



REPÚBLICA DE CUBA  
MINISTERIO DE EDUCACIÓN SUPERIOR  
INSTITUTO SUPERIOR MINERO METALÚRGICO DE MOA  
“Dr. Antonio Núñez Jiménez”

# *Trabajo de Diploma*

En opción al Título de Ingeniero Eléctrico

**Título: Control directo del torque de accionamiento con motor de inducción basado en regulador neural usando variador de velocidad YASKAWA.**

**Diplomante: Jorge Antonio Carralero Rodríguez**

**Tutores: Dr. C. Luis Delfín Rojas Purón**

**Ms.C. Miguel Ángel Álvarez Domínguez**

**Curso, 2010 -2011**

**“Año 53 de la Revolución”**



## DECLARACION DE AUTORIDAD

Yo: Jorge Antonio Carralero Rodríguez

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

-----

Jorge Antonio Carralero  
Rodríguez

(Diplomante)

-----

Dr. C. Luis Delfín Rojas Purón

(Tutor)

-----

Ms.C. Miguel Ángel Álvarez D.

(Tutor)



## **AGRADECIMIENTOS**

A todas aquellas personas que durante la carrera me prestaron su ayudada y colaboración desinteresada y contribuyeron con esto a convertirme en un mejor ser humano.



## **DEDICATORIA**

Este trabajo está dedicado especialmente a mis padres por todo su apoyo y comprensión.

A mi hermana y a mi novia por mantener en mí la confianza durante todos estos años de estudio.

A toda mi familia por mantener la fe en mí y velar por mí día a día en todo momento.

A mis tutores Luis Delfín Rojas Purón y Miguel Ángel Álvarez Domínguez por toda su ayuda y dedicación durante el desarrollo de este trabajo.

A mis profesores de toda la carrera por todos los conocimientos brindados en especial al profesor Yordan.

A mis vecinos que siempre estuvieron atentos por mis resultados.

A mis amigos que me brindaron su apoyo incondicionalmente.

A mis compañeros de aula y de cuarto por habernos mantenido firmes a pesar de los obstáculos que se nos presentaron durante estos 5 años y por mantenernos juntos en todo momento que es lo que nos hace especiales.

A todos:

**Muchas Gracias.**



## **PENSAMIENTO**

Hay una fuerza motriz más poderosa que el vapor, la electricidad y la energía atómica: la voluntad.”

Albert Einstein



## **RESUMEN**

Este trabajo consiste en el diseño de un controlador de velocidad que opera dentro de un esquema por control directo del torque en un accionamiento con motor de inducción alimentado desde un variador de velocidad tipo YASKAWA.

La estructura del controlador de velocidad se basa en un observador del torque de carga, un estimador de velocidad y una red neuronal artificial. Las condiciones de cargas variables son ajustadas con el uso de un bloque neuronal

Se incluye además, la base teórica experimental del accionamiento obtenida desde una interface gráfica, ayudada por el toolbox del MATLAB.



## **ABSTRACT**

This research consists on a design of a speed controller that works inside the control outline direct of the torque in working with on induction motor feeding from varieties YASKAWA type.

The reading of the controller is based on an observer of the load torque, a speed smatter and also an artificial neuronal net. The conditions of a variable loads are adjusted with the use of a diffused block.

Besides, the experimental theory base of working obtained from a graphic interface is included, helped by a toolbox of MATLAB.



## Índice

DECLARACION DE AUTORIDAD .....	I
AGRADECIMIENTOS.....	II
DEDICATORIA .....	III
PENSAMIENTO.....	IV
RESUMEN .....	V
ABSTRACT .....	VI
Índice .....	VII
INTRODUCCION GENERAL.....	1
PROBLEMA .....	3
HIPÓTESIS.....	3
OBJETIVO .....	3
RESULTADOS ESPERADOS .....	3
Capítulo I .....	4
1.1 Introducción .....	5
1.2 Accionamiento por control directo del torque. ....	6
1.3 Esquema principal de control directo del torque (DTC).....	8
1.4 Conclusiones parciales del capítulo.....	12
Capitulo II .....	13
2.1 Introducción .....	14
2.2 Descripción del variador.....	15
2.3 Esquema de potencia. Circuito de mando. ....	17
2.3.1 Instrucciones y normas para su uso .....	18
2.4 Protocolos de comunicaciones.....	18
2.4.1 Formato del mensaje.....	21



2.5 Aplicaciones en accionamientos con bombas centrífugas.....	25
2.5.1 Modificación de las características con la velocidad.....	26
2.5.2 Regulación del flujo en bombas centrífugas. ....	26
2.5.3 Modificación de la curva del sistema sobre el que trabaja la bomba.....	26
2.5.4 Modificación de la curva de la bomba. ....	28
2.5.5 Modificación simultánea de las curvas del sistema y la bomba. ....	28
2.5.6 Arranque y paro de la bomba.....	29
2.5.7 Leyes de afinidad.....	30
2.5.9 Comparación energética entre métodos de regulación de caudal .....	31
2.6 Conclusiones parciales .....	31
Capítulo III .....	32
3.1 introducción. ....	33
3.2 Base experimental del accionamiento industrial .....	33
3.3 Gráficos de comportamiento del accionamiento con bombas centrífugas.....	38
3.3.1 Gráficas de comportamiento.....	39
3.4 Conclusiones del capítulo.....	43
Capítulo IV .....	44
4.1 Introducción. ....	45
4.2 Nociones sobre redes neuronales artificiales. ....	45
4.2.1 El soma. ....	45
4.2.2 El axón. ....	46
4.2.3 Las dendritas. ....	46
4.2.4 La sinapsis.....	46
4.2.5 Funciones de activación. ....	47
4.2.6 Aspectos de control.....	51
4.2.7 Identificación del sistema.....	51



4.2.8 principio de superposición. ....	52
4.2.9 tipos de redes neuronales artificiales. ....	52
4.3 Modelo del accionamiento eléctrico con motor de inducción usando red Feed forward.....	54
4.4 Red neuronal Feed Forward .....	56
4.4.1 Programa para entrenar la red neuronal de tipo Feed Forward.....	56
4.5 Gráficos de comportamiento de la red neuronal.....	59
4.5 Conclusiones parciales. ....	61
Capítulo V .....	62
5.1 Introducción. ....	63
5.2 Cálculo del aporte económico.....	63
5.3 Cálculo del tiempo de amortización de la inversión. ....	65
5.4 Conclusiones parciales .....	66
CONCLUSIONES .....	67
RECOMENDACIONES .....	68
BIBLIOGRAFÍA.....	69
ANEXOS .....	72



## INTRODUCCION GENERAL

La mayoría del consumo eléctrico no doméstico 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 vínculo de corriente directa mejora la salida rectificadora 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.

Importantes ahorros de energía parece poco prometedor. 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.

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

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



## **PROBLEMA**

La necesidad de diseñar un controlador directo del torque, para las condiciones de alta variabilidad de carga mecánica en los accionamiento con motor de inducción, de hidro - transporte de pulpa laterítica en las plantas procesadoras de mineral de níquel, para garantizar la regulación eficiente de la velocidad, y que se auto – ajuste ante cualquier condición de carga en su árbol.

## **HIPÓTESIS**

Mediante la identificación del modelo vectorial del accionamiento con motor de inducción, se puede diseñar un controlador de torque directo, que opere bajo las condiciones de un observador de torque de carga y un estimador neuronal, que entrega como salida la velocidad estimada, con muy buenas cualidades de regulación, capaz de aprender para un amplio diapasón de carga mecánica en su árbol.

## **OBJETIVO**

Diseñar un control directo de torque para un accionamiento con motor de inducción que trabaje sin sensor de velocidad y se auto – ajuste ante cualquier condición de carga mecánica, basado en una red neuronal artificial.

## **RESULTADOS ESPERADOS**

- Describir el sistema de accionamiento eléctrico con motor de inducción.
- Ofrecer el diagrama de bloque para el control directo del torque del motor eléctrico usando una red neuronal.
- Brindar un observador de torque de carga para el control del motor eléctrico.
- Elaborar un bloque estimador neuronal de velocidad a partir de la medición de corriente y tensión en el motor.
- Montar el esquema de torque directo con motor de inducción sin sensor de velocidad.
- Ofrecer la modelación del esquema de control de torque directo del accionamiento con motor de inducción asistida por MATLAB.



# Capítulo I

## Estado del arte del control directo del torque.



## 1.1 Introducción

Antes de los años 1950 el uso de motores de inducción se limitaba principalmente a aplicaciones en modo de función libre, sin ningún control sobre su velocidad, posición o par. Las aplicaciones que requerían un control aproximado de la velocidad utilizaban técnicas básicas tales como, cambio de número de polos, variación de la resistencia del rotor, control por tensión de alimentación, etc. Esto requería en ocasiones características especiales de diseño en el motor y presentaban una respuesta pobre de control.

Conforme se fueron haciendo evidentes las ventajas del motor de inducción comparado con otros tipos de motores eléctricos, se vio la necesidad de desarrollar nuevas técnicas de control con el fin de expandir su campo de aplicación. Dos aspectos limitaban el desarrollo de propulsores para motores de inducción, por un lado el motor de inducción es un sistema dinámico no lineal y los modelos matemáticos que le representaban hacían difícil la implementación de un sistema de control y por otro lado los dispositivos de electrónica de potencia y de procesamiento de señales aun no alcanzaban el desarrollo conveniente para implementar dichos sistemas.

Con los avances en la microelectrónica y electrónica de potencia fue posible desarrollar propulsores de uso industrial empleando técnicas de Control Escalar convencionales las cuales requerían poca capacidad de cómputo. Dichos propulsores no permitían un control sobre el par desarrollado por la máquina y presentaban una respuesta pobre en condiciones de baja velocidad y mayores a la nominal.

Este trabajo explica los fundamentos de la tecnología de control directo de torque aplicado en variadores de frecuencia, con lo cual podemos controlar el torque y la velocidad del motor. A través de la tecnología de control directo de torque y del desarrollo e implementación de un sistema de control de bombas mediante un variador de frecuencia, se realiza la automatización de un sistema de accionamiento de bombas en paralelo obteniendo ahorro de energía y un control más preciso de la variable a controlar, obteniendo mejores respuestas dinámicas de la aplicación.



## 1.2 Accionamiento por control directo del torque.

El control directo del par (DTC) está basado en la teoría de la regulación de campo orientado de las máquinas de campo giratorio y de la autorregulación. En el control directo del par, el motor y ondulator forma prácticamente una unidad. Todos los procesos de conmutación del ondulator dependen del estado electromagnético del motor. Como en el caso de accionamiento de corriente continua, el sistema DTC permite la regulación por separado del campo magnético del motor, del flujo y del par. En este esquema, el valor instantáneo del flujo del estator y el par se calculan solo usando las variables primarias (corriente y tensión del estator). El sistema DTC permite pilotar rápida y flexiblemente los motores trifásicos, es decir, el tiempo de respuesta del par es sumamente corto.

A diferencia del control vectorial, el DTC no intenta reproducir el control del MCC excitación independiente, sin explotar directamente las capacidades de producir torque y flujo de un MI (motor de inducción) alimentado por inversor PWM.

Así, en lugar de tener un patrón definido de modulación por ancho de pulsos, se definen por bandas de histéresis para el control de torque y flujo y las conmutaciones se hacen según si las variables se encuentran o no fuera de la banda.

Para ello se aprovechan las siguientes relaciones:

-El torque en una MI es proporcional a:

$$T \propto (\vec{\varphi}_s) \cdot (j\vec{\varphi}_r) \quad (1)$$

-En un intervalo corto de tiempo, la variación del flujo puede expresarse como:

$$\Delta\vec{\varphi}_s = \vec{V}_s \cdot \Delta t \quad (2)$$

-Para el flujo de rotor se tiene:

$$\vec{\varphi}_r \propto \frac{\vec{\varphi}_s}{1 + s\sigma\tau_r} \quad (3)$$

De acuerdo a estas relaciones el torque es proporcional al producto de las componentes ortogonales del vector espacial del flujo del estator y del vector de flujo de rotor.



Así, como el torque es proporcional a  $(j\vec{\phi}_r)$  y el flujo de rotor se puede obtener a partir del vector de flujo de estator y este del vector de voltaje, se tendrá que el torque se controla en el sentido ortogonal del vector de voltaje.

El trabajo presentado por Habetler, Divan] estudia un esquema por control directo del par usando inversores de modulación del ancho del pulso tal como el inversor con el lazo de corriente continua. Un rasgo único del método de control presentando consiste en que sólo requiere un sensor para la corriente continua del bucle de corriente continua.

Casadei, Grande y Serra hacen un control del par de un motor de inducción por campo orientado del rotor basado en las componentes de campo del estator como variables de control, sin necesidad de un sensor de velocidad. Este sistema combina las ventajas del campo orientado del rotor y control vectorial del campo del estator permitiendo buen comportamiento del accionamiento usado un esquema simple del control. Este esquema está afectado por las variaciones de la inductancia total de dispersión, que determina el funcionamiento desintonizado. Se presenta un método que permite la posibilidad de estimar la inductancia total de dispersión además de la identificación de la inductancia propia del estator.

El DTC o control directo de par es un revolucionario método de control de motor para accionamientos de media y baja tensión que permite un preciso control tanto de velocidad como de par sin necesidad de encoders o retroalimentación desde eje del motor. El DTC usa como variables de control principales el flujo en el estator y el par. Los cálculos del estado del motor se actualizan 40.000 veces por segundo (esto es, cada 25  $\mu$ s) gracias al avanzado software de modelización del motor y al procesado de señales de alta velocidad. Esta continua actualización del estado del motor y la comparación de los valores reales con los de referencia permiten que cada una de las conmutaciones en el inversor sea determinada independientemente, sin seguir un patrón de conmutación pre establecido. El preciso control de par alcanzado con el DTC permite a los accionamientos de media y baja tensión proporcionar el máximo par de arranque, siempre de modo suave y controlado. La excepcionalmente rápida respuesta en par de los accionamientos de media y baja tensión.



Figura 1.1 Respuesta típica del torque de un variador con DTC comparado con control del vector de flujo o lazo abierto con modulación de ancho de pulso (PWM).

### 1.3 Esquema principal de control directo del torque (DTC).

En este esquema, el valor instantáneo del flujo del estator y el par electromagnético (que se muestra en las ecuaciones 6 y 8) se calculan usando solo las corrientes y las tensiones del estator, cuyas expresiones se muestran en las ecuaciones 4 y 5. La figura 1.3 muestra el esquema simplificado del funcionamiento del inversor y los vectores asociados a las tensiones para los distintos estados. La tabla 1.2 muestra los posibles estados de conmutación del inversor. El vector del inversor tiene ocho estados de operación, seis activos (V1 a V6) y dos inactivos (V0 y V7). La ecuación 7 muestra el cálculo del ángulo del flujo del estator que define el sector del sextante el que está situado el flujo.

$$\underline{u}_s = u_{ds} + ju_{qs} = R_s \underline{i}_s + \frac{d\Phi_s}{dt} = \sqrt{2/3} \left[ u_{as} - 0.5u_{bs} - 0.5u_{cs} + j \frac{\sqrt{3}}{2} (u_{bs} - u_{cs}) \right] \quad (4)$$



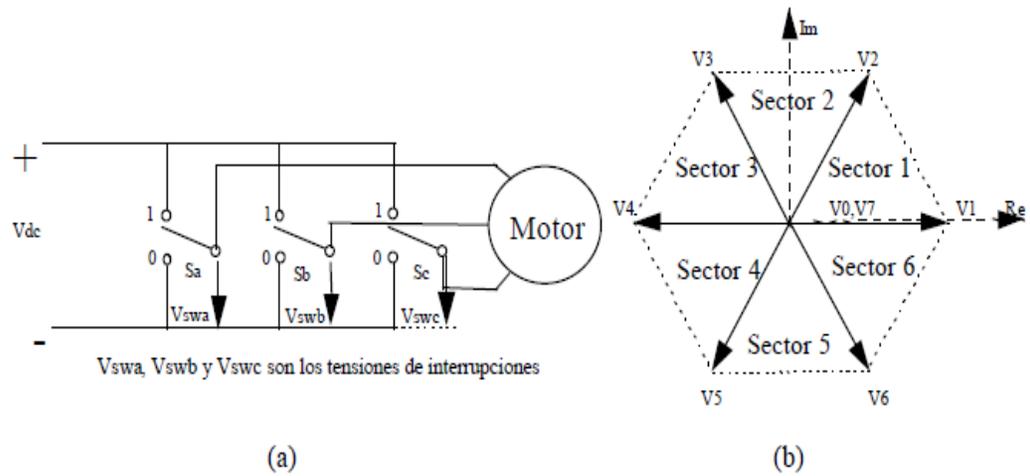


Figura 1.3 Muestra de los estados de tención del inversor.

(a) Esquema simplificado de la alimentación del motor con el inversor.

(b) Sector del flujo.

