se denomina Índice de modulación  $m_u$  y se define como:

$$m_u = \frac{U_{MMAX}}{U_{CMAX}} \quad (3)$$

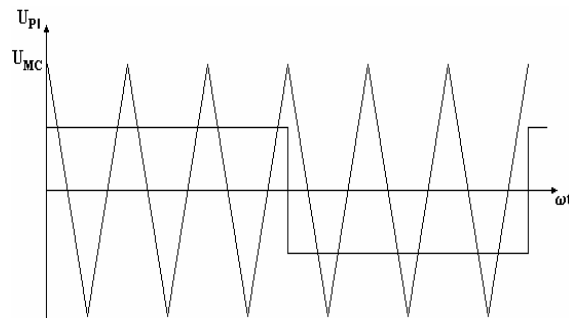


Figura 4.9 Onda moduladora y onda portadora.

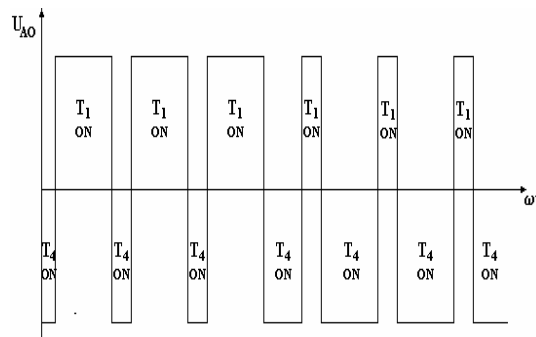


Figura 4.10 Resultado de la comparación entre la moduladora y la portadora.

Esta razón tiene gran importancia ya que para disminuir el contenido de armónicas su valor debe ser alto pues esto permite obtener gran número de pulsos por período de la onda fundamental. Por otra parte, esto aumenta la frecuencia de apagado y encendido del elemento semiconductor (switching frequency). Este valor está limitado por el tipo de semiconductor utilizado. Para los transistores bipolares de potencia, mosfet de potencia, IGBT e IGCT, esta frecuencia permisible es de un valor mucho más elevado, constituyendo ésta una de las ventajas fundamentales de estos dispositivos. En la actualidad los valores de frecuencia de conmutación más utilizados están entre 1 kHz y 20 kHz. Estos valores tienden a aumentar al irse disponiendo en el mercado de semiconductores de cada vez mejor calidad. Es muy utilizado un método que varía aleatoriamente dicha frecuencia. Esto se hace porque un valor fijo crea un ruido mucho más molesto que un diapasón de frecuencias alrededor de un punto. El subir esta frecuencia por encima de los 16 kHz tiene la gran ventaja de que hace mucho más silencioso el funcionamiento del motor.

### **Modulación Vectorial**

Con el objetivo de disminuir el contenido de los armónicos de la onda de tensión se utiliza el modulador basado en el vector espacial de tensión o modulación vectorial, cuya esencia del método consiste en hacer mínima la diferencia de este vector con el vector espacial de tensión  $U^{(s)}$  durante el mismo período.

Utilizando la modulación sinusoidal regular o uniforme en la cual la onda moduladora es una aproximación a etapas de la onda sinusoidal, tal como se muestra en la figura 4.11, donde la onda sinusoidal se aproxima a una onda cuyo valor es constante en cada período de la portadora e igual al valor de la onda sinusoidal al principio de este período o en su punto medio.

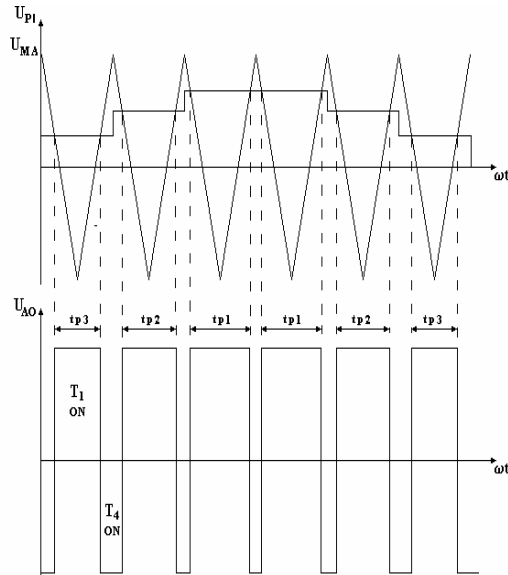


Figura 4.11 Modulación sinusoidal regular.

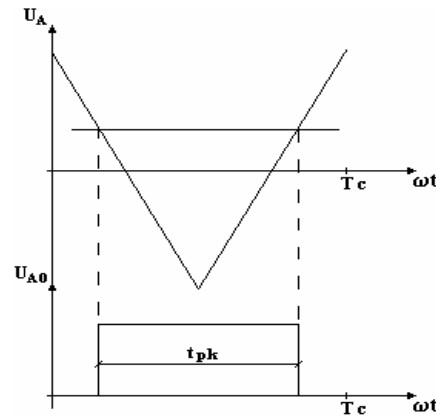


Figura 4.12 Un período de la portadora en la modulación sinusoidal regular.

Como el pulso es simétrico con respecto al punto medio del período de la portadora (ver figura 4.12) y su valor es:

$$t_{pk} = \frac{T_c}{2} \cdot \left( 1 + \left( \frac{m_u}{2} \right) \sin \omega_k \cdot t_k \right) \quad (4)$$

Donde:  $T_c = \frac{1}{f_c}$ ; pero como:  $f_c = R_c \cdot f_1$ ; y  $R_c = 12 \cdot n$ ;

entonces:  $T_c = \frac{1}{12 \cdot n \cdot f_1}$ .