**Tabla: 1.2 Estado de los interruptores del inversor**

Estado	SA	SB	SC	Estado de preparación	V(K)
0	0	0	0	Inactivo	V0
1	1	0	0	Activo	V1
2	1	1	0	Activo	V2
3	0	1	0	Activo	V3
4	0	1	1	Activo	V4
5	0	0	1	Activo	V5
6	1	0	1	Activo	V6
7	1	1	1	Inactivo	V7



El flujo magnético y su ángulo vienen definido por las ecuaciones 6 y 7

$$\underline{\Phi}_s = \Phi_{ds} + j\Phi_{qs} = \int (u_{ds} - R_s i_{ds}) dt + \int (u_{qs} - R_s i_{qs}) dt \quad (6)$$

$$\theta = \arctan\left(\frac{\Phi_{qs}}{\Phi_{ds}}\right) \quad (7)$$

El par electromagnético se calcula como:

$$M_e = k(\Phi_{ds} i_{qs} - \Phi_{qs} i_{ds}) \quad (8)$$

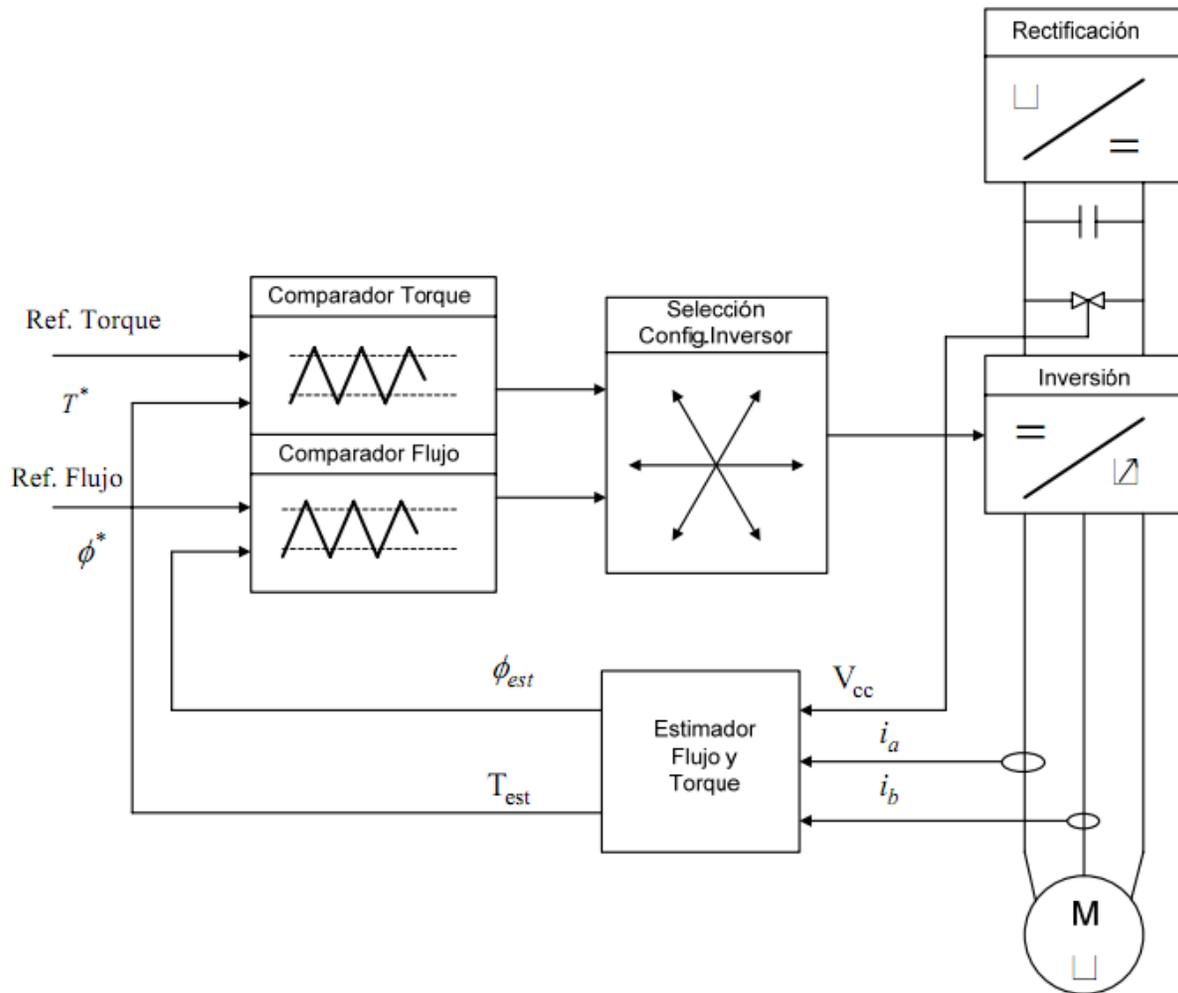


Figura 1.4 Diagrama en bloque DTC.



#### **1.4 Conclusiones parciales del capítulo.**

En el capítulo se abordaron los siguientes temas relacionados con los objetivos de la investigación en la cual se llegaron con las siguientes conclusiones:

- Los principales consumidores de la Planta de Lixiviación lo constituyen los accionamientos de bombas centrifugas, de los cuales más del 75 % se alimentan con variadores de velocidad por control escalar.
- El sistema DTC permite pilotar rápida y flexiblemente los motores trifásicos, haciendo el tiempo de respuesta del par sumamente corto.



# Capítulo II

## Descripción de variador de velocidad YASKAWA.



## 2.1 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 prometedor. 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. En este trabajo 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 en la planta de lixiviación de la empresa Comandante “René Ramos”.



## 2.2 Descripción del variador

El inversor F7 es el caballo de batalla industrial, que puede manejar todas las aplicaciones típicas de una planta industrial, desde bombeo con torque variable hasta manejo de materiales en una sofisticada red. Todo esto es posible gracias a su plataforma de diseño, que ofrece mediante parámetros programables, al mismo tiempo dos categorías: trabajo pesado y trabajo normal o ligero, cuatro modos de control, mediante opciones de comunicación en red, y software específico de aplicación, también un arreglo de entradas y salidas estándar y opcionales.

El F7 tiene una programación de fábrica y está listo para operar. Para una operación simple y clara la terminal de operación y pantalla LCD tiene 5 líneas por 16 caracteres. Puede ser configurado en 7 idiomas. El teclado es intuitivo e incluye la función de copiado de parámetros de un inversor a otro. Si la aplicación requiere programación, es fácil hacerlo con el F7. Los parámetros están agrupados en: arranque rápido y avanzado. Para mejorar la administración de los parámetros y datos del inversor, se cuenta con el software para PC: DriveWizard, que sirve para programar parámetros, gráficas de operación y tendencias.

Este inversor está diseñado para ambientes industriales, es robusto y confiable, con un MTBF de 28 años. Se tienen opciones de gabinetes especiales, para diversos ambientes.

### Condiciones de servicio

Temperatura ambiente para operación del inversor: -10 a 40°C (104°F) NEMA 1, a 45°C (113°F) gabinete abierto.

Humedad 95% sin condensación.

Altitud: 1,000 mts. (3,300 pies).

Alimentación: +10% / -15%, de 200 a 240 VAC, 380 a 480 VAC.

Gabinete: NEMA 1, gabinete abierto y otras opciones.

Frecuencia de entrada: 50/60Hz +/- 5%.

Vibraciones: 1G (10 a 20Hz), 0,2G (20 a 60Hz).



## **Trabajo pesado y normal.**

La doble funcionalidad: Trabajo pesado y trabajo normal o ligero, permite la selección más económica, de acuerdo a la necesidad de sobrecarga y torque inicial de la aplicación. Hay modelos para 208-240 VCA y para 380-480 VAC. Los modelos mayores de 30 HP, tiene un reactor de CD, rectificación de 12 pulsos y opciones de regeneración. Tiene incorporado el software patentado HSB (frenado por alto deslizamiento), que en varias aplicaciones nos permite frenar sin usar módulos opcionales de frenado. Otras características son: autotuning y una gran variedad de opciones configurables.

Para proveer el método de control óptimo, el F7 puede operar con el método V/f, V/f con retroalimentación de encoder, vector a lazo abierto ó vector a lazo cerrado. La funcionalidad del F7 puede mejorarse para una aplicación específica, gracias al software opcional CASE.

El F7 soporta la arquitectura abierta de las redes industriales, con protocolos de comunicación como: Device Net, Profibus-DP y otros. También la interacción sencilla con otros equipos está asegurada gracias a entradas y salidas como: tren de pulsos, 4-20ma, -10 a +10V, E/S programables.

Para nuevas instalaciones o reconstrucciones de maquinaria, el F7 es verdaderamente el caballo de batalla industrial. Perfecto para cada aplicación convencional, y en algunas no convencionales.

Este variador de velocidad posee las siguientes características de protección:

- Indicador de carga en el bus de CD.
- Aislamiento del circuito de control con optoacopladores.
- Protección de corto circuito: fase a fase y fase a neutro
- Protección de falla a tierra.
- Protección de sobrecarga en el motor UL.
- Límite de torque y corriente.
- Detección de límite alto y bajo en el torque.
- Falla en el circuito: sobrecarga en corriente, voltaje y temperatura.
- Pérdidas en las fases de entrada y salida.



### 2.3 Esquema de potencia. Circuito de mando.

El variador de velocidad cuenta básicamente con tres secciones. Sección de entrada, sección de salida y sección de control. Las secciones de entrada y salida se muestran en un esquema común el cual se denomina esquema de potencia (figura 2.2). Este esquema está constituido por un convertidor CA-CD construido generalmente con diodos en la sección de entrada y un inversor a IGBT en la sección de salida.

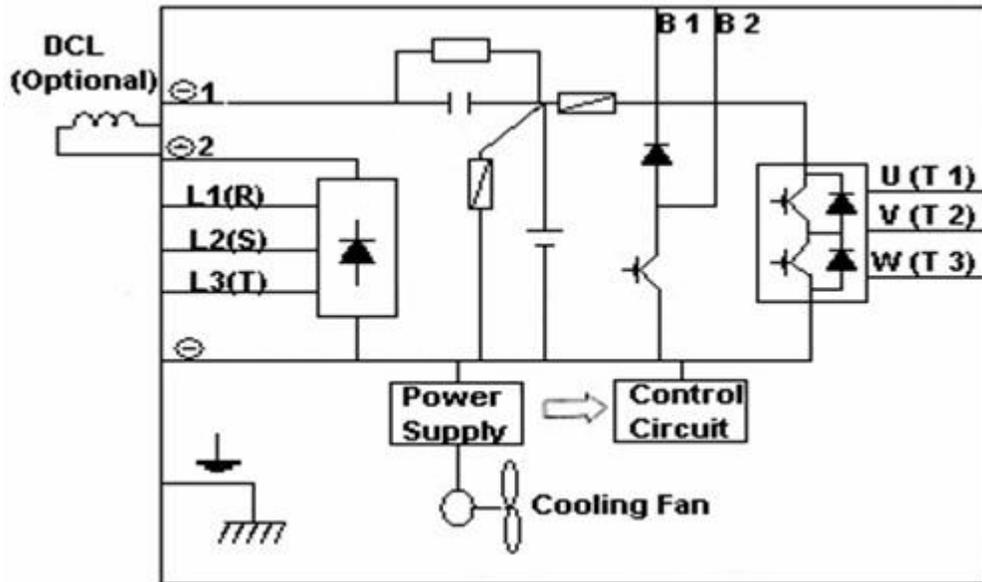


Figura 2.1 Diagrama en bloques del variador de velocidad

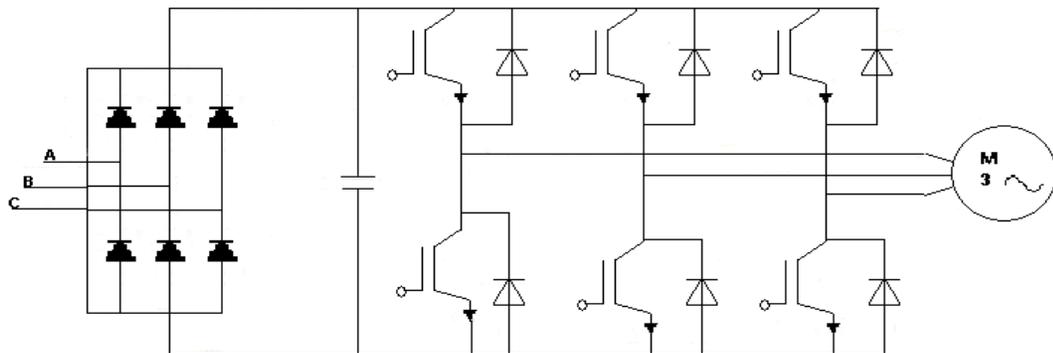


Figura 2.2 Esquema de potencia del variador de velocidad Yaskawa



### **2.3.1 Instrucciones y normas para su uso**

A continuación se ponen las instrucciones a tener en cuenta y las normas que se exigen para el uso del variador de velocidad: Es importante que todos los equipos de control (ejemplo: un PLC) conectados al convertidor estén puestos a tierra en el mismo punto que el convertidor a través de un cable corto y de gran sección. El conductor de tierra de los motores alimentados por los convertidores deberá conectarse directamente al terminal de tierra (PE) del convertidor asociado. Siempre que sea posible se debe usar cable apantallado para las conexiones.

Los conductores de mando o control deben estar lo suficientemente separados de los conductores del circuito de potencia para evitar las interferencias y el ruido que le pueden provocar a los primeros. Se debe seleccionar la frecuencia de pulsación más baja posible para reducir la cantidad de interferencias generadas por el convertidor.

Los conductores de mando o control deben estar lo suficientemente separados de los conductores del circuito de potencia para evitar las interferencias y el ruido que le pueden provocar a los primeros. Se debe seleccionar la frecuencia de pulsación más baja posible para reducir la cantidad de interferencias generadas por el convertidor.

### **2.4 Protocolos de comunicaciones.**

En este variador se puede realizar una comunicación serial usando el protocolo Modbus con controladores lógicos programables (PLC) o con dispositivos maestros similares.

Configuración de la comunicación Modbus.

La comunicación Modbus es configurada utilizando el maestro 1 (PLC) y un máximo de 31 esclavos. La comunicación serial entre el maestro y el esclavo es normalmente iniciada por el maestro y respondida por los esclavos. El maestro realiza la comunicación serial con esclavo a la vez. Consecuentemente, la dirección de cada esclavo, debe estar inicialmente configurada, para que el maestro pueda realizar la comunicación serial usando esa dirección. Los esclavos que reciben comandos desde el maestro realizan las funciones especificadas del y manda una respuesta al maestro

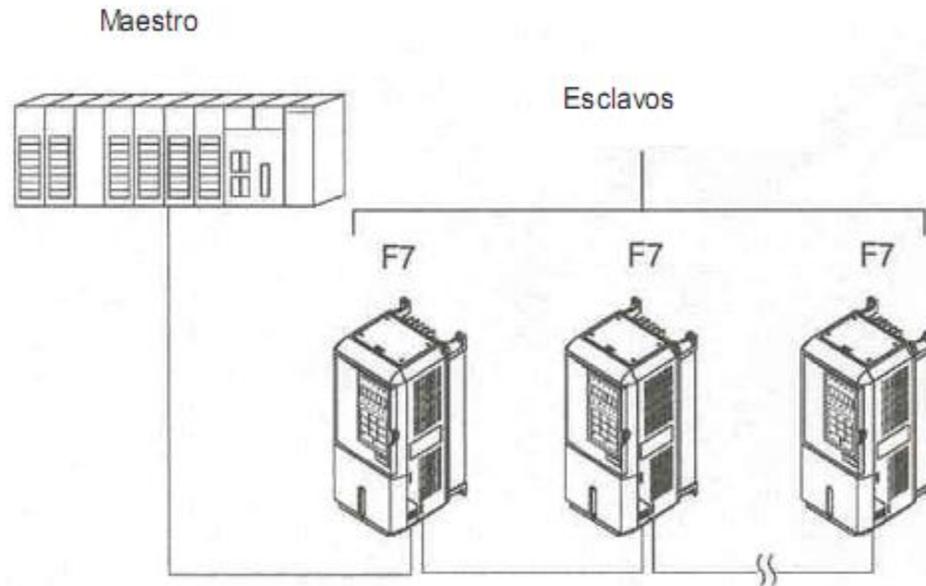


Figura 2.3 Ejemplo de la conexión entre el maestro y los inversores.

#### Especificaciones de la conexión

Las especificaciones de la comunicación Modbus son mostradas a continuación

<b>ELEMENTOS</b>	<b>ESPECIFICACIONES</b>
Interfase	RS-422, RS-485
Ciclo de comunicación	Asincrónico (sincronización de iniciado y parada)
Parámetros de comunicación	Baudios: Seleccionable entre 1200, 2400, 4800, 9600 y 19200 bps Longitud de datos: Arreglos de 8bits Paridad: Elegir entre par, impar o sin paridad Bits de parada: Seleccionado 1 bit.
Protocolo de comunicación	Modbus RTU
Cantidad de unidades a conectar	Máximo 31 unidades



## Conexión de los terminales de comunicación

La comunicación Modbus utiliza los siguientes terminales: S+, S-, R+ y R-. la resistencia Terminal debe estar ON, solo si el inversor está al final de la cadena de comunicación. Configura la resistencia ponga en ON el pin 1 del switch S1.

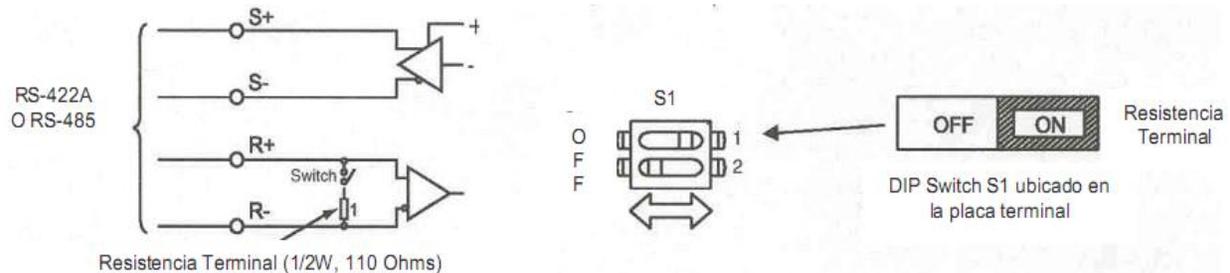


Figura 2.4 Conexión de terminales de comunicación y resistencia terminal.

Procedimientos para configurar la comunicación.

- 1- Apague la alimentación del inversor y conecte el cable de comunicación entre el PLC (u otro dispositivo maestro) y el inversor.
- 2- Encienda la alimentación del inversor.
- 3- Configure los parámetros de comunicación requeridos (H5-01 al H5-07) usando el operador digital.
- 4- Apague la alimentación del inversor, y cheque que la pantalla del operador digital se haya apagado completamente.
- 5- Encienda la alimentación del inversor nuevamente.
- 6- Realice la comunicación con el dispositivo maestro.

La comunicación Modbus puede realizar las siguientes operaciones

1. Monitorear el estado de operación del inversor
2. Configurar y leer los parámetros del inversor.
3. Resetear fallas.
4. Entrar comandos de entrada digitales multifunción.
5. Controlar salidas digitales multifunción y salidas analógicas.



Comando de entrada.

Cuando se escriben parámetros al inversor desde el maestro usando la comunicación Modbus, los parámetros son almacenados temporalmente en el área de datos de constantes en el inversor, y estos serán perdidos si se corta la alimentación del inversor. Para habilitar estos parámetros en el área de datos de parámetros, en la cual son retirados si la alimentación es cortada, use el comando de entrada.

Hay dos tipos de comando de entrada:

1. Comandos de entrada que habilitan los datos de parámetros en RAM.
2. Comandos de entrada que escriben datos a la EEPROM (memoria no volátil) en el inversor y también habilitan los datos en RAM.

#### **2.4.1 Formato del mensaje.**

En la comunicación Modbus, el maestro envía comandos al esclavo, y el esclavo responde. El formato del mensaje es configurado para ambos enviando y recibiendo como es mostrado abajo. La longitud del paquete de datos es controlado por el contenido del comando (función).

Dirección del esclavo
Código de función
Datos
Comprobación de errores

Figura 2.5 Formato del mensaje.

El convertidor de frecuencia yaskawa está dotado de inteligencia gracias a la tarjeta opcional de autómatas que puede ser incorporada al equipo. De esta manera aprovecha los recursos comunes del convertidor y del PLC: transparencia en las comunicaciones y entradas/salidas para su integración en redes DeviceNet (compoBus D) y compoBus S, además de aumentar las posibilidades del control de más de 3 motores.

Con esta tarjeta se garantiza la comunicación con el variador mediante tres vías: Modbus, Ethernet y USB



Figura.2.6 ventana del programa Drive Wizard utilizando la comunicación Modbus.



Figura.2.7 ventana del programa Drive Wizard con los parámetros a utilizar para lograr la conexión Modbus.