Al considerar que se trabaja con el valor del seno en el punto medio del intervalo:

$\omega_k \cdot t_k = \frac{\pi}{12.n} + (k-1) \cdot \frac{\pi}{6.n}$ ; donde k va de 1 a 12.n, por tanto:  $\omega_k \cdot t_k = \frac{\pi(2k-1)}{12.n}$  y por consiguiente:

$$t_{pk} = \frac{T_c}{2} \cdot \left( 1 + \left( \frac{m_u}{2} \right) \text{sen} \left[ \frac{\pi \cdot (2.k-1)}{12.n} \right] \right) \quad (5)$$

Si se trabaja manteniendo constante la relación U/f entonces  $m_u \cdot T_c$  también se mantiene constante y (5) se convierte en:

$$t_{pk} = \frac{T_c}{2} + K_1 \cdot \text{sen} \left[ \frac{\pi \cdot (2.k-1)}{12.n} \right] \quad (6)$$

Donde:  $K_1 = m_u \cdot \frac{T_c}{4}$

Cada una de las conexiones en el bloque de transistores corresponde a un valor del vector espacial de la tensión de fase en el motor. Las relaciones del vector espacial trifásico son:

$$U^{(s)} = (U_{AN} + a \cdot U_{BN} + a^2 \cdot U_{CN})$$

$$U_\alpha = U_{AN}; \quad U_\beta = \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot (U_{BN} - U_{CN}) \quad (7)$$

$$|U^{(s)}| = \sqrt{U_\alpha^2 + U_\beta^2}; \quad \varphi = \tan^{-1} \left( \frac{U_\beta}{U_\alpha} \right)$$

El esquema del modulador atendiendo a la estrategia U/f se ilustra en la figura 4.13

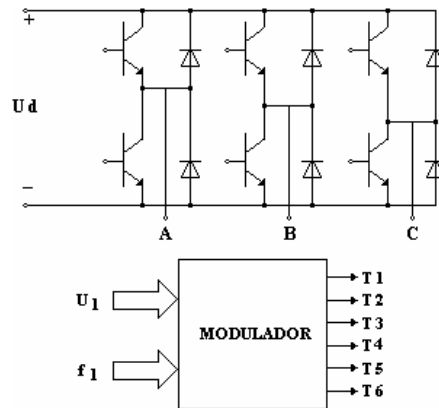


Figura 4.13 Esquema del modulador.



El resultado de esta modelación se muestra en la figura 4.14 observándose también que el plano complejo queda dividido en seis secciones de  $60^\circ$  cada una.

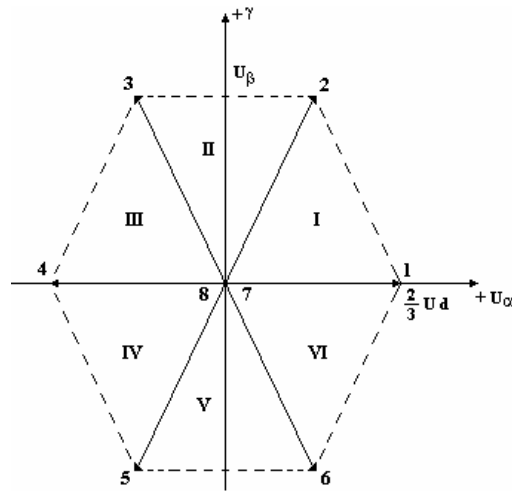


Figura 4.14 Posibles vectores espaciales con el inversor autónomo trifásico.

Trabajando con el PWM optimizado, que tiene dos variantes:

- La eliminación de armónicos.
- La minimización del valor efectivo de la onda sinusoidal.

El primer método es el más utilizado y una onda típica que se propone eliminar la 5ta y la 7ma armónica de tensión se muestra en la figura 4.15 [4]. En general, la amplitud de la armónica  $n$  en esta onda es:

$$U_{\max, n} = \frac{4}{n \cdot \pi} \cdot \frac{U_d}{2} \cdot \left[ 1 + 2 \cdot \sum_{k=1}^3 (-1)^k \cdot \cos n \cdot \alpha_k \right] \quad (8)$$

Donde:  $k=1,2,3,\dots$

La tensión de primera armónica es:

$$U_{\max, 1} = \frac{2 \cdot U_d}{\pi} \cdot [1 - 2 \cdot \cos \alpha_1 + 2 \cdot \cos \alpha_2 - 2 \cdot \cos \alpha_3] \quad (9)$$

La tensión de 5<sup>ta</sup> armónica, que debe eliminarse, es igual a:

$$U_{\max, 5} = \frac{2 \cdot U_d}{5 \cdot \pi} \cdot [1 - 2 \cdot \cos 5 \cdot \alpha_1 + 2 \cdot \cos 5 \cdot \alpha_2 - 2 \cdot \cos 5 \cdot \alpha_3] = 0 \quad (10)$$

y la de 7<sup>ma</sup> armónica, que también debe eliminarse:

$$U_{\max.7} = \frac{2 \cdot U_d}{7 \cdot \pi} \cdot [1 - 2 \cdot \cos 7 \cdot \alpha_1 + 2 \cdot \cos 7 \cdot \alpha_2 - 2 \cdot \cos 7 \cdot \alpha_3] = 0 \quad (11)$$

El índice de modulación se define ahora como:  $m_{PWM} = \frac{U_{\max.1}}{(U_d/2)}$  (12)

Es posible reducir los armónicos atendiendo a este índice. Ejemplos de ellos se muestran en las figuras 4.15 y 4.16.