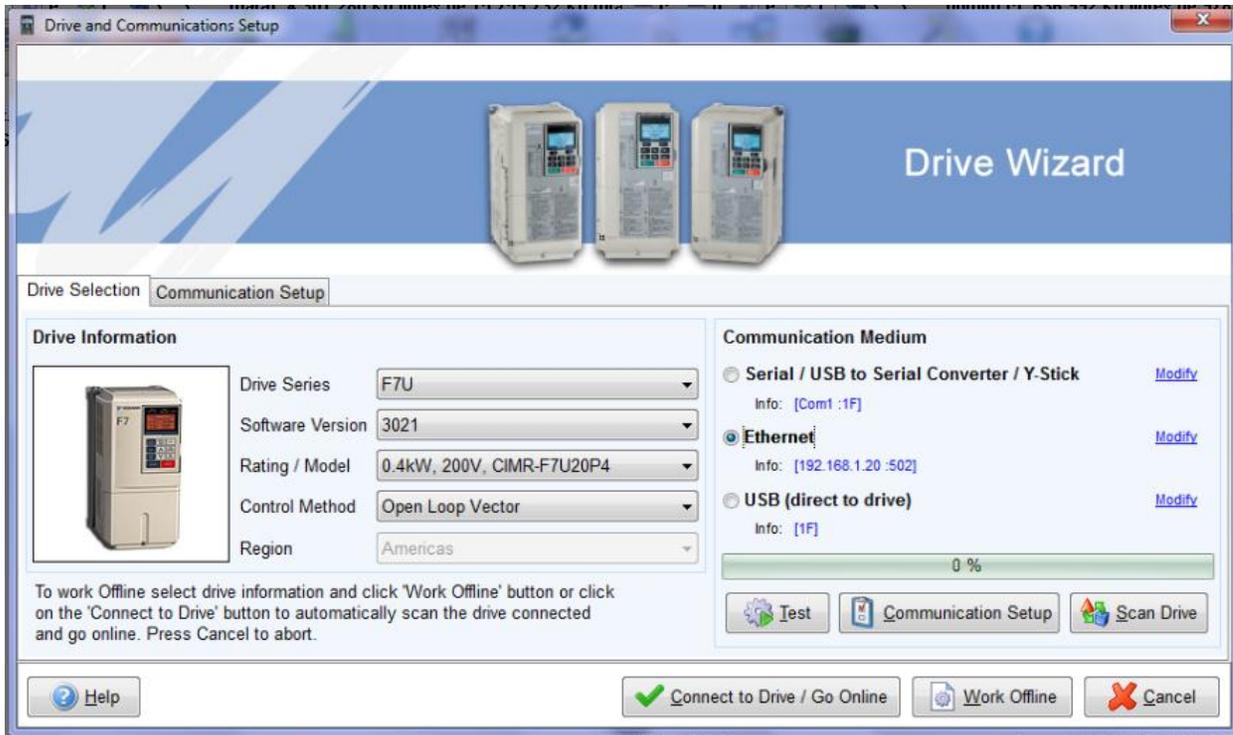


Figura. 2.8 ventana del programa Drive Wizard utilizando la comunicación Ethernet.

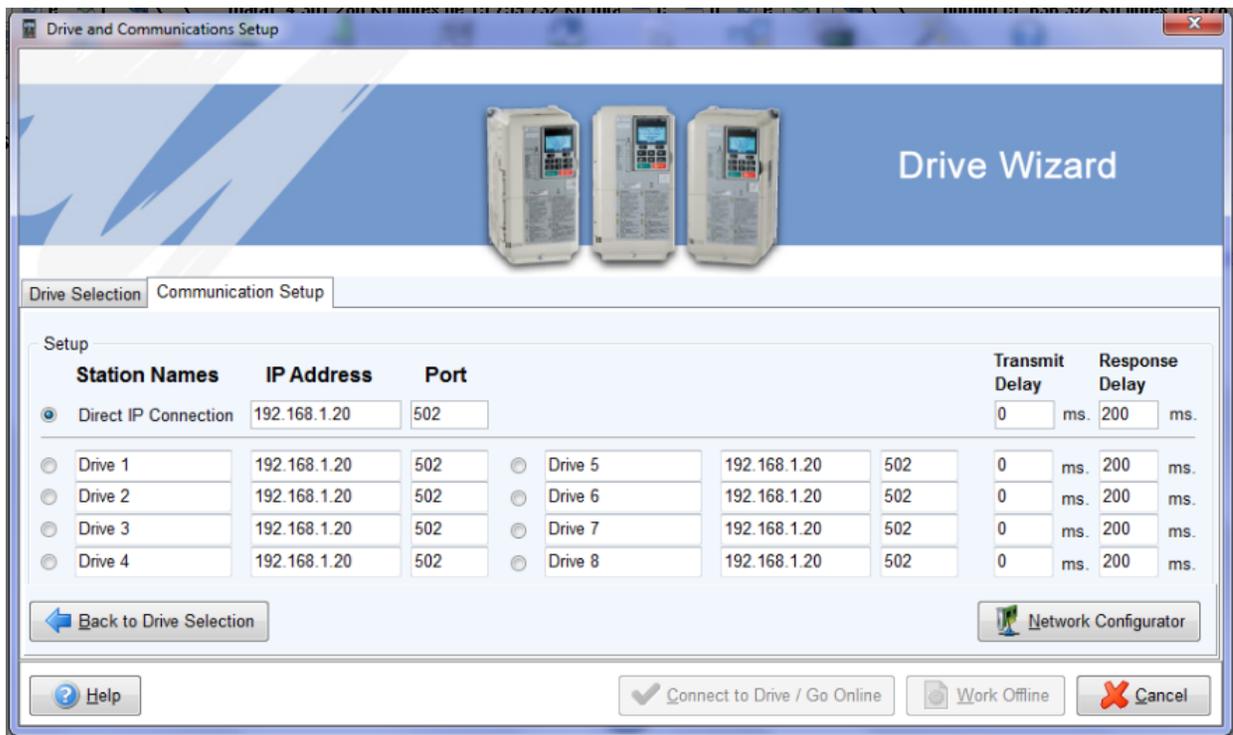


Figura. 2.9 ventana del programa Drive Wizard con los parámetros que se utilizan para lograr la conexión Ethernet.



Figura. 2.10 ventana del programa Drive Wizard utilizando la comunicación USB.



Figura. 2.11 ventana del programa Drive Wizard donde se muestra como realizar la comunicación USB.



## **2.5 Aplicaciones en accionamientos con bombas centrífugas.**

A medida que la electrónica avanza y la generación de energía es cada vez más costosa, se torna rentable y necesario hacer cada vez más eficientes los procesos de producción, éste es el caso de aquellos procesos que involucren bombas y que haciendo uso de los controles de frecuencia (variadores) pueden ser más eficientes y por lo tanto ahorrar energía.

El accionamiento mediante motor eléctrico a velocidad variable de las bombas centrífugas presenta dos tipos de ventajas:

- las primeras afectan el ahorro de energía que dicho accionamiento permite realizar,
- las segundas, menos fáciles de cuantificar, están relacionadas con la facilidad de explotación, la seguridad de funcionamiento y la duración de vida de las instalaciones.

Antes de trazar las curvas que muestran el ahorro de energía que supone la velocidad variable, es necesario indicar cómo es que se han determinado los parámetros que han servido para trazar dichas curvas.

Para ello, después de mencionar brevemente las distintas formas de hacer frente a las variaciones de caudal de una red, mostraremos como caracterizar al mismo. Una vez presentadas algunos tipos de bombas y las formas de trazar sus características a velocidad variable en magnitudes reducidas, podremos pasar a trazar las curvas.

Adaptación de las redes a las variaciones de caudal.

En muchos casos, la solicitud de caudal de una red es variable en todo momento teniendo en cuenta, por ejemplo, la hora del día, el día de la semana o según las necesidades de un proceso industrial. En general dicho caudal variable debe ser suministrado por una horquilla de presión más o menos estrecha.

La explotación de una estación de bombeo debe responder y satisfacer dicha petición al menor coste posible.

Para conseguirlo se pueden poner en práctica distintos métodos entre los cuales se encuentra el de equipar las bombas con dispositivos de variación de velocidad. Pueden ser mecánicos (variadores con correa), hidráulicos (acopladores con achicador) o electromagnéticos (acoplados con corriente de Foucault) e incluir piezas en rotación.



## Características de la bomba

La bomba se caracteriza por su característica altura – caudal  $H(Q)$  y su característica potencia absorbida – caudal  $P(Q)$  a su velocidad nominal de arrastre  $\Omega_n$ . Durante el funcionamiento nominal,

$$Q = Q_n; H = H_n; P = P_n.$$

### 2.5.1 Modificación de las características con la velocidad

Hemos visto ya como pasar de las características de velocidad  $\Omega_n$  a las características de velocidad  $\Omega$ .

Si para un punto  $S$  a velocidad  $\Omega_n$ , tenemos:

Un caudal  $Q$ , una altura  $H$ , una potencia absorbida  $P$ , un par  $C$ , igual a  $P/\Omega_n$ , y un rendimiento global  $\eta$ , igual  $\rho gQH/P$ , para el punto homólogo  $S'$  a velocidad  $\Omega$ , tendremos un caudal  $q = Q(\Omega/\Omega_n)$ , una altura  $h = H(\Omega/\Omega_n)^2$ , una potencia  $p = P(\Omega/\Omega_n)^3$  y un par  $c = C(\Omega/\Omega_n)$ .

### 2.5.2 Regulación del flujo en bombas centrífugas.

En muchas ocasiones es necesario trabajar durante mucho tiempo en condiciones de caudal inferiores al nominal. En esta situación se pueden realizar planteamientos que permitan ahorros energéticos considerables, implantando el sistema de regulación de caudal más apropiado.

Los métodos de regulación de caudal se obtienen mediante:

- Modificación de la curva presión – caudal del sistema sobre el que trabaja la bomba.
- Modificación de la curva presión – caudal de la bomba.
- Modificación simultánea de ambas características (sistema y bomba).
- Arranque o paro de la bomba.

### 2.5.3 Modificación de la curva del sistema sobre el que trabaja la bomba.

Este es el método más utilizado, se trata en esencia de regular el flujo mediante la actuación de una o más válvulas, de tal forma que modifique la curva de comportamiento del sistema de conducción.

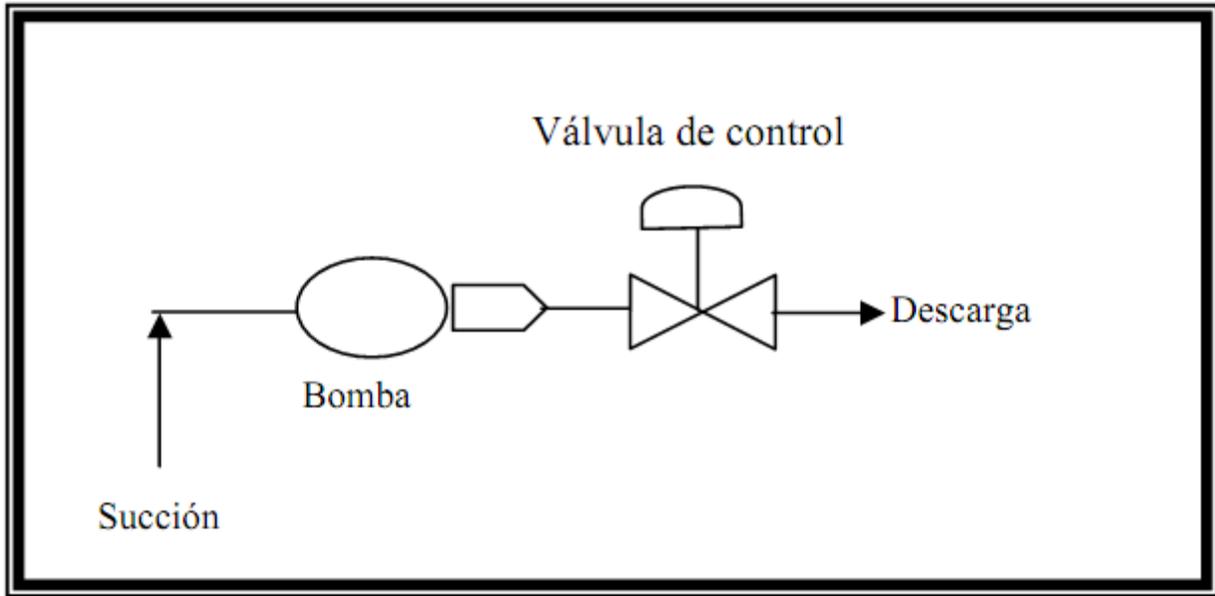


Figura. 2.12 Control por modificación de la curva del sistema.

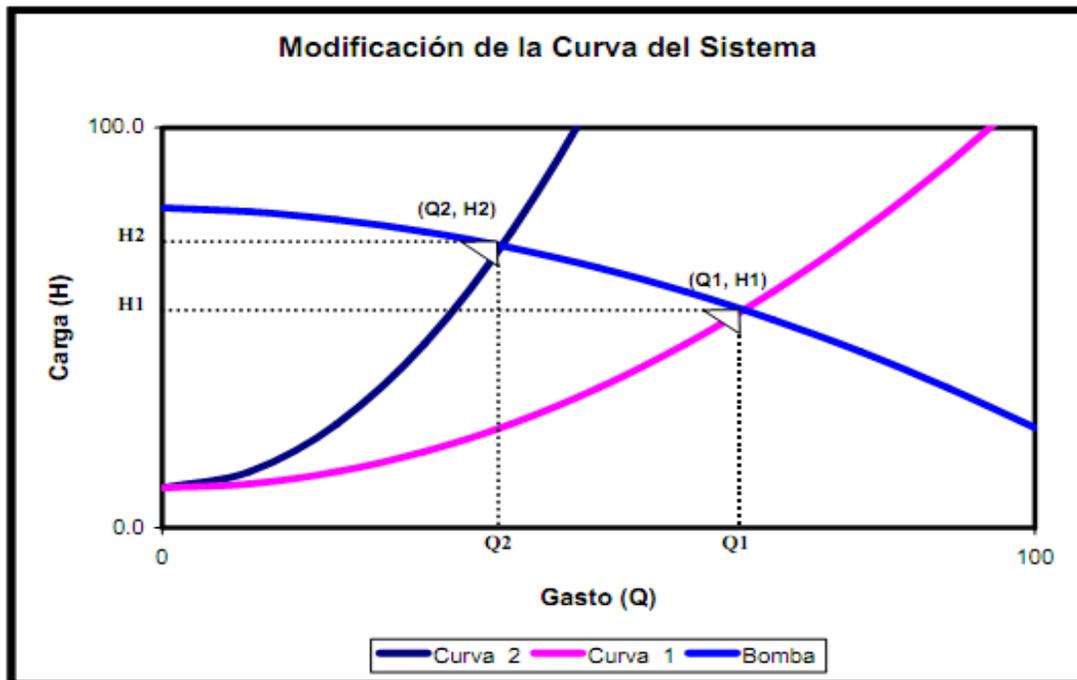


Figura 2.13 Comportamiento de la curva del sistema de conducción.

Nótese que al estrangular la válvula de control para reducir el gasto de  $Q_1$ , a  $Q_2$ , la curva del sistema cambia de la curva 1 a la curva 2, (Fig. 2.4), y la carga se ve incrementada de  $H_1$  a  $H_2$ . Resultado una potencia hidráulica:

$$Ph_2 = Q_2 \times H_2$$



### 2.5.4 Modificación de la curva de la bomba.

Otra alternativa de control, consiste en variar la curva “carga - capacidad”, de la bomba. Esto se logra, variando la velocidad de operación de la bomba, como se muestra en la figura 2.5.

Nótese que ahora, variándose la velocidad de la bomba de N1 a N2, podemos pasar de un gasto Q1 a un gasto Q2, sin incrementar la carga, por el contrario, la nueva carga H2', es menor a la carga inicial H1 y mucho menor a la que se obtendría con la válvula de estrangulación H2.

En este caso, la potencia hidráulica será:

$$Ph2' = Q2 \times H2'$$

La cual es mucho menor que Ph2.

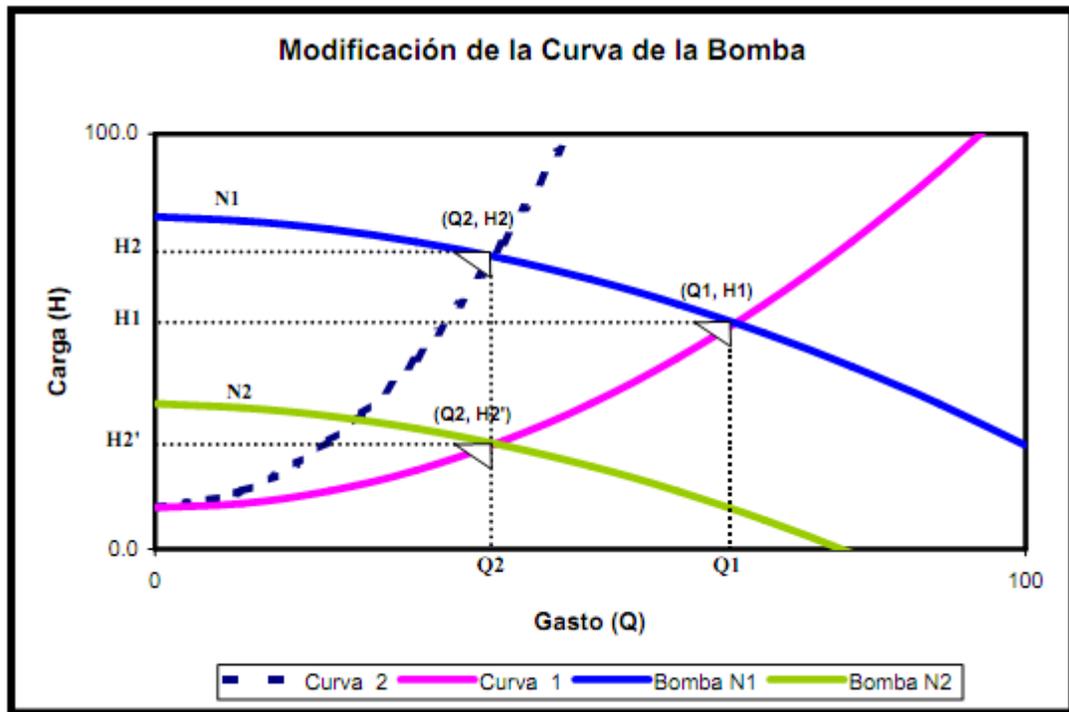


Figura 2.14 Control de gasto por variación de velocidad en la bomba.

### 2.5.5 Modificación simultánea de las curvas del sistema y la bomba.

Uno de los casos más frecuentes es aquel en donde por requerimiento del proceso, la curva “carga - capacidad” del sistema varía, debido a que en el sistema existen varios usuarios y cada uno de ellos demanda más o menos gastos como función de sus propias necesidades. Esto, visto desde la bomba, representa variaciones en la curva del sistema, por lo que



continuamente varía el gasto y la carga.

En sistema de control que garantice el mismo gasto a los usuarios a pesar de que algún otro usuario haya cambiado su régimen de demanda, lo encontraremos en la variación de la curva de la bomba, simultáneamente con la variación de la curva del sistema, de manera tal que se mantenga la carga del sistema en cualquier condición de operación. La figura 2.6 ilustra el proceso.

Obsérvese que ante una variación de la curva del sistema, el control ajusta la velocidad de la bomba para mantener la carga  $H_1$ , y suministrar el gasto  $Q_2$  que el sistema realmente está demandado.

La potencia hidráulica en este caso es:  $Ph_1' = Q_2 \times H_1$

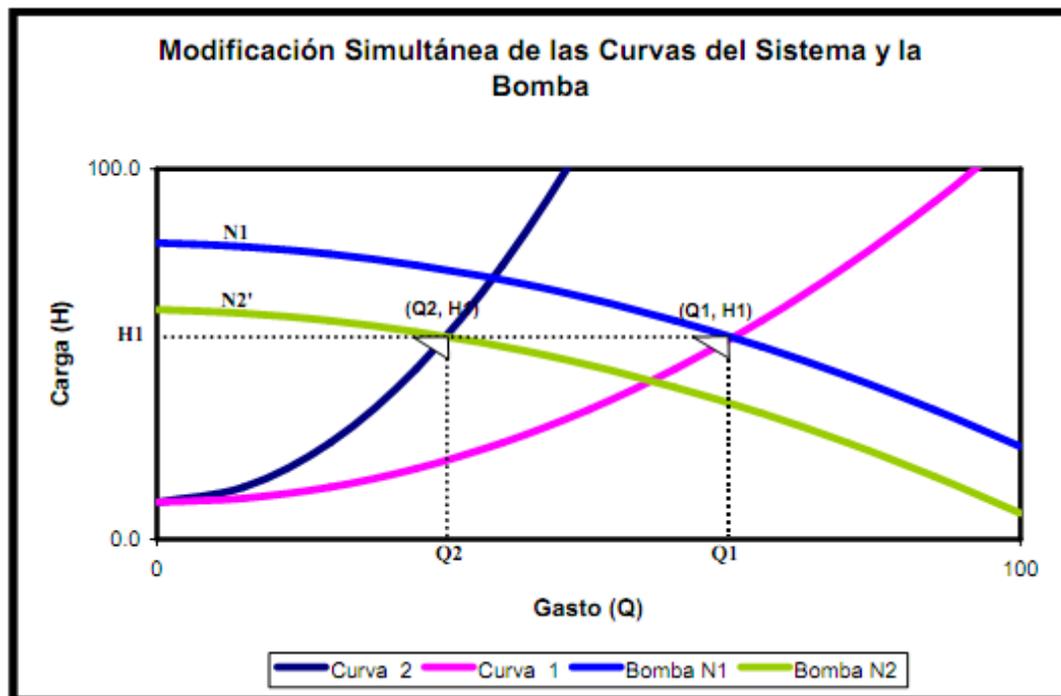


Figura 2.15 variación simultánea de la curva del sistema y la bomba.

Ejemplos de este tipo de aplicaciones los tenemos en: sistemas públicos de agua potable, sistemas de enfriamiento industriales y sistema de aire acondicionado tipo chiller.

### 2.5.6 Arranque y paro de la bomba

Esta es un sistema muy convincente cuando se cuenta con un acumulador, tal como hidroneumático o tanque elevado. Así la bomba operará con válvula de descarga siempre



abierta y cuando se halla llegado a la presión nominal en el hidroneumático o al nivel alto en el tanque elevado, la bomba parará, para volver a arrancar cuando la presión o el nivel, según el caso, halla llegado al nivel bajo.

El sistema es energéticamente eficiente. Tiene la limitante de que necesita del acumulador, y no siempre es posible contar con él.

### 2.5.7 Leyes de afinidad.

Las bombas centrífugas se comportan de acuerdo a las leyes de afinidad, las cuales se ilustran en la figura 2.7

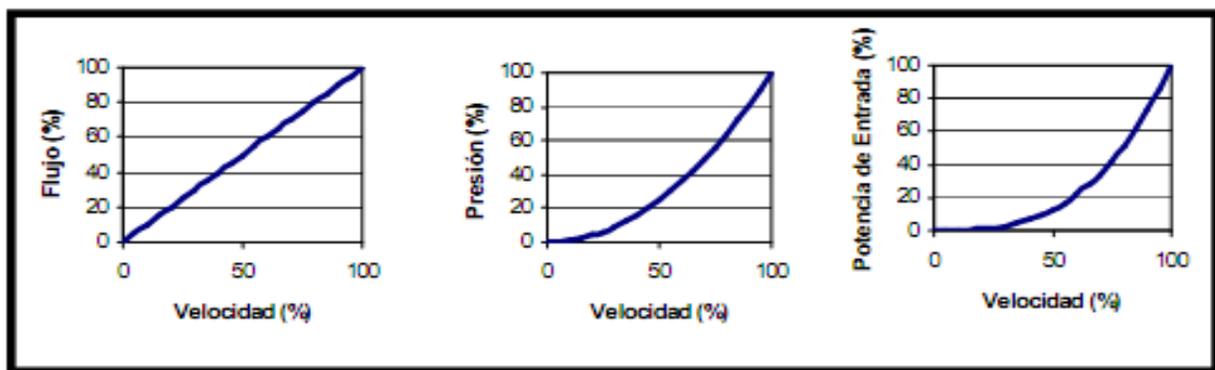


Figura 2.16 Leyes de afinidad en bombas centrífugas.

Las leyes de afinidad nos indican que:

- El flujo tiene un comportamiento lineal con la velocidad.
- La presión tiene un comportamiento cuadrático con la velocidad.
- La potencia de entrada tiene un comportamiento cúbico con la velocidad.

Matemáticamente:

$$\frac{Q}{Q_0} = \left( \frac{N}{N_0} \right) \quad \frac{H}{H_0} = \left( \frac{N}{N_0} \right)^2 \quad \frac{P}{P_0} = \left( \frac{N}{N_0} \right)^3$$



## 2.5.9 Comparación energética entre métodos de regulación de caudal

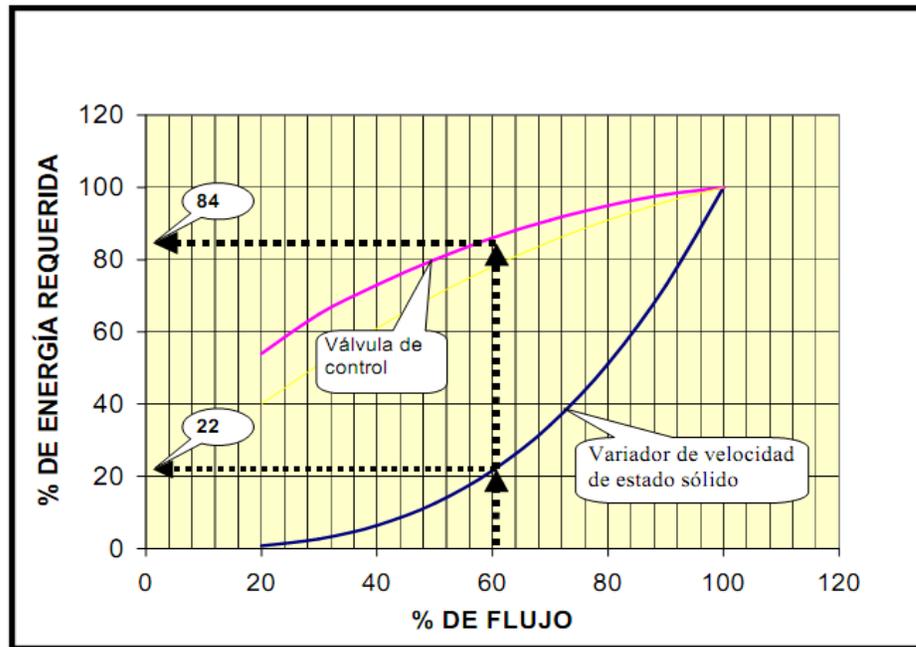


Figura 2.17 comparación entre métodos de comparación de flujo.

## 2.6 Conclusiones parciales

- El uso del variador de velocidad YASKAWA en el accionamiento de bombas centrífugas es de carácter energético, y aporta mejoras en el uso racional de energía.
- La característica de arranque suave elimina la caída de tensión asociada a los arranques de los motores suavizando el choque de arranque en motores, acoplamientos, engranajes y el equipamiento en general del accionador.



# Capítulo III

## Base experimental del observador de torque de carga



### 3.1 introducción.

En este capítulo se establecen las bases metodológicas para implementar una evaluación para la base experimental del observador de torque de carga así como la evaluación del consumo energético y proponer la variante más apropiada para obtener los mejores índices de consumo en el bombeo de pulpa laterítica en la planta de lixiviación de la empresa comandante "René Ramos".

### 3.2 Base experimental del accionamiento industrial

Para establecer la base experimental del accionamiento industrial fue necesario tomar las mediciones de los parámetros necesarios brindados por el variador de velocidad estudiado. La toma de estas mediciones se realizó durante 10 días consecutivos de 7:00am a 5:00pm las cuales se dan a continuación en las siguientes tablas.

**Tabla: 3.1 mediciones día # 1**

Hora	Usal(V)	Ic(A)	Fref(kHz)	Fsal(kHz)	P(kW)	T(%)	con(kW/h)	densidad
7:00 AM	398.3	57.9	52.32	52.76	22.5	34	614.1	1800
8:00 AM	398.7	48.8	52.32	52.68	22.5	22.5	630.1	1800
9:00 AM	399.5	56.7	52.32	52.7	21.9	21.9	652.3	1700
10:00 AM	400	61.3	52.32	52.82	23.9	23.9	667.7	1700
11:00 AM	401.8	66.2	52.32	52.71	21.3	21.3	683.7	1770
12:00 PM	400.7	57.3	52.35	52.88	19.8	19.8	708.8	1770
1:00 PM	399.3	50.8	52.35	52.81	21.8	21.8	721.9	1820
2:00 PM	398.2	64.3	52.35	52.7	18.4	18.4	749.6	1820
3:00 PM	398.9	58.4	52.35	52.86	20.5	20.5	764.5	1800
4:00 PM	399.1	61.2	52.35	52.75	22.3	22.3	776.6	1800
5:00 PM	398.4	57.9	52.35	52.8	19.7	19.7	781.8	1780

**Tabla: 3.2 mediciones día # 2**

Hora	Usal(V)	Ic(A)	Fref(kHz)	Fsal(kHz)	P(kW)	T(%)	con(kW/h)	densidad
7:00 AM	398.3	47.9	52.32	52.78	19.8	27.3	61.2	1740
8:00 AM	397.9	56.8	52.32	52.75	18.3	23.7	73.8	1740
9:00 AM	398.6	59.4	52.32	52.6	20.5	29.4	86.3	1760
10:00 AM	398.3	55.3	52.32	52.67	17.8	24.5	102.7	1760
11:00 AM	398.7	57.9	52.32	52.83	19.7	29.5	122.8	1750
12:00 PM	398.5	49.6	52.35	52.71	20.2	26.8	141	1750
1:00 PM	398.2	51.3	52.35	52.64	19.4	29.6	159.2	1750
2:00 PM	398.7	59.6	52.35	52.75	18.6	27.8	172.7	1750
3:00 PM	398.2	49.9	52.35	52.69	17.8	29.4	197.9	1760
4:00 PM	399.1	56.7	52.35	52.84	18.8	28.7	209.9	1760
5:00 PM	398.6	54.8	52.35	52.63	18.2	27.5	224.1	1750

**Tabla: 3.3 mediciones día # 3**

Hora	Usal(V)	Ic(A)	Fref(kHz)	Fsal(kHz)	P(kW)	T(%)	con(kW/h)	densidad
7:00 AM	398.5	50.4	52.32	52.69	17.6	26.5	472.1	1770
8:00 AM	398.8	49.5	52.32	52.56	18.1	27.7	490.1	1770
9:00 AM	0,00	0,00	45.73	0,00	0,00	0,00	499.61	1720
10:00 AM	474.5	54.6	60	59.95	43.7	61.5	513.2	1720
11:00 AM	475.4	55.1	60	59.98	45.7	61.8	556	1700
12:00 PM	475.3	55.8	60	59.91	44.8	59.6	597.8	1700
1:00 PM	474.8	56.2	60	59.84	45.5	60.4	643.1	1700
2:00 PM	474.4	54.8	60	59.93	44.3	59.8	686.5	1700
3:00 PM	371.6	34.9	44.74	45.98	9.5	17.8	716.7	1700
4:00 PM	341.3	34.6	44.77	44.91	9.3	15.9	141	1700
5:00 PM	341.9	29.9	44.77	44.95	7.4	12.6	758.1	1700

**Tabla: 3.4 mediciones día # 4**

Hora	Usal(V)	Ic(A)	Fref(kHz)	Fsal(kHz)	P(kW)	T(%)	con(kW/h)	densidad
7:00 AM	340.4	50.4	44.74	45.19	15.3	27.4	945.4	1770
8:00 AM	339.2	51.5	44.74	45.17	15.5	27.3	954.8	1770
9:00 AM	340.3	50.5	44.74	45.12	16	28.5	969.7	1700
10:00 AM	340.5	51.2	44.74	45.16	15.6	28	984.5	1700
11:00 AM	340.2	52	44.74	45.13	15.7	27.8	999.5	1800
12:00 PM	340.6	50.8	44.77	45.18	15.6	27.4	17.4	1800
1:00 PM	340.9	48.9	44.74	45.12	14.4	25.5	30.4	1700
2:00 PM	340.4	52.7	44.74	45.18	15.9	27.6	45.5	1700
3:00 PM	340.5	23.1	44.77	45.15	16.1	28.1	60.5	1770
4:00 PM	340.8	49.1	44.77	45.11	14.8	25.6	74.8	1770
5:00 PM	340.3	58.9	44.77	45.18	16.1	28.4	91	1800

**Tabla: 3.5 mediciones día # 5**

Hora	Usal(V)	Ic(A)	Fref(kHz)	Fsal(kHz)	P(kW)	T(%)	con(kW/h)	densidad
7:00 AM	354.6	46.8	46.55	46.91	14.2	23.6	286.4	1750
8:00 AM	354.8	46.2	46.55	46.87	14.8	25	311.8	1750
9:00 AM	354.4	44.9	46.55	46.9	13.8	23.9	327.2	1750
10:00 AM	354.6	45.8	46.55	46.98	13.9	24	340.3	1750
11:00 AM	355.3	44.5	46.61	46.93	14.1	23.7	353.3	1760
12:00 PM	355.7	43.8	46.61	46.95	13.8	22.1	368.5	1760
1:00 PM	354.5	42.3	46.64	46.9	13.2	24.8	383.8	1770
2:00 PM	356.6	26.9	46.58	51.65	5.7	9.8	392.8	1770
3:00 PM	356.9	30.2	46.58	50.71	8.9	12.3	403	1750
4:00 PM	355.8	29.9	46.58	50.55	10.8	16.8	416.4	1750
5:00 PM	354.7	31.3	46.58	50.7	10.9	17	431.5	1750

**Tabla: 3.6 mediciones día # 6**

Hora	Usal(V)	Ic(A)	Fref(kHz)	Fsal(kHz)	P(kW)	T(%)	con(kW/h)	densidad
7:00 AM	354.5	50.2	46.55	46.98	15.4	26.6	638	1680
8:00 AM	354.3	47.6	46.55	46.89	14.6	25.3	649	1680
9:00 AM	354.7	46.7	46.58	46.9	14.5	24.1	662.9	1700
10:00 AM	355.6	45.9	46.58	46.97	14.2	24.6	678	1700
11:00 AM	354.5	47.7	46.58	46.94	14.6	25.1	691.6	1700
12:00 PM	354.4	46.8	46.64	46.95	14.2	24.3	707	1700
1:00 PM	655.9	45.5	46.61	46.93	14.4	24.8	722.4	1750
2:00 PM	354.7	44	46.64	47.98	14.1	24.3	735.7	1750
3:00 PM	355.4	47.1	46.64	47.91	14.6	25.8	748.9	1680
4:00 PM	355.1	45.3	46.64	47.89	15.2	24.9	762.5	1680
5:00 PM	354.2	46.8	46.61	47.95	15.4	25.2	777.6	1700

**Tabla: 3.7 mediciones día # 7.**

Hora	Usal(V)	Ic(A)	Fref(kHz)	Fsal(kHz)	P(kW)	T(%)	con(kW/h)	densidad
7:00 AM	354.4	49.2	46.55	46.93	15.2	25.6	956.1	1800
8:00 AM	354.8	44.8	46.55	46.84	14.1	23.5	968.5	1800
9:00 AM	354.6	45.3	46.55	46.92	14.5	24.9	981.5	1800
10:00 AM	354.9	47.4	46.58	46.98	14	24.4	996.2	1800
11:00 AM	355.3	37.9	46.58	46.84	11.2	19.2	8.3	1700
12:00 PM	356.4	25.8	46.64	46.75	5.8	10.2	19.1	1700
1:00 PM	356.6	25.4	46.61	46.71	5.7	9.4	25.5	1680
2:00 PM	356.1	25.7	46.61	46.78	6	10.5	33.8	1680
3:00 PM	353.3	26.2	46.61	46.72	5.6	10.8	42.9	1700
4:00 PM	355.9	25.9	46.6	46.8	7.5	10.6	52.9	1700
5:00 PM	356	25.7	46.6	47.1	7.1	10.4	61.6	1750

**Tabla: 3.8 mediciones día # 8.**

Hora	Usal(V)	Ic(A)	Fref(kHz)	Fsal(kHz)	P(kW)	T(%)	con(kW/h)	densidad
7:00 AM	354.9	43.8	46.55	46.87	13.5	22.7	255.9	1750
8:00 AM	354.4	44.3	46.55	46.88	13.3	23.6	269.4	1750
9:00 AM	355.7	31.9	46.55	46.76	8.4	14.3	283.3	1750
10:00 AM	354.4	45.6	46.55	46.8	14.2	24.8	297.8	1750
11:00 AM	355.3	48.1	46.61	46.98	14.6	25.1	312.6	1750
12:00 PM	355.8	42.3	46.61	46.96	14.2	22.7	325.7	1750
1:00 PM	355.4	44.7	46.64	46.93	13.7	23.1	338.9	1750
2:00 PM	355.5	43.3	46.64	46.91	14	23.5	352.4	1750
3:00 PM	354.9	42.4	46.64	46.89	13.9	23.3	365.3	1800
4:00 PM	354.7	43.5	46.61	46.86	13.3	22.5	378.9	1800
5:00 PM	354.9	44.4	46.61	46.9	13.4	24.1	392.9	1780

**Tabla: 3.9 mediciones día # 9.**

Hora	Usal(V)	Ic(A)	Fref(kHz)	Fsal(kHz)	P(kW)	T(%)	con(kW/h)	densidad
7:00 AM	358.7	46.7	46.91	46.98	15.2	25.6	591	1800
8:00 AM	358.9	46.9	46.91	46.95	15.6	24.1	605.8	1800
9:00 AM	357.8	45.6	46.91	46.97	14.9	24.3	620.8	1780
10:00 AM	358.4	46.1	46.91	46.92	13.8	22	634.7	1780
11:00 AM	356.9	30.2	46.91	47	13.3	23.8	648.8	1780
12:00 PM	356.7	28.9	46.85	46.97	15.1	24.6	664.2	1780
1:00 PM	358.2	45.9	46.85	46.91	14.7	23.5	678	1780
2:00 PM	358.8	46.3	46.85	46.98	14.9	24.1	692.5	1780
3:00 PM	357.5	44.5	46.85	46.94	13.6	22.9	706.6	1700
4:00 PM	357.3	45.1	46.85	46.89	14.7	23.7	721.3	1700
5:00 PM	357.8	45	46.85	46.96	14.8	23.9	736.2	1700

**Tabla: 3.10 mediciones día # 10.**

Hora	Usal(V)	Ic(A)	Fref(kHz)	Fsal(kHz)	P(kW)	T(%)	con(kW/h)	densidad
7:00 AM	391.5	45.6	51.5	51.88	15.4	23.7	54.2	1700
8:00 AM	392.8	54.4	51.5	51.94	18.2	28.5	68.4	1700
9:00 AM	392.9	44.8	51.5	51.78	18.6	27.2	83.5	1750
10:00 AM	390.9	52.1	51.5	51.8	18.5	28.8	98.4	1750
11:00 AM	392.4	50.7	51.5	51.85	18.3	26.6	113.4	1750
12:00 PM	395.1	49.8	51.54	51.9	17.8	26.9	128.8	1750
1:00 PM	390.6	51.5	51.54	51.92	18.1	28	142.9	1680
2:00 PM	392.8	53.2	51.53	51.89	18.5	29.1	158.7	1680
3:00 PM	392.6	50.6	51.53	51.86	18.8	28.6	172.5	1700
4:00 PM	391	51.5	51.54	51.88	17.9	27.7	186.8	1700
5:00 PM	391.8	51.7	51.54	51.93	18.7	28.5	202.2	1700

### 3.3 Gráficos de comportamiento del accionamiento con bombas centrífugas.

En este caso son utilizadas las mediciones mostradas en las tablas anteriormente mencionadas (3.1, 3.2, 3.3, 3.4, 3.5, 3.6, 3.7, 3.8, 3.9, 3.10) con los parámetros del accionamiento, los cuales son graficados para determinar su comportamiento en el período estudiado.