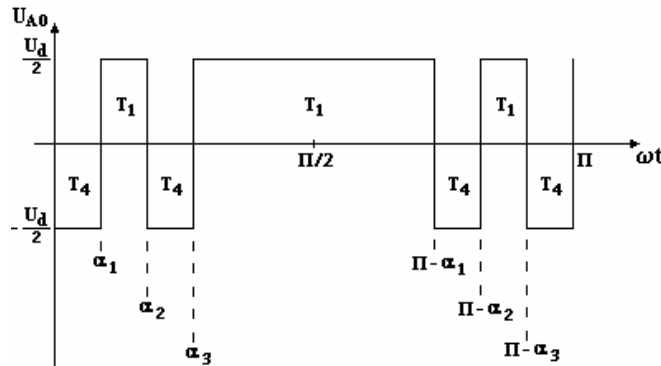


Figura 4.15. PWM optimizado con eliminación de 5<sup>ta</sup> y 7<sup>ma</sup> armónicos.

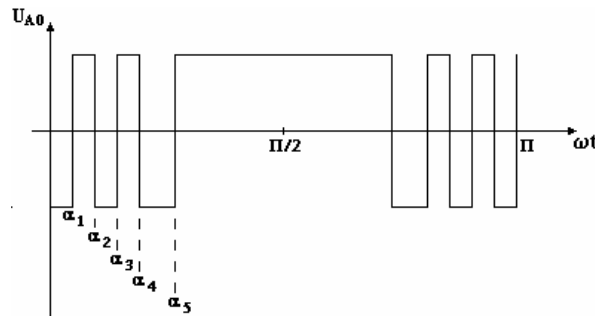


Figura 4.16 PWM optimizado con eliminación de 5<sup>ta</sup>, 7<sup>ma</sup>, 11<sup>na</sup> y 13<sup>ra</sup> armónicos.

La eficiencia del inversor sinusoidal de tensión VSI a PWM, puede ser calculada usando la expresión (13) dada por siguiente [5]:

$$\eta_{VSI} = \frac{P_{VSI} - P_{\Delta P}}{P_{VSI}} \quad (12)$$

Donde:

$P_{vsi}$  – es la potencia de la fuente inversora de tensión, [kW].

$P_{\Delta P}$  – son las pérdidas de la potencia dentro de la fuente inversora de tensión, [kW].

La eficiencia del motor asincrónico puede ser determinada usando la conocida expresión dada en (14) [5] [6] [7]:

$$\eta_{AM} = \frac{P_{salida}}{P_{entrada}} = \frac{P_{mec}}{P_{entrada}} = \frac{T_c \cdot \omega_{MA}}{P_{entrada}} \quad (14)$$

Donde:

$P_{salida}$  – es la potencia de salida en el árbol del motor asincrónico, [kW].

$P_{mec}$  – es la potencia mecánica en el árbol del motor asincrónico.

$T_c$  – es el torque de carga o resistivo del motor eléctrico, [N.m].

$\omega_{MA}$  – es la velocidad angular del motor asincrónico, [rad/s].

Con la medición de la potencia de entrada [10] del circuito de enlace Dc del inversor  $P_d$  y las corrientes y tensiones  $U_d$ ,  $I_d$ , así como las otras variables de trabajo del VSI a PWM, se elabora la potencia de referencia de entrada del accionamiento, donde el bloque difuso identifica su grado de distorsión y tiene identificado el índice de modulación con que se genera la onda sinusoidal que llega a los terminales del motor asincrónico. Es decir el estimador es implementado a través del cuadro indicado en línea discontinua de la figura 4.17, que físicamente es el DSP.

El esquema funciona bajo el siguiente algoritmo. Se muestrea la potencia de entrada del inversor  $P_d$ , asociada al índice de modulación  $m_{PWM}$  con que es entregada la onda sinusoidal de tensión, es evaluada por el bloque del modelo de la potencia de entrada de referencia, y con esto se tienen los errores de velocidad y potencia de entrada con respecto al mejor valor que debe generarse desde el PWM. Es decir la red neuronal entrega a su salida la optima razón U/f para las condiciones del torque de carga dado [11].

Las eficiencias del inversor y del motor eléctrico son evaluadas siguiendo las expresiones [7] (13) y (14).

Las pérdidas para el caso de un accionamiento con motor de 55 kW, 60 Hz el comportamiento se muestra en la siguiente figura 18.

Se investigaron las perdidas a diferentes indices de modulacion, apescto que se ve ilustra en la figura 18. Mas adelante se experimentaron las perdidas con un indice de  $m_{PWM}$  de 0.9, elcual reflejo un comportamiento evidente de cómo influye este factor en las perdidas del acero de la maquina asincronica. Ver figura 4.17.

### Pérdidas totales en el Sistema de Accionamiento Eléctrico

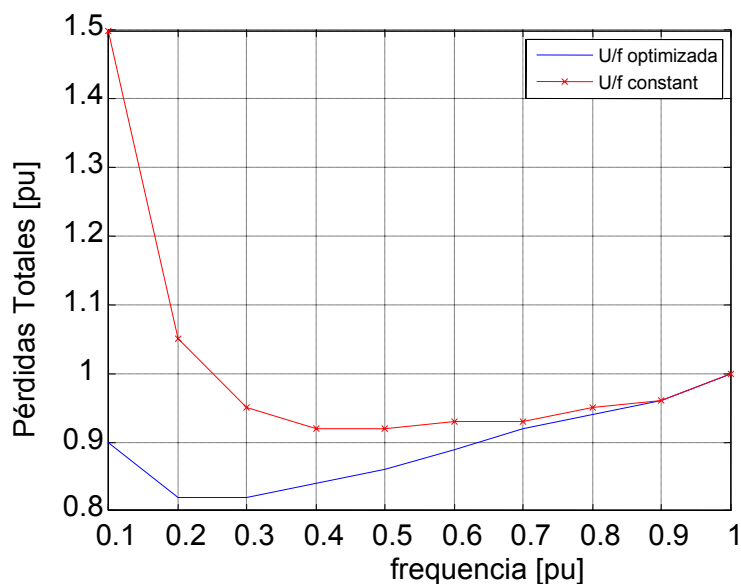


Figura 4.17 Pérdidas totales vs frecuencia de trabajo del motor asincronico.