### 3.3.1 Gráficas de comportamiento.

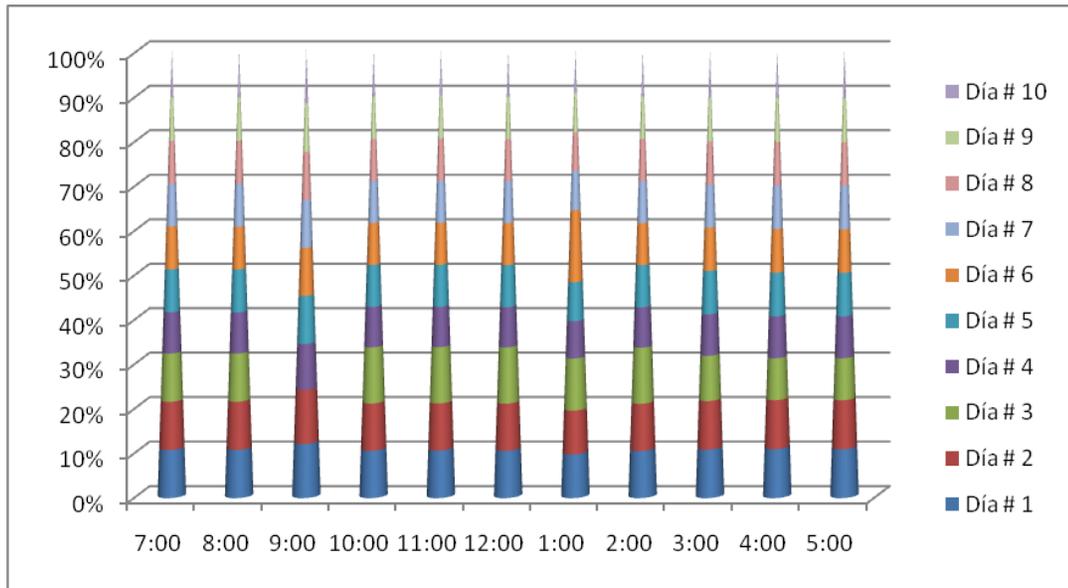


Figura 3.1 Comportamiento de la tensión de salida en el inversor sinusoidal durante varios días de mediciones.

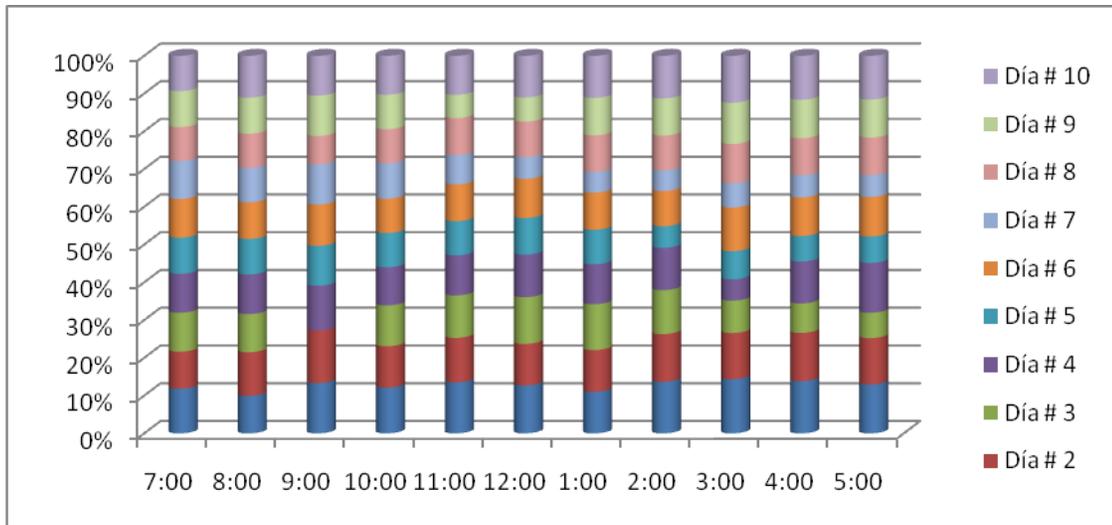


Figura 3.2 Comportamiento de la corriente en el variador de velocidad de carga en el período estudiado.

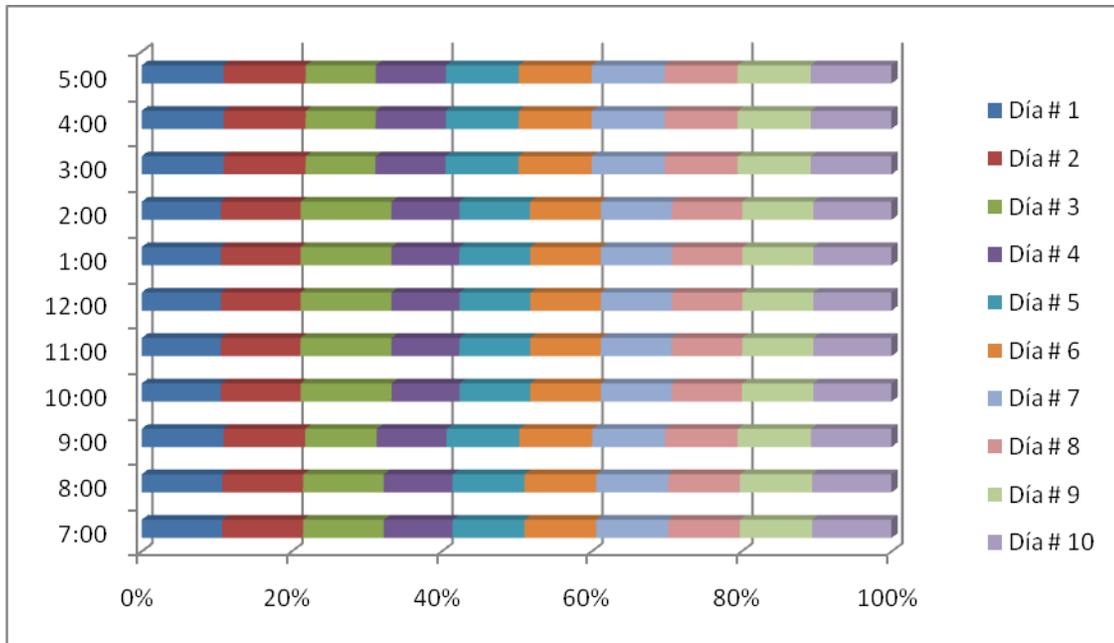


Figura 3.3 Comportamiento de la frecuencia de referencia en el variador de velocidad durante el período estudiado.

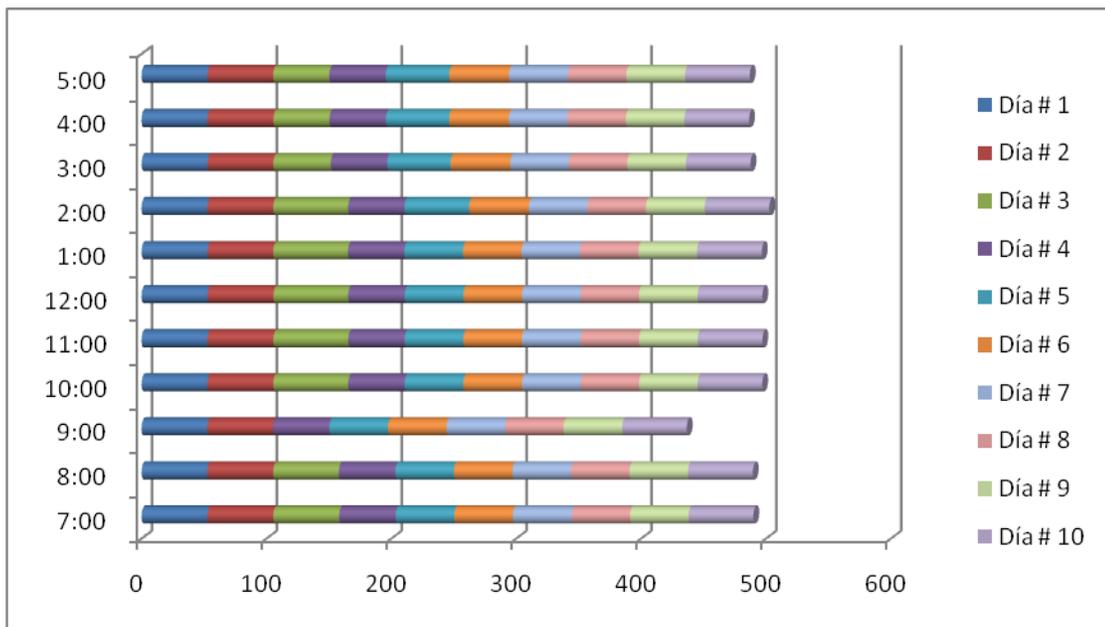


Figura 3.4 Comportamiento de la frecuencia de salida en el inversor sinusoidal en este período.

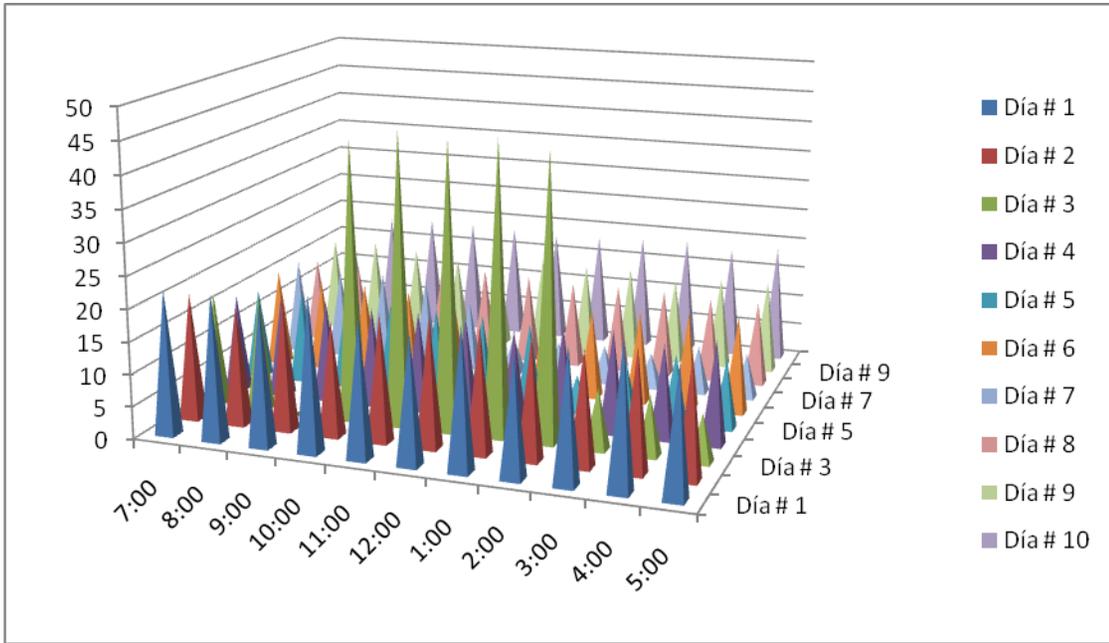


Figura 3.5 Comportamiento de la potencia activa en el accionamiento con bomba centrífuga.

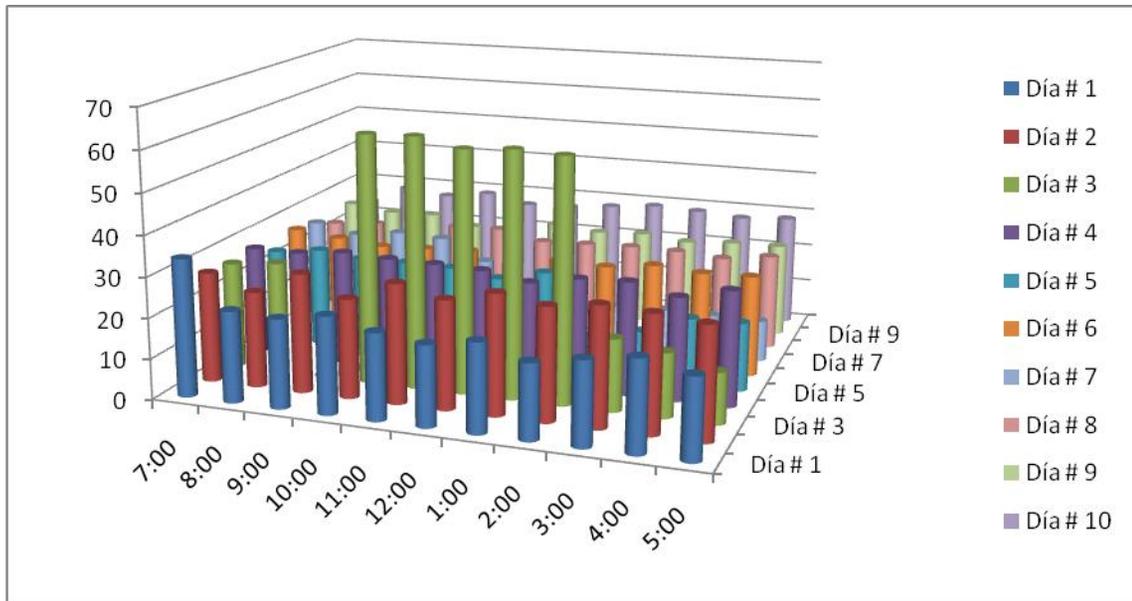


Figura 3.6 Comportamiento del torque electromagnético en el motor de inducción alimentado con el variador de velocidad.

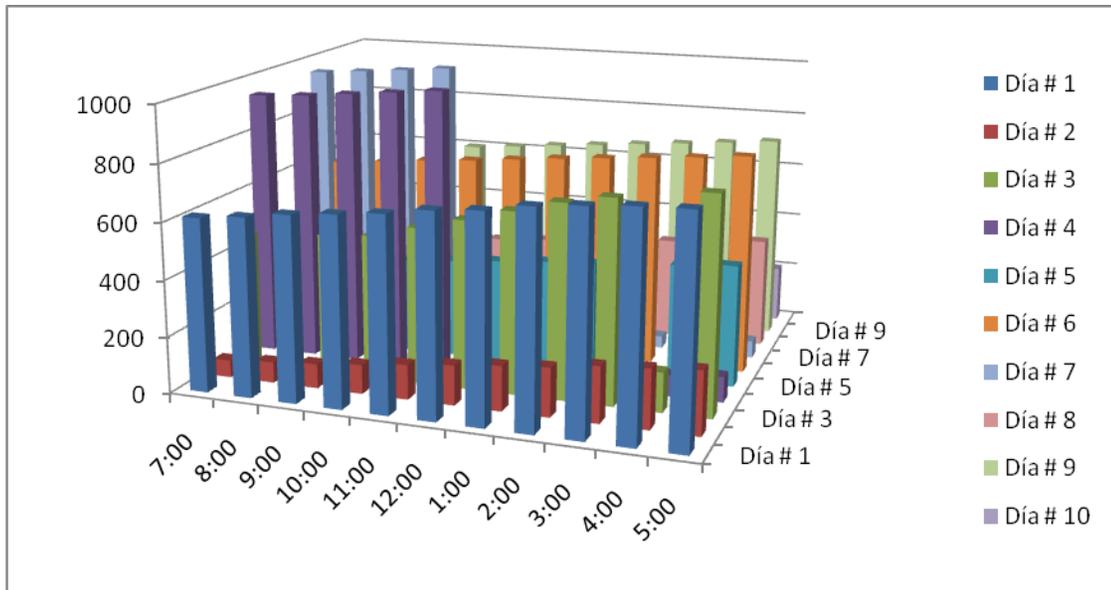


Figura 3.7 Grafica del consumo energético en accionamiento de bomba centrífuga de la planta Lixiviación.

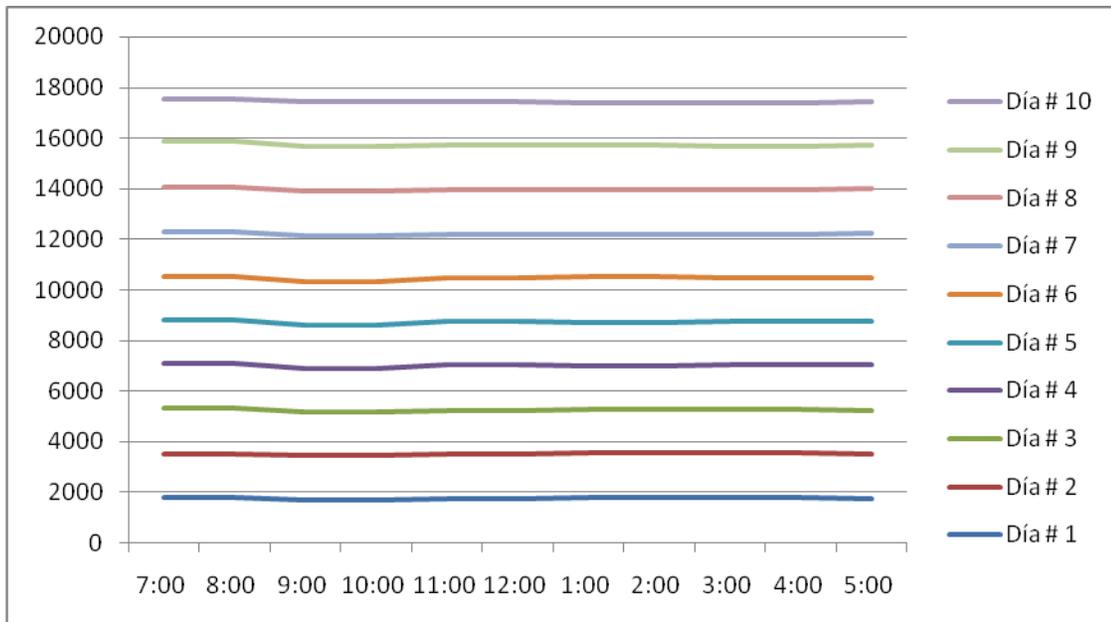


Figura 3.8 Comportamiento de la densidad de la pulpa laterítica en el tanque no.4 de la planta de Lixiviación, en el período estudiado.



### **3.4 Conclusiones del capítulo.**

- Los gráficos de consumo reflejan que los picos máximos ocurren en el horario de la tarde durante el proceso tecnológico de la planta.
- Las mediciones de la densidad de las pulpas se realizan de manera indirecta en el laboratorio, y el gráfico indica una alta variabilidad de la misma durante el proceso.
- Los gráficos permiten observar los días más cargados y sus horarios respectivos de mayor consumo.



# Capítulo IV

Estimador de velocidad basado en red neuronal.



## **4.1 Introducción.**

En este capítulo se presenta un resume histórico sobre redes neuronales artificiales (RNA) y sus fundamentos. Este tema está bastante desarrollado en las referencias [2 y 29], por tal motivo solo pasaremos a hacer una breve descripción de algunos aspectos básicos. Una red neuronal es un procesador distribuido en paralelo, que puede filtrar y procesar las informaciones y tener una decisión. Una red neuronal se parece al cerebro en dos ideas básicas:

- La red necesita una cantidad de información para entrenarse.
- Las conexiones entre las neuronas se usan para almacenar las informaciones.

El uso de las redes neuronales ofrece muchas propiedades y capacidades, como el aprendizaje adaptativo, autoorganizativas<sub>2</sub> funcionamiento en paralelo en tiempo real y tolerancia de fallos por la codificación redundante de la información. Desde punto de vista de solucionar problemas, las redes neuronales son diferentes de los ordenadores convencionales que usan algoritmos secuenciales, mientras que las redes neuronales actúan como el cerebro humano, procesando la información en paralelo, y también pueden aprender y generalizar a casos nuevos que no estaban incluidos durante el proceso del diseño. Las redes neuronales pueden procesar la información más rápido que los ordenadores convencionales, pero tiene la desventaja de que no podemos seguir su respuesta paso a paso como se puede hacer al ejecutar un programa convencional en un ordenador por lo que no resulta fácil detectar los errores.

## **4.2 Nociones sobre redes neuronales artificiales.**

La base y fuente de inspiración de las redes neuronales artificiales es la célula del sistema nervioso de los animales, conocida como neurona, y es por tanto importante observar su fisiología para comprender como los investigadores en ingeniería y matemática tratan de imitar los mecanismos de almacenamiento y procesamiento de la información en el cerebro.

En una neurona biológica, ver figura 4.1, se pueden distinguir cuatro partes fundamentales:

### **4.2.1 El soma.**

El soma o núcleo de la célula es la parte central redonda donde se realizan casi todas las funciones lógicas de la neurona.



#### 4.2.2 El axón.

El axón es una fibra nerviosa conectada directamente con el soma y que sirve como canal de salida. El axón usualmente está muy ramificado para permitir su conexión a un gran número de neuronas. En estos sistemas biológicos las señales son secuencias de impulsos que se propagan por el axón sin atenuación.

#### 4.2.3 Las dendritas.

Las dendritas son las entradas de información a la neurona. Son un grupo de fibras muy ramificadas y de forma irregular que se conectan directamente al soma se calcula entre  $10^3$  y  $10^4$  el número de dendritas en una neurona, permitiendo que esta reciba información de un gran grupo de neuronas.

#### 4.2.4 La sinapsis.

Sinapsis son contactos especializados entre los axones y las dendritas de diferentes neuronas. Estas sinapsis pueden cambiar la polaridad de los potenciales provenientes de otras neuronas y en estos casos se suele hablar de naturaleza excitadora o inhibidora según sea su función para la excitación o bloques de la neurona. Se considera que el almacenamiento de la información está concentrado en estas conexiones sinápticas. Se conoce que en el sistema nervioso de los seres humanos estas conexiones sinápticas son de naturaleza química muy compleja a diferencia de los insectos que tienen conexiones de transmisión eléctricas simples.

McCulloch y Pitts construyeron un modelo básico de neurona artificial, con una neurona muy simple a base de un sumador y una función de activación. Las conexiones (sinapsis) de una neurona se consideran como se muestran en la figura 4.2. En ellas, las activaciones  $x$  con unas determinadas intensidades  $w_{ji}$  son sumadas, y se permite que en la salida de la neurona (axón) se origine una actividad siempre que la suma  $w_{ji}x_i$  supere un valor umbral ( $\theta_j$ ).

La expresión matemática de esta neurona es:

$$y_i = \varphi \left( \sum_{i=0}^n w_{ji} x_i + \theta_j \right) \quad (8)$$

Donde  $w_{ji}$  son los pasos sinápticos que ponderan las entradas  $x_i$  y  $\theta_j$  es el umbral.  $\varphi$  es la función de activación de la neurona y  $n$  el número total de pasos sinápticos conectados a la



entrada de la neurona. En algunos libros incluyen el umbral dentro de las entradas y de pasos quedando expresada la salida de la neurona como:

$$y_i = \varphi \left( \sum_{i=0}^n w_{ji} x_i \right) \quad (9)$$

Con  $x_0 = \pm 1$ , y  $w_{j0} = \theta_j$  dando una presentación más compacta. Como función de activación,  $\varphi$ , se pueden usar muchas funciones, pero las más usadas para los casos no lineales son las sigmoides. En la sección siguiente se explican las funciones de activación más utilizadas en redes neuronales.

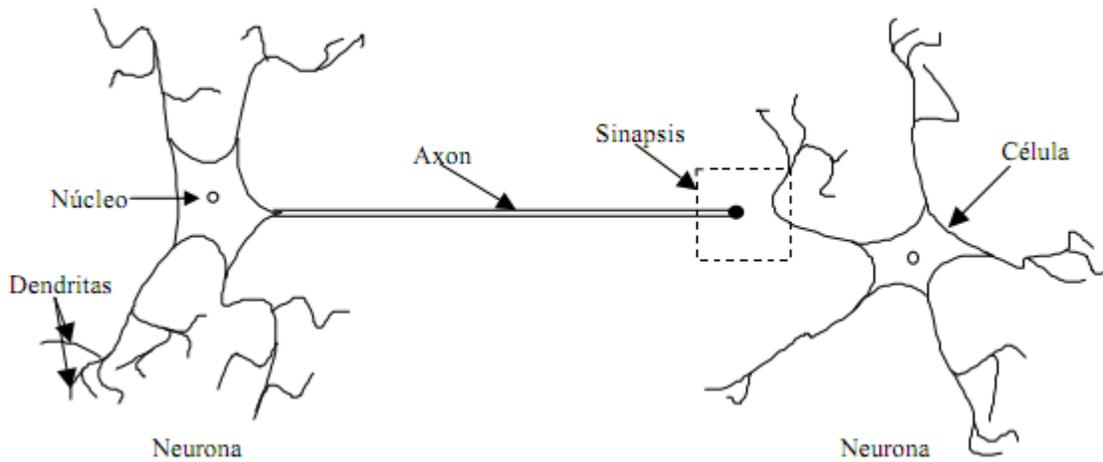


Figura 4.1 Modelo de neurona biológica.

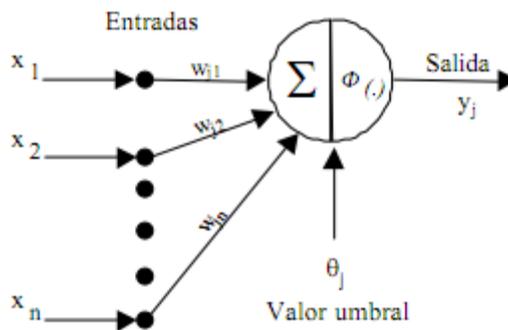


Figura 4.2 Modelo de neurona artificial

### 4.2.5 Funciones de activación.

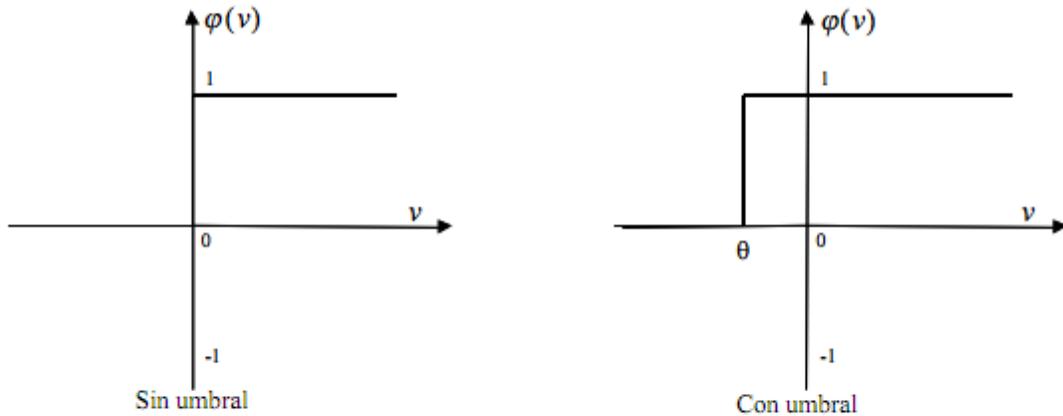
En esta sección, se presentan las funciones que más utilizaciones en estructuras de red neuronal artificial. Las funciones sigmoideas y lineales siempre usan en las redes neuronales



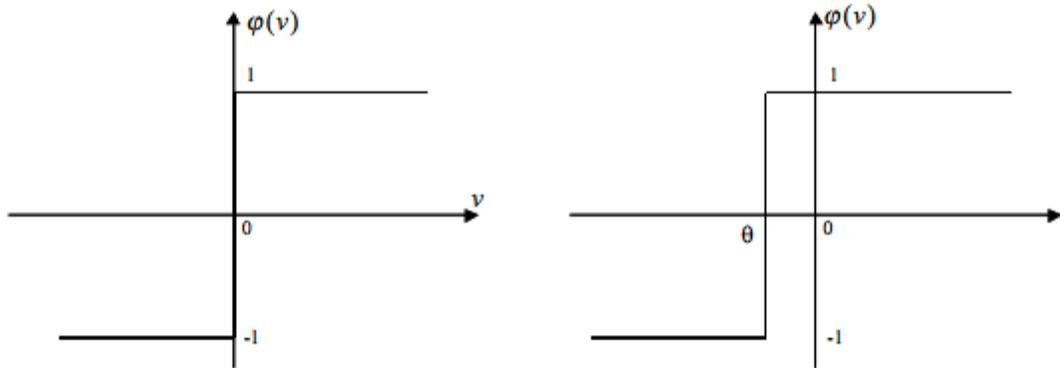
con propagación hacia adelante.

a) Función escalón de conexión o desconexión.

Esta función define frecuentemente denominada escalón de dos posiciones (sí o no). La salida de esta función es, o bien una constante positiva, una constante negativa o cero. Esta función posee una discontinuidad en un punto que imposibilita la evaluación de la derivada en dicho punto. La figura 4.3 se representa la familia de estas funciones.



$$(a) \text{ Función asimétrica. } \varphi(v) = \begin{cases} 0 & v < 0 \\ 1 & v \geq 0 \end{cases}$$



$$(b) \text{ función simétrica. } \varphi(v) = \begin{cases} -1 & v < 0 \\ 1 & v \geq 0 \end{cases}$$

Figura 4.3 Función escalón de conexión y desconexión.

b) Función saturación lineal.

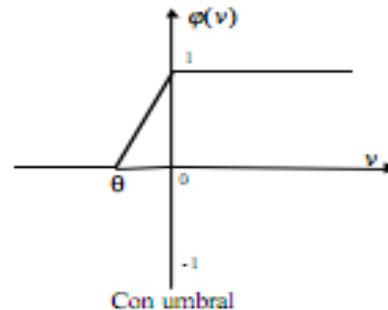
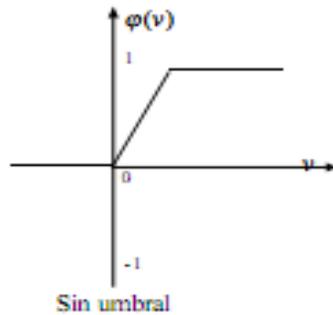
La función saturación lineal es similar a la función de escalón de conexión o desconexión, salvo que en un rango determinado de la variable de entrada, la salida tiene un



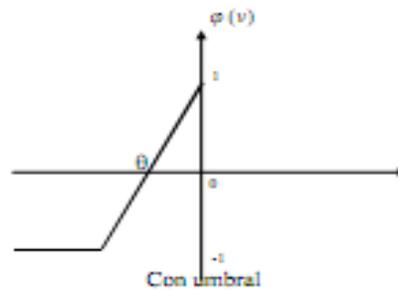
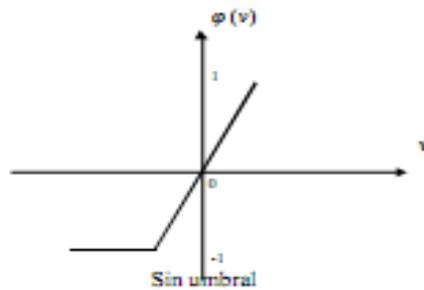
comportamiento proporcional. La figura 4.4 se muestran tan solo dos discontinuidades de su derivada.

c) Función sigmoïdal asimétrica.

Es una función, binaria continua y diferenciable en todo su dominio. La figura 4.5 expone una representación de esta función.



(a) Función asimétrica.  $\varphi = \begin{cases} 0 & v < 0 \\ \alpha v & 0 \leq v < 1/\alpha \\ 1 & 1/\alpha \leq v \end{cases}$



(b) Función simétrica.  $\varphi = \begin{cases} -1 & v < -1/\alpha \\ \alpha v & -1/\alpha \leq v < 1/\alpha \\ 1 & 1/\alpha \leq v \end{cases}$

Figura 4.4 Función saturación lineal.

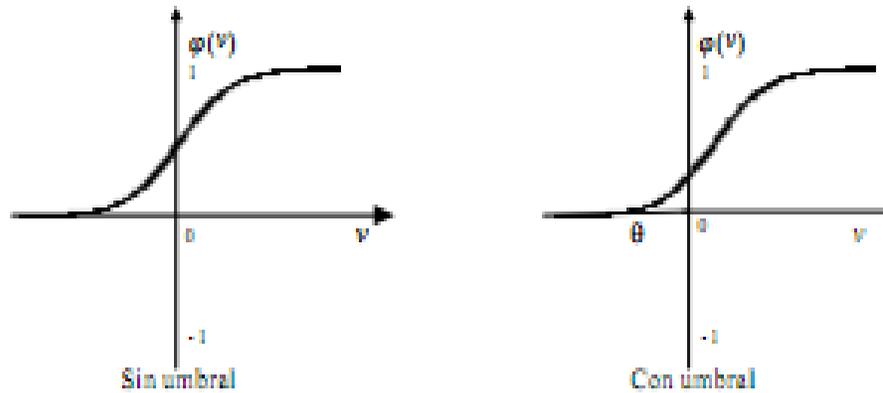
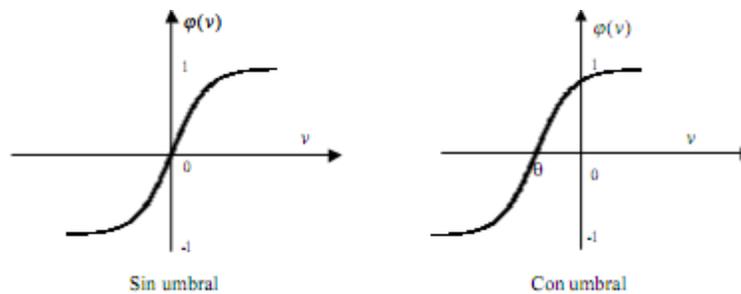


Figura 4.5 Función sigmoidal asimétrica.

$$\varphi = \frac{a}{1 + e^{-\gamma v}} + c \begin{cases} c = 0 \\ a = 1 \\ \gamma = 0:1 \end{cases}$$

d) Función sigmoidal simétrica.

Esta función también denominada tangente hiperbólica es completamente diferenciable en todo su dominio, monótonamente creciente y posee una característica bipolar. La figura 4.6 representa el gráfico de esta función.



$$\varphi = \frac{a}{1 + e^{-\gamma v}} + c \begin{cases} c = -1 \\ a = 1 \\ \gamma = 0:1 \end{cases}$$

Figura 4.6 Función sigmoidal simétrica.

e) Función lineal.

Esta función posee una característica tipo lineal como se observa en la figura 4.7, la cual no tiene límites en su rango.

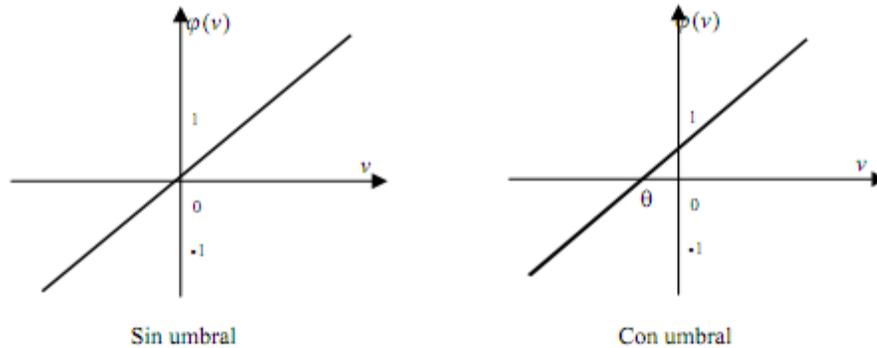


Figura 4.7 Función lineal.

#### 4.2.6 Aspectos de control

Teóricamente, para llegar a obtener un modelo podrían adoptarse dos enfoques diferentes:

- Por la vía analítica: determinar las ecuaciones y parámetros que intervienen siguiendo exclusivamente las leyes generales de la física.
- Por la vía experimental: en la cual se considera el sistema como una "caja negra", con determinadas entradas y salidas. Como se ilustra en la figura 4.8. En esta situación se realizaría un conjunto de experimentos que proporcionarían pares de medidas de las entradas y salidas durante la evolución del sistema hacia el estado estacionario, a partir de los cuales se trataría de determinar el modelo del sistema.