Lo más interesante viene después cuando se observa la eficiencia del VSI to PWM y del motor eléctrico a diferentes frecuencias de la onda fundamental. Por lo tanto es de apreciar notoriamente este aspecto para futuras investigaciones. Esto esta reflejado en la figura 4.18.

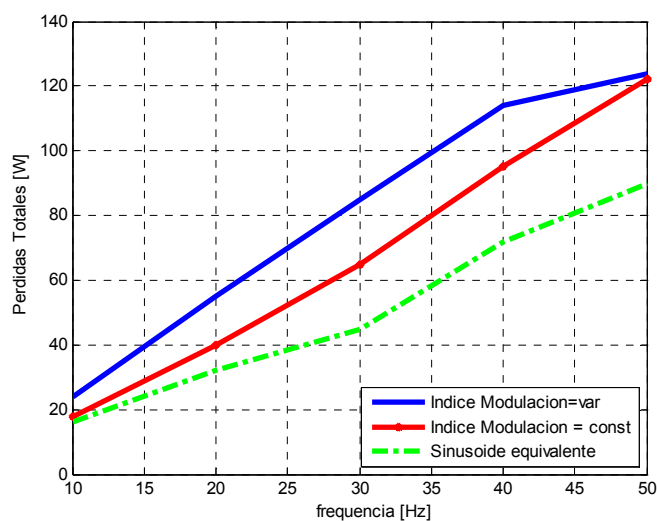


Figura 4.18 Pérdidas del acero vs frecuencia de salida de la componente fundamental de tensión con diferentes índices de modulación.

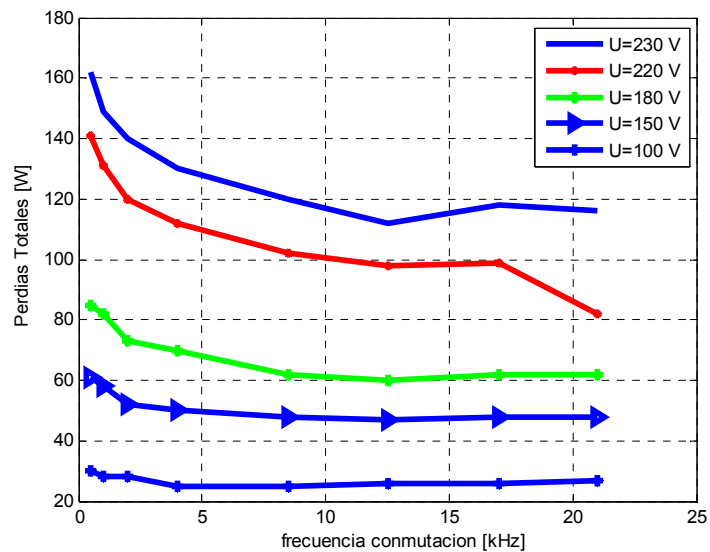


Figura 4.19. Pérdidas del acero vs frecuencia de conmutación con índice de modulación 0.9.

La eficiencia del motor eléctrico ante el torque electromagnético se comporta tal como se muestra en las figura 4.20.

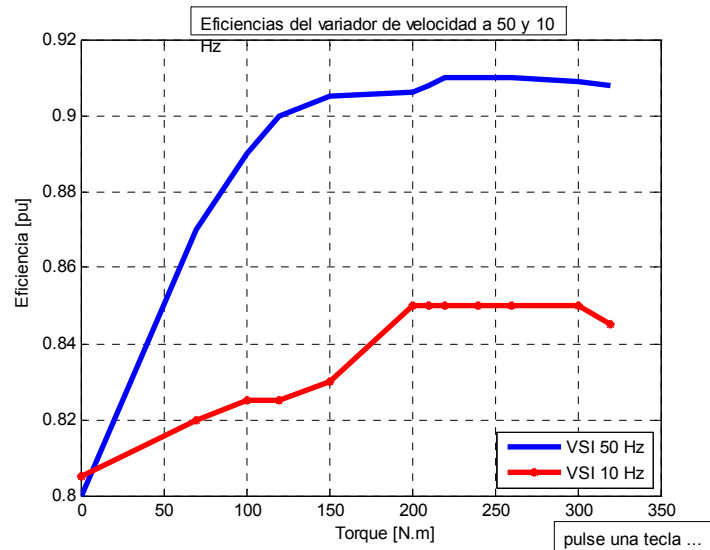


Figura 4.20 Eficiencia del inversor de tensión vs Torque de carga del motor a 50 y 10 Hz.