Figura 4.8 Sistema como caja negra.

#### 4.2.7 Identificación del sistema.

En la práctica se combinan se combinan ambos enfoques, actuando en dos etapas:

- Etapa de análisis, en la cual se tienen en cuenta las leyes físicas y las condiciones particulares de trabajo para establecer hipótesis sobre la estructura y propiedades del modelo que se pretende identificar.
- Etapa experimental, en la cual se adoptan las hipótesis establecidas anteriormente y se tienen en cuenta las mediciones para determinar el modelo.



#### 4.2.8 principio de superposición.

Un factor a tener en cuenta en el análisis es la determinación del tiempo de las experiencias, ya que pueden existir parámetros que varíen en función de perturbaciones lentas no medibles, o bien pueden aparecer no linealidades que no estén presentes en un transitorio.

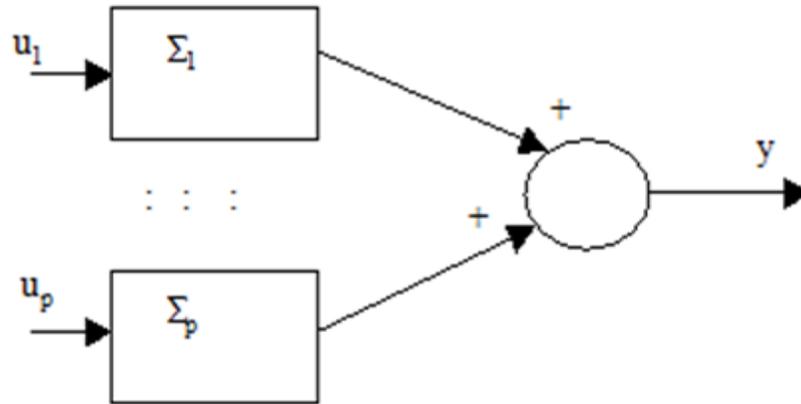


Figura 4.9 Aplicación del principio de superposición.

#### 4.2.9 tipos de redes neuronales artificiales.

Existen varios modelos de redes neuronales, de los cuales expondremos algunos a continuación.

##### Red neuronal simple

Se utilizan  $n$  neuronas de entrada y se conectan con  $m$  neuronas de salida mediante caminos pesados. No existe conexión entre neuronas. Cada neurona de Salida calcula una respuesta, y la salida de la red será un vector de  $m$  componentes. Si se combina con unidades de asociación resulta una arquitectura artificial a la del perceptron.

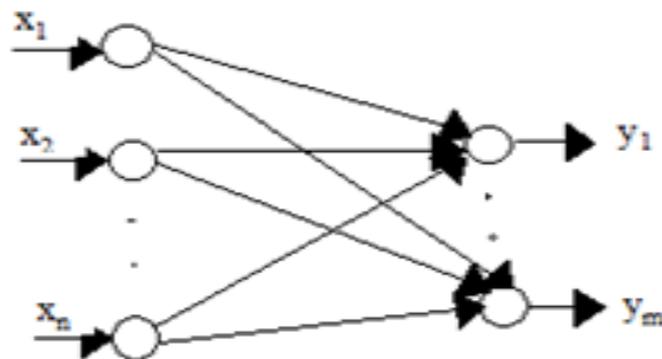


Figura 4.10 Topología de una red simple.



### Red multicapas

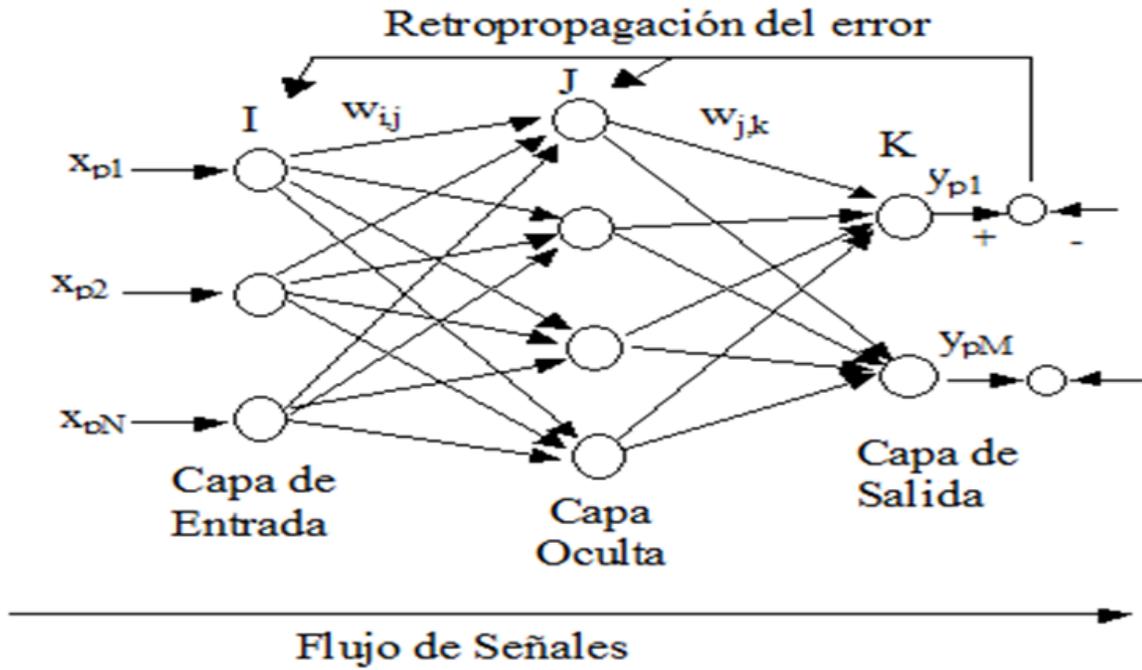


Figura 4.11 Topología de una red multicapa.

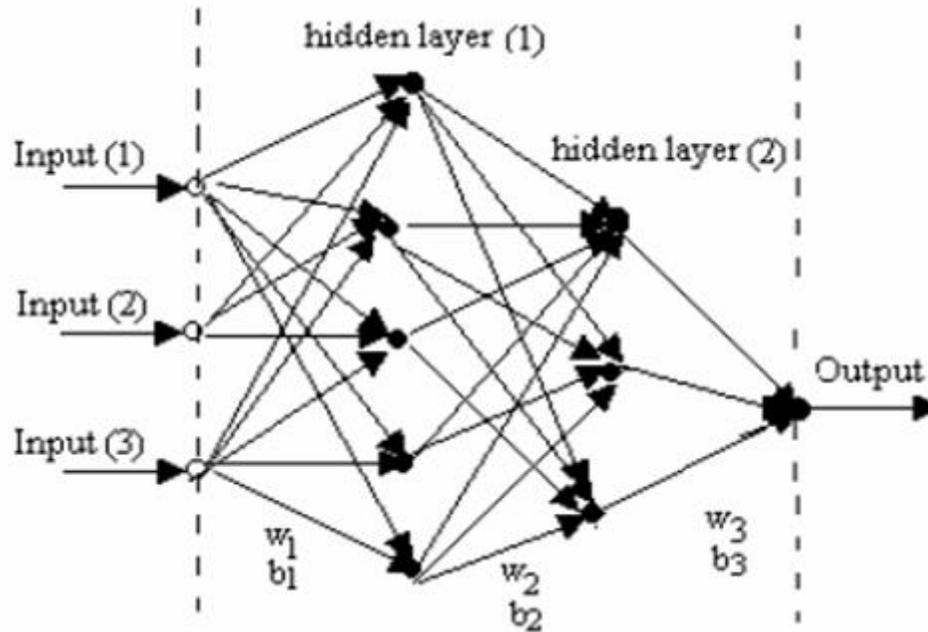


Figura 4.12 Arquitectura de un a red de tres multicapa.



### Modelo interactivo.

Se tiene un conjunto de  $n$  neuronas, las cuales se conectan completa y mutuamente, es decir, todas las unidades sirven como entradas y como salidas; cada neurona se conecta a la  $n-1$  restante mediante caminos pesados. Esta es la base de la red Hopfield.

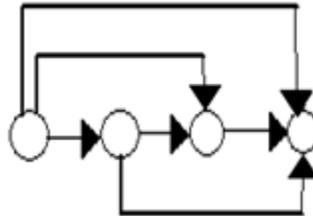


Figura 4.13 Modelo interactivo.

### 4.3 Modelo del accionamiento eléctrico con motor de inducción usando red Feed forward.

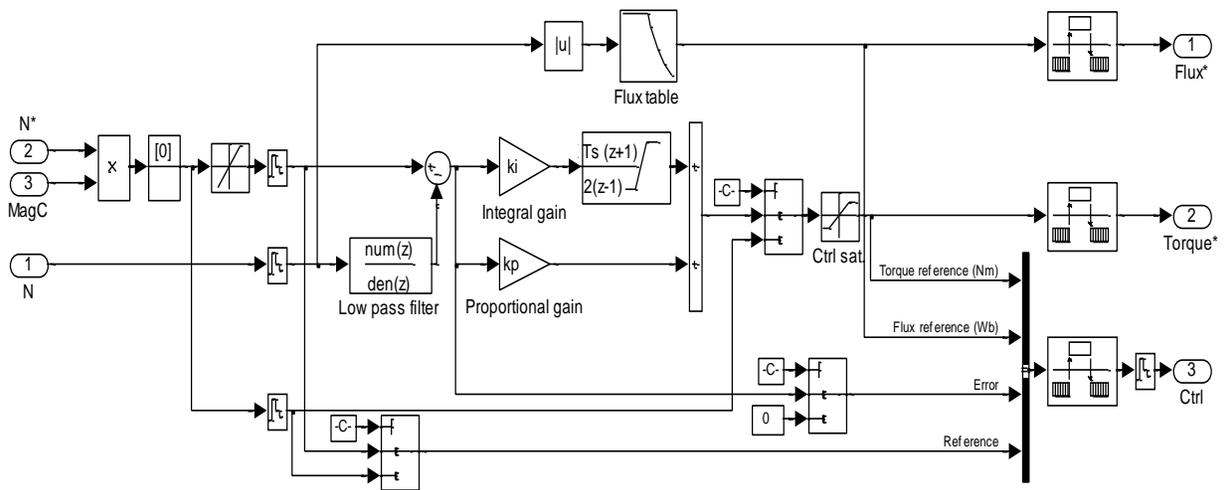


Figura 4. 14 Esquema del modelo DTC correspondiente al circuito del regulador discreto PI.

Este es el esquema del modelo DTC que corresponde al regulador discreto PI que se utilizó para el diseño de la red neuronal artificial Feed Forward.

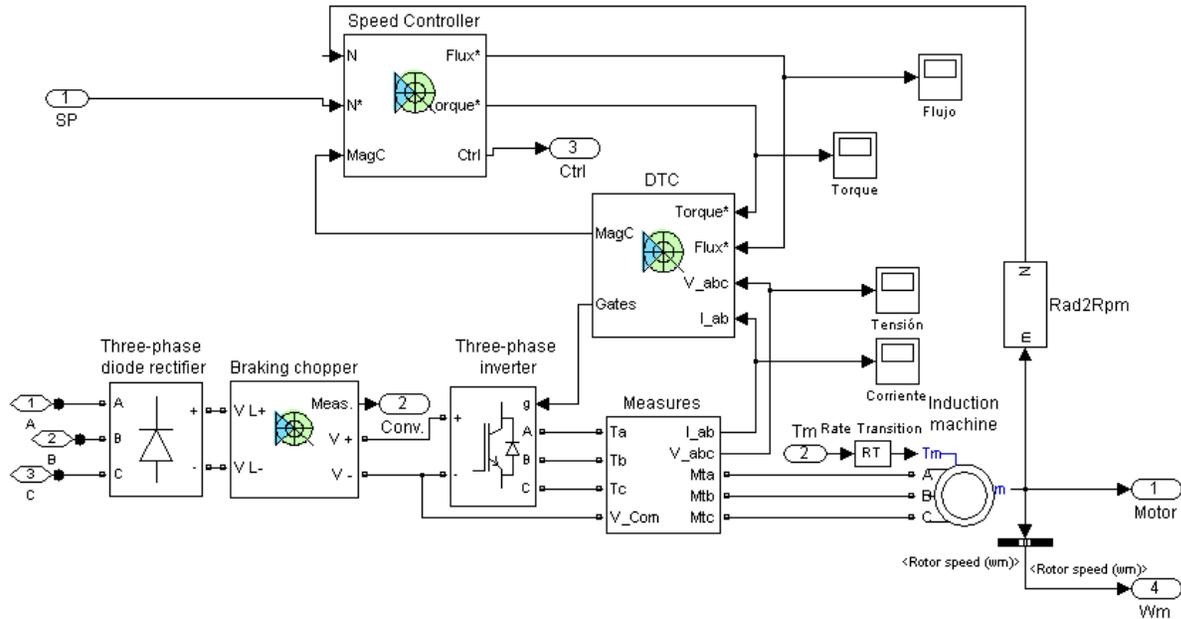


Figura 4.15 Esquema del modelo DTC para el variador de velocidad usando regulador con realimentación de torque y flujo magnéticos del motor de inducción.

Esquema del modelo DTC en accionamiento de motor de inducción que acciona bomba centrífuga. Aquí es donde se realizan las mediciones del flujo, Torque electromagnético, tensión y la corriente de estator, además se muestra en él la velocidad de referencia para el variador de velocidad y el torque de carga.

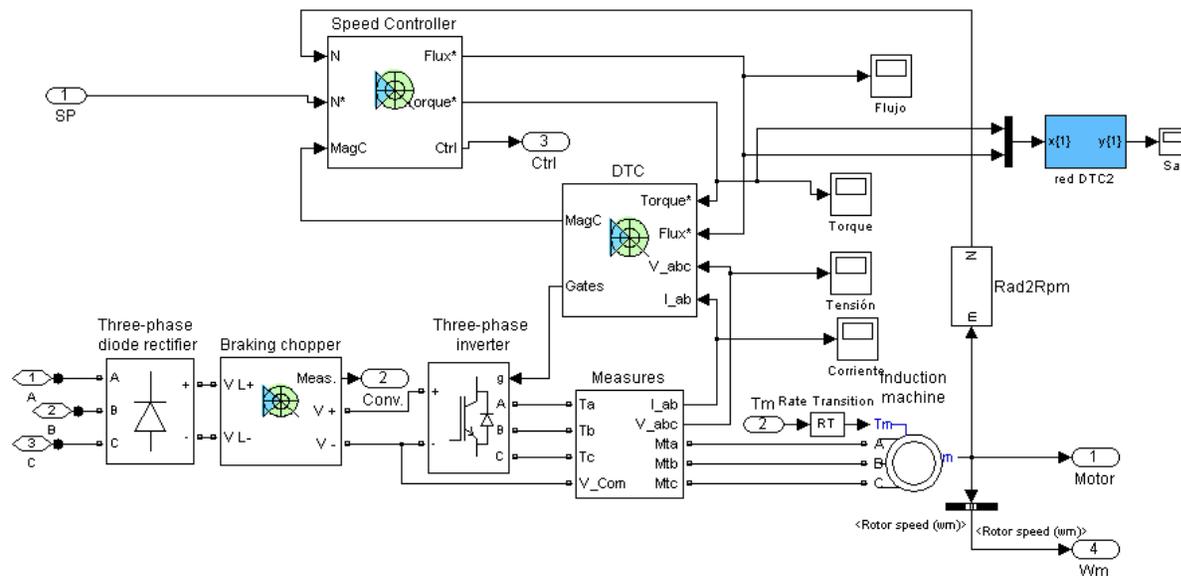




Figura 4.16 Esquema del modelo DTC para el variador de velocidad usando regulador con realimentación de torque y flujo electromagnético del motor de inducción con la red neuronal de tipo Feed – Forward.

#### 4.4 Red neuronal Feed Forward

Esta red Feed Forward contará con tres entradas, 15 neuronas en la capa oculta y una neurona en la salida, las neuronas ocultas trabajan con una función de activación tansig y la de salida con purelin el método de entrenamiento empleado es el Levenberg - Marquart.

La misma fue programada en MATLAB con los parámetros obtenidos en el esquema del modelo DTC (4.15).

##### 4.4.1 Programa para entrenar la red neuronal de tipo Feed Forward

```
% -- Programa para entrenar la red neuronal tipo Feed-forward: EntrenaRed1

% Se genera una red feedforward con 3 entradas, 15 neuronas en la capa
% oculta y una neurona de salida. Las neuronas ocultas trabajan con
% una función de activación tansig y la de salida con purelin. El
% método de entrenamiento empleado es el Levenberg - Marquart.
% ts tiempo de muestreo.

% Se crea la red neuronal

red = newff([0 2;300 334],[15,1],{'tansig','purelin'},'trainlm');

% Se usa la entrada P, y la salida T

P=[0 0.1 0.2 0.3 0.4 0.5 0.6 0.7 0.8 0.9 1.0 1.1 1.2 1.3 1.4 1.5 1.6 1.7 1.8 1.9 2.0;0 0.1 0.2 0.3
0.4 0.5 0.6 0.7 0.8 0.9 1.0 1.1 1.2 1.3 1.4 1.5 1.6 1.7 1.8 1.9 2.0];

T=[311.0553 312.7958 314.5365 316.2771 318.0179 319.7587 321.4996 ...
323.2405 324.9815 326.7226 328.4637 330.2049 331.9461 333.6885...
333.5796 333.4682 333.3568 333.2455 333.1341 333.0228 332.9114];

% Definición de algunos parámetros de aprendizaje
```



```
red.trainParam.show = 50; % Mostrar cada 50 iteraciones

red.trainParam.goal = 0.0001; % Error de salida

red.trainParam.epochs = 100; % Total de épocas

% Entrenar la Red Neuronal.

red = train(red,P,T);

% Se simula la red entrenada

yred = sim(red,P);

figure(1)

plot(yred),grid

pause

% Genera el bloque Simulink que representa la Red Neuronal

% entrenada y con el -1 se indica que se puede modificar ts.

gensim(red,-1)
```

### Modelo de la red neuronal obtenida.

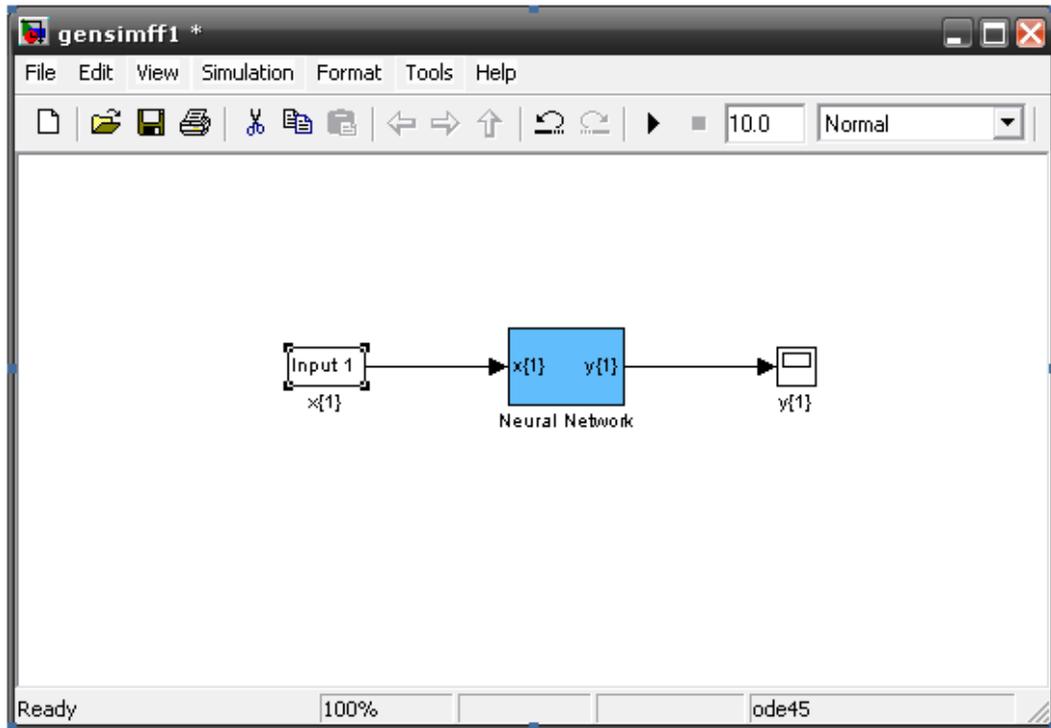


Figura 4.17 Modelo de la red neuronal artificial de tipo Feed Forward obtenida del programa anterior.