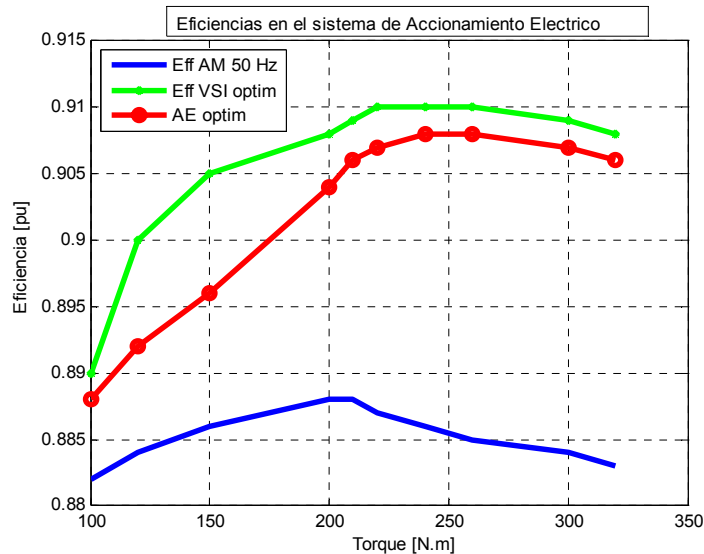


Figura 4.21 Eficiencias Del VSI a PWM, del motor y de todo el accionamiento con índices de modulación corregido.

Se hizo el estudio del comportamiento de la eficiencia del VSI, y el motor a diferentes torques de cargas, ver figura 4.21, con valores generados del PWM desde el estimador neuronal, es decir el índice de modulación que correspondía a las menores pérdidas, y reflejo las eficiencias mucho mas elevadas que cuando se utilizaron valores estándar.

Tabla4.1: Datos del motor asincrónico

Potencia	55 kW
Tensión	220 V
Corriente	170 A
rpm	1400
Factor de potencia	0.85

## 4.5- Conclusiones.

El uso de un Sistema Experto usando bloques difusos para evaluar la eficiencia en los inversores sinusoidales de tensión modulados a PWM resultó satisfactorio, así como para mostrar la influencia del índice de modulación en la ocurrencia de las pérdidas por esta causa en los accionamientos con motores asincrónicos.

# CAPITULO V

## Capítulo V: Evaluación técnico-económica del trabajo.

### 5.1- Introducción

Para representar la incidencia que tiene el efecto de cualquier avería que pueda ocurrir en uno de los accionamientos de bombas centrífugas que transportan pulpa laterítica, se tiene un estudio económico del sistema en la empresa Cmdte Ernesto Che Guevara de Moa.

Con el objetivo de mostrar el impacto que ocasionar una hora fuera de servicio de estos accionamientos, se cuantifican las pérdidas actuales, así como su costo y la relación costo beneficio.

### 5.2- Valoración Económica

La producción de níquel por el proceso CARON constituye uno de los métodos de mayor consumo energético en la industria nacional.

Actualmente una tonelada de níquel obtenida por este proceso consume más de 10 MW.h de energía eléctrica y constituye más del 20 % del costo de producción, y esto se refleja en el nivel de vida de la población. Es por esto que la eficiencia en el uso de la energía eléctrica tiene un impacto tanto económico como social.

En las plantas minero metalúrgicas como las de Moa y Nicaro, se precisan que los mayores consumidores de energía eléctrica lo representan los accionamientos eléctricos de: producción de aire comprimido, las bombas centrífugas, las instalaciones de molienda y secado y los ventiladores.

Los accionamientos de bombas centrífugas están entre los accionamientos más empleados en el proceso de obtención de níquel ya sea por tecnología Carbonato amoniacal o por Lixiviación Ácida; los cuales se caracterizan por una dependencia entre la carga de presión ( $H$ ) y el caudal ( $Q$ ),  $H=f(Q)$ , que corresponde a una potencia  $P=f(Q)$  y una eficiencia  $\eta=f(Q)$  dada en su punto de operación, donde se interceptan con la característica de la red hidráulica y que determina el punto de trabajo del motor de inducción con un deslizamiento dado.



Por la exigencia del proceso tecnológico, frecuentemente se hace necesario variar el caudal  $Q$ , lo que en la mayoría de los casos, se realiza estrangulando la tubería de impulsión y con esto aumenta la resistencia de la red y disminuye el rendimiento de la instalación. El caudal disminuye y la carga de presión aumenta, pero parte de esta energía  $\Delta H_{val}$  se pierde en la válvula de impulsión. Si el número de revoluciones de la turbo-máquina se disminuye de tal manera que pase por el punto de funcionamiento  $H-Q$  necesario, el rendimiento se mantiene aproximadamente constante y la instalación se regula sin pérdidas adicionales; llevar el número de revoluciones al necesario se puede conseguir con un variador de velocidad (Inversor Sinusoidal de Tensión) adecuadamente seleccionado.

En la práctica en la empresa Comandante Ernesto Che Guevara de Moa se suele estrangular por la succión logrando el mismo efecto hasta que la caída de presión en la línea de succión alcanza la temperatura de vapor del fluido y aparece el fenómeno de la cavitación.

En esencia la introducción del esquema de control difuso con los variadores de velocidad, y más si está avalado como el presente estudio del proceso para mejorar eficiencia en el accionamiento, permite la disminución de las pérdidas de energía y aumenta el tiempo de vida útil o empleo de la bomba.

Es bueno indicar que con el aumento de las pérdidas no sólo disminuye el rendimiento sino también empeora el factor de potencia del motor eléctrico.

Para hallar en la práctica la característica de la red, se hace necesario determinar las pendientes hidráulicas, esto se grafica en este trabajo a diferentes concentraciones. Este gráfico es de mucho valor por el hecho de poder utilizar velocidades adecuadas donde tienen lugar las menores pérdidas hidráulicas en el sistema de accionamiento de bombas. El cálculo económico está dado por el ahorro de energía que puede significar cuando utilizamos el controlador difuso y el incremento del tiempo de vida útil de la instalación.

Los resultados de los principales indicadores tomados en cuenta en la determinación de los gastos de explotación de la instalación actual trabajando en dos condiciones (a régimen normal de trabajo (1) y a régimen cavitacional (2)) de operación según la metodología propuesta [92][Turro. 2002].

En condiciones normales de operación, la instalación trabaja con una capacidad de 160 m<sup>3</sup> / h; sin embargo cuando entra en régimen cavitacional su capacidad se reduce a la mitad, ocasionando pérdidas por mayor consumo de energía y mantenimiento de la instalación; con el correspondiente incremento de los costos de producción de la empresa y una menor productividad. Por consiguiente, si se utiliza el controlador en el trabajo del accionamiento eléctrico de la bomba centrífuga, de manera que la regulación de su caudal por la velocidad se encuentre en los rangos de funcionamiento alejados del régimen de cavitación, se ahorrarían 3,2 \$ CUC por cada m<sup>3</sup> de pulpa tipo cola transportada, con un ahorro en los gastos de explotación de 40 340 CUC anualmente, aspecto que se muestra en la tabla 5.1.

**Tabla 5.1 Costo de transportación (\$CUC) de un m<sup>3</sup> de pulpa laterítica tipo cola.**

INDICADORES	1	2
Gastos de salario del personal de operación.	17769.7	17769.7
Gastos por consumo de agua para disminuirle la temperatura a la cola.	32850	32850
Gastos de energía eléctrica.	143848.4	182208
Gastos por iluminación.	78.84	78.84
Gastos imprevistos.	14	14
Gastos por mantenimiento.	3772	4883
Gastos de amortización de las bombas.	2672.307	2672.307
Gastos de amortización de las tuberías y soportes.	4892.065	4892.065
Gasto del salario del personal indirecto	813	813
Total ( $G_b$ )	205943.11	246180.91
Gasto para transportar un m <sup>3</sup> de pulpa tipo cola en 3.5 Km [CUC]	1.3	4.50

FUENTE: A. Turro. 2002. Tesis Doctoral.

La comparación de las variantes 1 y 2, es sobre el gasto que representa el uso del Sistema experto en el sentido de evitar cualquier avería relacionada con las causas

sobre calentamiento en el motor o la bomba centrífuga, tupiciones en el sistema hidráulico, etc., provocando un mal funcionamiento del accionamiento.

### 5.3- Estado actual de las pérdidas en el accionamiento de hidrotransporte de pulpa laterítica.

En este sistema las pérdidas existentes actualmente pueden clasificarse como:

- Pérdidas de energía eléctrica.
- Pérdidas metalúrgicas.

En las tablas 5.2 se brindan datos sobre pérdidas de energía en los accionamientos de bombas centrífugas en la sección de hidrotransporte de pulpa laterítica tipo colas, que se envía desde los tanques de sedimentación hacia el dique y la planta de neutralización.

Tabla 5.2 Pérdidas de energía de los accionamientos eléctricos de bombas centrífugas en la sección de hidrotransporte de pulpa laterítica.

<b>Motor / causa</b>	<b>Cantidad</b>	<b>Energía al mes pérdida [MW.h]</b>	<b>Precio del MW.h [CUC]</b>	<b>Pérdidas al año. [CUC]</b>
Motor operando con baja carga, y a régimen de cavitación.	8	0.060	21.80	3819.38

FUENTE: L. Rojas Purón. 2002. Informe Técnico.

Tabla 5.3 Pérdidas eléctricas por aumento de la densidad de la pulpa laterítica en el hidrotransporte.

<b>Variaciones</b>	<b>Variaciones</b>	<b>Tiempo de</b>	<b>Energía</b>	<b>Precio del</b>	<b>Pérdidas al</b>
--------------------	--------------------	------------------	----------------	-------------------	--------------------

<b>de la densidad [kg/m<sup>3</sup>]</b>	<b>de la corriente [A] y potencia [kW]</b>	<b>ocurrencia al mes [h]</b>	<b>al mes [kW.h]</b>	<b>kW.h [CUC].</b>	<b>año. [CUC].</b>
1046-1750	I=43–150.3 P=26.6-53	288 (40%)	1169.28	0.0218	30 500.88
Pérdidas totales en los sistemas de transporte de pulpa de colas con accionamientos de bombas en la planta de lixiviación.					30 500

FUENTE: L. Rojas Purón. 2002. Informe Técnico.

## 5.4- Conclusiones

- Con la introducción de la metodología del Sistema Experto desarrollada se puede evitar gran número de averías y ampliar la vida útil de los accionamientos eléctricos de la bomba centrífuga de hidrotransporte de pulpa laterítica donde se logra un efecto económico anual de unos 30 500 CUC pesos convertibles, por concepto de mineral dejado de procesar por fuera de servicio el sistema.
- Con el empleo de la inteligencia artificial usando la lógica difusa, es posible adecuar las zonas de trabajo más eficientes en la obtención de las curvas de explotación del grupo Variador de velocidad y Motor de Inducción.

## Recomendaciones

- Para futuro uso de este trabajo verificar las reglas Difusas de los bloques de Matlab ya que estas fueron hechas para un motor en específico de la planta de lixiviación de la empresa según las mediciones efectuadas.
- Continuar con el desarrollo de este trabajo porque la programación GUI sirve como plataforma para evaluación monitoreo y control real directamente de los motores.
- Se recomienda utilizar la presente base teórica y experimental, así como de simulación, la arquitectura del Sistema Experto ofrecido en este trabajo para continuar la investigación acerca del diagnóstico y evaluación de la energía entregada por los variadores de velocidad en accionamientos.
- Con el uso de hardware apropiado es posible realizar experimentos para probar la metodología expuesta en este trabajo, en aplicaciones prácticas.
- Este trabajo puede ser utilizado para estudios futuros tanto en accionamientos eléctricos como en otras áreas en la ingeniería eléctrica.

## Bibliografía

- ABAD, H.B.B.; VARJANI, A.Y.; ASGHAR, T. "Using Fuzzy Controller in Induction Motor Speed Control with Constant Flux", *Procedimientos de la Academia Mundial de Ciencia. Ingeniería y Tecnología*, 2005, abril (5).
- ABDIN, E.; GHOEEM, A.; DIAB, H. *Efficiency optimization of a vector controlled induction motor drive an artificial neuronal network*. IECON Proceeding Annual Conference, 2003: p 2543-2548.
- ABRAHAMSEN, F. et. al. Efficiency-optimized control of medium size induction motor drives. *IEEE Transaction on Industrial Application*, 2001, 36(6): p 1761-1767.
- ANTOINE, K.K. *Patrones cognoscitivos para el diagnóstico de las escobillas de los turbogeneradores en la Empresa Cmdte. Ernesto Che Guevara*. Trabajo de Diploma, ISMM, 2007.
- BABUSKA, R.; VERBRUGGEN, H.B.; HELLENDORRN, H. *Promising Fuzzy Modelling and Control Methodologies for Industrial Applications*. Holanda: Universidad de Tecnología de Delft, s.a.
- BERNAL, F.; CERRADA, F.R. Model-based loss minimization for DC na AC vector-controlled motors including core saturation. *IEEE Transaction on Industrial Application*, 2000, 36: p 755-763.
- BLANUSA, B.; MATIC, P.; VUKOSAVIC, S.N. *An improved search based algorithm for efficiency optimization in the induction motor drives*. Yugoslavia: Universidad de Banja Luka, 2002.
- BÖCKER, J.; MATHAPATI, S. *State of the Art of Induction Motor Control*. Alemania: Universidad de Paderborn.

- BOGLIETTI, A. et. Al. Influence of the inverter characteristics on the iron losses in PWM inverter-fed induction motors. *IEEE Trans. On Industry Applications*. 1990, 26(5).
- BOSE, B.K. *Modern Power Electronics and AC Drives*. New York: Prentice Hall, 2002.
- BOSE, B.K. Expert System, Fuzzy Logic, and Neural Network Applications in Power Electronics and Motion Control. *Conferencia del IEEE*, Agosto 1994, 82(8).
- BURNS, R.S. *Advanced Control Engineering*. Butterworth – Heinemann, 2001.
- CASADEI, D. et. al. Two Viable Schemes for Induction Motors Torque Control. *Transacciones del IEEE sobre la Electrónica de Potencia*, septiembre 2002, 17(5).
- COSTA MONTIEL, A.; VILARAGUT LLANES, M. *Modelos Matemáticos y Simulación del Motor de Inducción Trifásico*. La Habana: CIPEL - ISPJAE, 2005.
- CZARNECKI L. Effect of supply voltage harmonics on IRP-based switching compensator control. *IEEE Transactions on Power Electronics*. February 2009, 24(2): p 483-488.
- DÍAZ, H.; BORJAS, R.; SAGÁRDIA, A.. Diseño y ensayo de un controlador difuso para un motor de inducción trifásico. *Revista Facultad de Ingeniería U.T.A*, 1997, 4 .
- EMADI, A. *Energy-Efficient Electric Motors*. 3 ed. 2004.
- FILIPPICH, M. *Digital Control of a Three Phase Induction Motor*. Trabajo de Diploma. Universidad de Queensland, 2002.
- HENDERSON, D.S. *Variable Speed Electric Drives – Characteristics and Applications*. Universidad Napier, Reino Unido.

GARCIA, G.; SANTIESTÉBAN, A.; BRIGNONE, D. Iron losses influence on a field-oriented controller. 20<sup>th</sup> International Conference on Industrial Electronics, Control and Instrumentation, IECON-94, Bologna, Italy. p 633-638.

Kaburlasos, V. G.: "Novel Fuzzy System Modelling for Automatic Control Applications", 4<sup>ta</sup> Conferencia Internacional sobre Tecnología y Automatización, Thessaloniki, Greece, October 2002.

KARRIS, S.T. *Introduction to Simulink with Engineering Applications*. [s.l]: Orchard Publications, 2006.

KIOSKERIDIS, I.; MARGARIS, N. Loss Minimization in Induction Motor Adjustable Speed Drives. *Transacciones del IEEE sobre la Electrónica de Potencia*, Febrero del 1996, 43(1).

KIOSKERIDIS, I.; MARGARIS, N. Loss Minimization in Scalar-Controlled Induction Motor Drives with Search Controllers. *Transacciones del IEEE sobre la Electrónica de Potencia*, marzo del 1996, 11(2).

KUMAR, S.; SINGH, B.; CHATTERJEE, J. K. *Fuzzy Logic Based Speed Controller for Vector Controlled Cage Induction Motor*. Nueva Delhi: Instituto de Tecnología de la India, s.a.

MATH WORKS INC. *MATLAB Fuzzy Logic Toolbox User's Guide*. [s.l.]: Math Works Inc., 1998.

MCPHERSON, G.; LARAMORE, R.D. *An Introduction to Electrical Machines and Transformers*. 2 ed. La Habana, 1988.

MOHAN, N.; UNDELAND, T.M.; ROBBINS, W.P. *Power Electronics: Converter Applications and Design. Motor Drive Applications*. 2 ed. Nueva York: John Wiley & Sons, 2002. TI, TII.

*Sistema experto de eficiencia en accionamientos con variadores de velocidad en la Empresa Cmdte. Ernesto Che Guevara de Moa.*



MORENO EGUILAZ, J.M., et.al. *Fuzzy logic based improvements in efficiency optimization of induction motor drives*. Barcelona: Universidad Politécnica de Catalunya.

MUDI, R. K.; PAL, N.R. A Robust Self-Tuning Scheme for PI- and PD-Type Fuzzy Controllers. *Transacciones del IEEE sobre la Lógica Fuzzy*. febrero del 1999, 7(1).

OROS, R. C.; FORTE, G.O.; CANALI, L. *Scalar Speed Control of a d-q Induction Motor Model Using Fuzzy Logic Controller*. Córdoba: Universidad Tecnológica Nacional, 2004.

RASHID, M. H. *Power Electronics Handbook*. [s.l.]: Academic Press, 2001.

REZNIK, L. *Fuzzy Controllers*. [s.l.]: Newnes Publishers, 1993.

ROJAS PURÓN, L.D.; GUZMÁN DEL RIO, D.; MORERA, M. *Mejoramiento de eficiencia en accionamiento de bomba centrífuga por control de pérdidas usando lógica difusa*. XI Reunión de Trabajo en Procesamiento de la Información y Control, septiembre del 2005.

Rojas Purón, L. D. *Accionamiento eléctrico asincrónico para transporte eficiente de pulpa laterítica*. Tesis doctoral. ISPJAE, 2006.

ROMERO RUEDA, I. *Conferencias de Máquinas Eléctricas III: Conferencia #5: Momentos de rotación y potencias del motor de inducción*. Moa: ISMM, 2002.

SÁNCHEZ PARRA, M.; BAHAMACA FERNÁNDEZ, L.J. *Realización de controladores lógicos difusos para el control de procesos en tiempo real: Especificación y Diseño*. México: IIE – UCI, [s.a].

- SOUSA, G.C.D.; BOSE, B.K.; CLELAND, J.G. Fuzzy Logic Based On-Line Efficiency Optimization of an Indirect Vector Controlled Induction Motor Drive. *Transacciones del IEEE sobre la Electrónica Industrial*. Abril de 1995, 42(2).
- SPIEGEL, R. J.; TURNER, M.W.; MCCORMICK, V.E. *Fuzzy – Logic – Based Controllers for Efficiency Optimization of Inverter – Fed Induction Motor Drives*. EE.UU: Agencia de Protección del Medioambiente, Mayo 1999.
- TA, C.M.; HORI, Y. Convergence Improvement of Efficiency-Optimization Control of Induction Motor Drives. *Transacciones del IEEE sobre Aplicaciones Industriales*. noviembre / diciembre del 2001, 37(6).
- TAKAGI. T.; SUGENO, M. Application of fuzzy algorithms for control of simple dynamic plant. *IEEE Proceedings*. Diciembre 1974, 12: p 1585-1588.
- TURNER, M.W.; MCCORMICK, V.E.; CLELAND, J.G.: *Efficiency Optimization Control of AC Induction Motors: Initial Laboratory Results*. EE.UU: Agencia de Protección del Medioambiente, Mayo 1999.
- VAEZ – ZADEH, S.; HENDI, F. A continuous efficiency optimization controller for induction motor drives. *Energy Conversion and Management*. 2005, 46: p. 701–713.
- WALKER M. L.; DIANA G. Test bed system to evaluate the efficiency of variable speed drives under varying load conditions. *IEEE* , 1998. p 345 –348.
- YATIM A. ; UTOMO, W. On line optimal control of variable speed compressor motor drive using neural control model. *PE Proceeding Conference*, 2004. p 83-87.

## Referencia en Internet

VIEJO HERNANDO, D. Sistemas expertos, 2003. [en línea]. Consultado [20040406].

Disponible en: <http://www.divulga-ia.com/cursos/cursos.xml?numero=2&nombre=2003-9-26a&numLecc=1>

SAMPER MÁRQUEZ, J.J. Introducción a los sistemas expertos, 2004. [en línea].

Consultado [20081011]. Disponible en: <http://www.redcientifica.com/doc/doc199908210001.html>.

SAMPER, J. Sistemas expertos. El conocimiento al poder, 2003. [en línea]. Consultado

[20090318]. Disponible en: <http://www.psycologia.com/articulos/ar-jsamper01.htm>.

CRIADO BRIZ J.M. Introducción a los sistemas expertos. [en línea]. 2002. Consultado

[20090109]. Disponible en: [http://ingenieroseninformatica.org/recursos/tutoriales/sist\\_exp/cap1.php](http://ingenieroseninformatica.org/recursos/tutoriales/sist_exp/cap1.php).

WIKIPEDIA . Sistema experto. [en línea]. 2004. Consultado [20090211]. Disponible en:

[http://es.wikipedia.org/wiki/Sistema\\_experto](http://es.wikipedia.org/wiki/Sistema_experto).

CASTRO M. Sistemas expertos. [en línea]. 2002. Consultado [20090423]. Disponible en:

[http://strix.ciens.ucv.ve/~iartific/Material/PP\\_Sistemas\\_Expertos.pdf](http://strix.ciens.ucv.ve/~iartific/Material/PP_Sistemas_Expertos.pdf).

FÉLIX, J. Aplicaciones, ventajas y limitaciones de los sistemas expertos. [en línea]. 2004.

Consultado [20090512]. Disponible en: <http://efelix.iespana.es/efelix/expertaplicaciones.htm>.