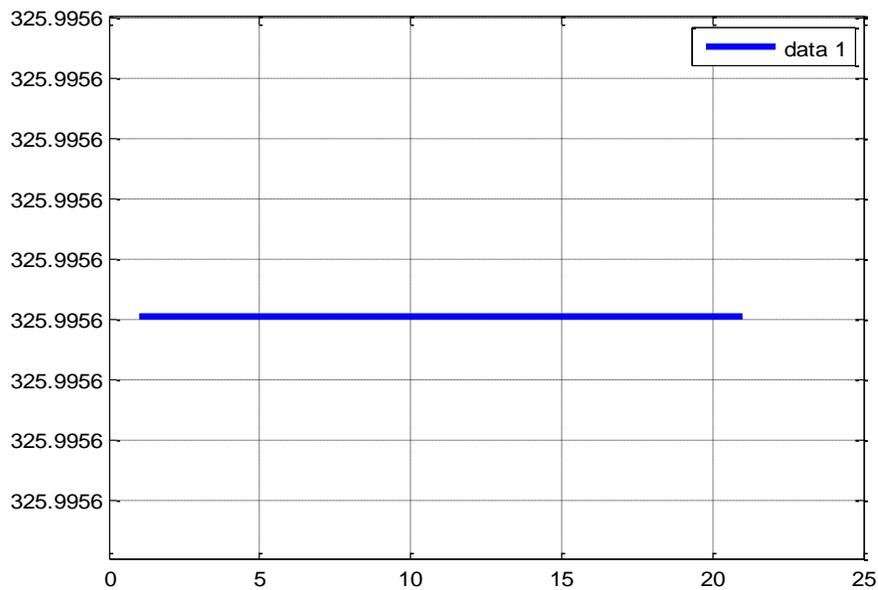


Figura 4.18 Comportamiento de la red neuronal feed forward.



De la figura 4.18, se aprecia que el regulador PI en su trabajo conjunto con el estimador neuronal establece el pulso a las compuertas de los IGBT del Inversor Sinusoidal de Tensión a PWM.

#### 4.5 Gráficos de comportamiento de la red neuronal.

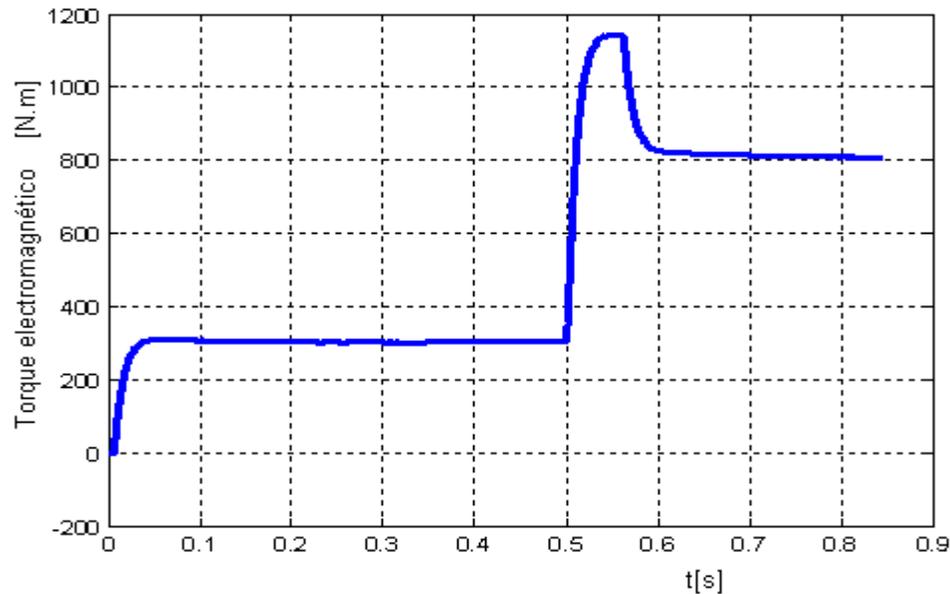


Figura 4.19 Comportamiento del torque electromagnético con el uso del regulador neuronal usando red feed-forward.

Como se observa, el torque es gobernado desde el estimador neuronal para determinados valores del torque electromagnético de acuerdo al nivel de la carga mecánica en el árbol del motor de inducción.

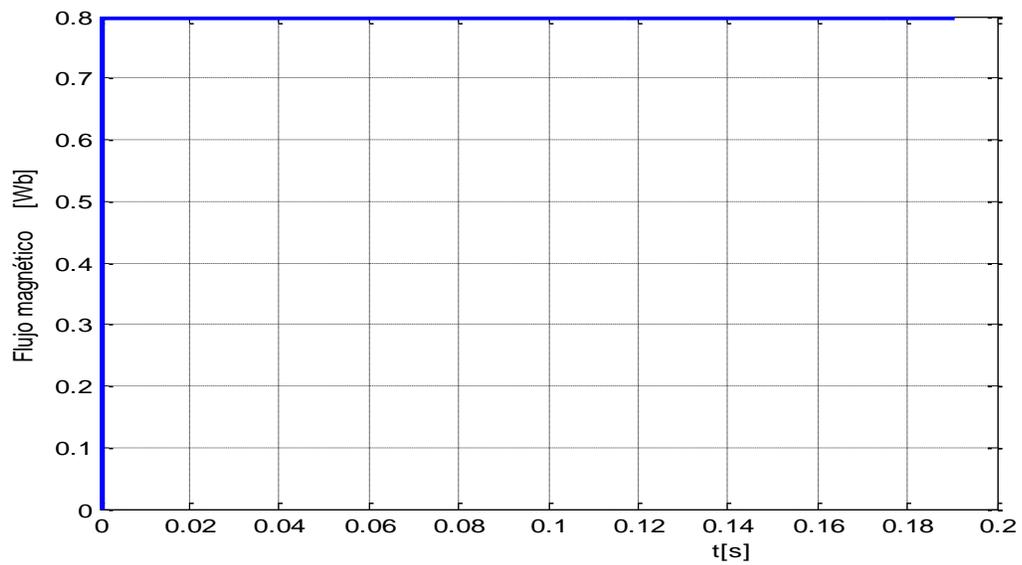


Figura 4.20 Comportamiento del flujo magnético con el uso del regulador neuronal usando red feed-forward.

De la figura 4.20 se puede ver que para determinado torque electromagnético corresponde un valor estable de flujo magnético, en este caso 0.8 Weber.

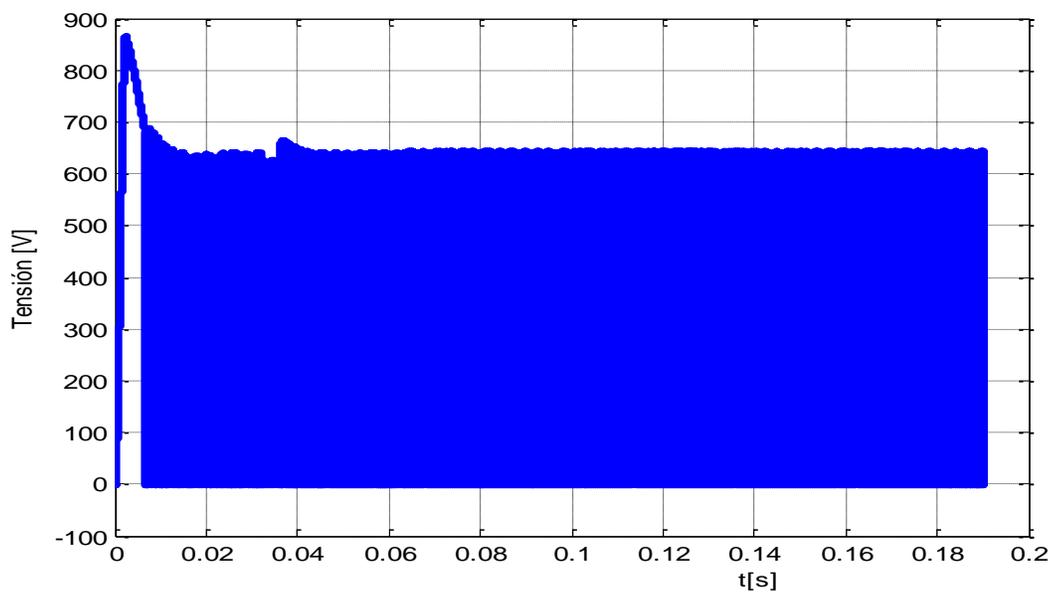


Figura 4.21 Comportamiento de la tensión con el uso del regulador neuronal usando red feed-forward.

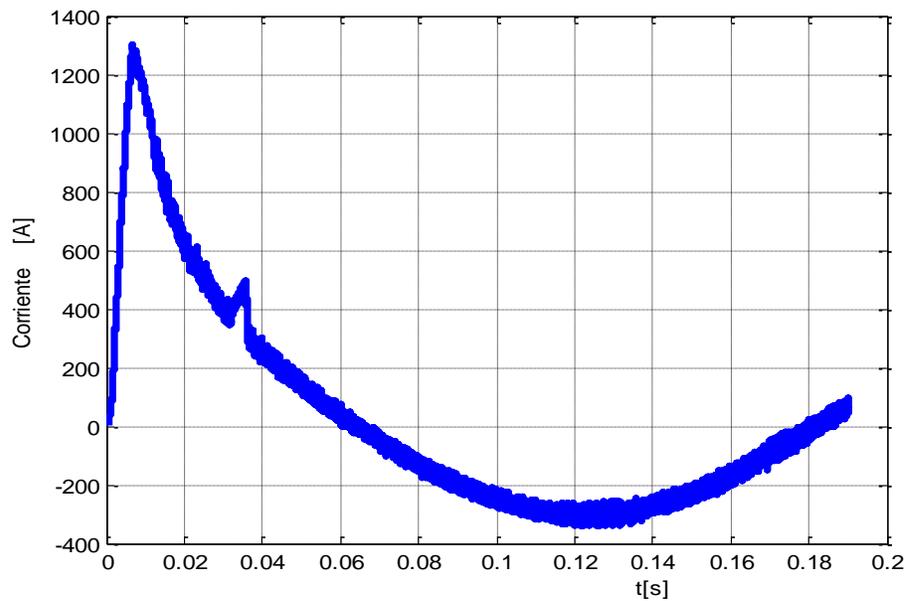


Figura 4.22 Comportamiento de la corriente de estator con el uso del regulador neuronal usando red feed-forward.

Las tensiones y corrientes (figuras 4.21 y 4.22) corresponden al nivel de carga en el árbol del motor de inducción, aspecto que corrobora el correcto funcionamiento del regulador en conjunto al bloque estimador de torque neuronal.

#### 4.5 Conclusiones parciales.

- Este trabajo demuestra que la aplicación de las redes neuronales en un sistema DTC para emular o reemplazar cuatro bloques funcionales del mismo, da unos resultados satisfactorios.
- La red neuronal Feed Forward muestra un buen comportamiento y generalización en comparación con el método convencional debido a que no depende del posible cambio de los parámetros del motor de inducción.
- Las otras partes del DTC muestran también buenos resultados en comparación con el método tradicional.



# Capítulo V

## Valoración económica del trabajo



## **5.1 Introducción.**

En este capítulo se plantea el aporte económico como resultado de la experimentación del sistema de accionamiento eléctrico de bomba centrífuga.

Para esto se establece una metodología la cual demuestra que es muy económico para el país el uso del control DTC con redes neuronales artificiales ya que esta le da grandes aportes y tiene un período de recuperación de la inversión muy corto, debido a sus ingresos.

## **5.2 Cálculo del aporte económico**

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 con motores eléctricos de: producción de aire comprimido, las bombas centrífugas, las instalaciones de molienda y secado y los ventiladores de tiro forzados. 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.

En esencia la introducción de las redes neuronales artificiales con control directo del torque con variadores de velocidad, que controle y monitoree el accionamiento y más si esta elevado a disminuir las averías, permitiendo la disminución de las pérdidas de energía y aumenta el tiempo de vida útil o empleo de la bomba y motores.

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. El cálculo económico está dado por el ahorro de energía que puede significar cuando utilizamos el DTC con redes neuronales artificiales y el incremento del tiempo de vida útil de la instalación.



La energía ahorrada para las nuevas condiciones de trabajo del motor eléctrico y la bomba centrífuga se puede estimar con las siguientes expresiones (10) y (11).

El mejoramiento de la eficiencia del motor eléctrico determinada por la energía total ahorrada por el uso del control DTC con redes neuronales artificiales que modifica el trabajo en el motor se puede estimar como (10):

$$E_{MIahorr} = N_b \cdot \left( \frac{1}{\eta_{MI1}} - \frac{1}{\eta_{MI2}} \right) \cdot h_{totales} \quad (10)$$

Donde:

$E_{MIahorr}$  – es la energía total ahorrada en el motor eléctrico, [kWh].

$N_b$  – es la potencia de la bomba centrífuga, [kW].

$\eta_{MI1}$  – es la eficiencia del motor eléctrico sin el control DTC con RNA, [%].

$\eta_{MI2}$  – es la eficiencia del motor eléctrico con el control DTC con RNA, [%].

$h_{totales}$  – horas totales de operación del accionamiento, [h].

El mejoramiento de la eficiencia de la bomba centrífuga determinada por el ahorro de energía en ella, se determina como:

$$E_{bcahoor} = N_{b1} \left( 1 - \frac{\eta_{bc1}}{\eta_{bc2}} \right) \cdot h_{totales} \quad (11)$$

Donde:

$\eta_{bc1}$  – es la eficiencia de la bomba sin el control DTC con RNA, [%].

$\eta_{bc2}$  – es la eficiencia de la bomba con el control DTC con RNA, [%].

Podemos poner como ejemplo el ahorro de energía con el uso de control DTC con regulador neuronal el cual se muestra en la tabla 5.1



Tabla 5.1 Ahorro de energía anual con el uso del algoritmo de control DTC con regulador neuronal en accionamientos de motores con bombas centrífugas en plantas de Las Empresas Cmte. René Ramos Latour de Nicaro.

Potencia del motor (KW)	$\eta_{MI1}$ [ % ]	$\eta_{MI2}$ [ % ]	$\Delta E_{Ahorrada}$ anual en motores (KWh)	$\Delta E_{Ahorrada}$ anual total (KWh)	Costo de $\Delta E_{Ahorrada}$ anual total (CUC)
55	0.85	0.890	1230.75	11076.75	2104.18
55	0.72	0.84	28058.78	112235.12	21324.67
55	0.57	0.845	142129.92	184259.84	54009.36
55	0.26	0.76	467742.00	467742.00	88870.98
Total			639161.45	775312.71	166309.19

- Aplicado a Nueve accionamientos eléctricos en la empresa Cmte. René Ramos Latour de Nicaro los cuales trabajan al 100% de la carga nominal.
- Aplicado a cuatro accionamientos eléctricos en la empresa Cmte. René Ramos Latour los cuales trabajan a un 75% de la carga nominal.
- Aplicado a dos accionamientos eléctricos en la empresa Cmte. René Ramos Latour de Nicaro los cuales trabajan a un 50% de la carga nominal.
- Aplicado a dos accionamientos eléctricos en la empresa Cmte. René Ramos Latour de Nicaro los cuales trabajan a un 25% de la carga nominal.

### 5.3 Cálculo del tiempo de amortización de la inversión.

$$\text{Se tiene que } T_{\text{amortización}} = \frac{\text{Inversión}}{\text{Energía Ahorrada}} \quad (12)$$

Donde:

$T_{\text{amortización}}$ : es el tiempo de recuperación de la inversión.

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



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

EL costo de los chips de RNA está en el orden 850 y 1200 (CUC) y para estos el tiempo de recuperación de la inversión es solo de 2 a 3 días laborables lo que los hace muy funcional y fácil de poder materializar el proyecto.

#### **5.4 Conclusiones parciales**

- Con la introducción del regulador neuronal con control DTC en el accionamiento eléctrico de la bomba centrífuga de hidrotransporte de pulpa laterítica se logra un efecto económico al año de unos 166 309.19 (CUC) pesos convertibles por concepto de energía dejada de consumir en forma de pérdidas.
- El costo de los chips de redes neuronales artificiales son sumamente baratos por lo que se pudo materializar el proyecto en un corto tiempo y pequeño también será en tiempo de amortización.



## CONCLUSIONES

- Se alcanzó el ajuste y configuración de un regulador por control directo del torque para un accionamiento con motor de inducción usando un estimador basado en mediciones de corriente y flujo magnético de la máquina, sin el uso de sensor de velocidad. Las figuras 4.18 hasta la 4.22 corroboran esta conclusión.
- La simulación de la red neuronal tipo Feed Forward garantiza el autoajuste del regulador DTC ante cualquier condición de carga mecánica en el árbol del motor.
- El ahorro de energía con el uso del regulador neuronal con control DTC en accionamientos con motor de inducción aporta 166 309.19 CUC anual por concepto de energía dejada de consumir en forma de pérdidas.



## **RECOMENDACIONES**

- Continuar el estudio del control directo del torque aplicado a estos accionamientos con modelos de control vectorial, desarrollando el algoritmo de la red neuronal feed-forward a través de un sistema embebido a micro controlador que garantice la materialización del control.
- Diseñar un sensor para la medición de densidad de pulpa laterítica en los sistemas hidráulicos de la planta de lixiviación del proceso CARON.



## BIBLIOGRAFÍA

- 1- Bim, E. and L.R. Valdenebro, A Genetic Algorithms Approach for Adaptive Field Oriented Control of Induction Motor Drives. IEEE Power Engineering Society, 1999
- 2- Bishop, Christopher M: Neuronal networks for pattern recognition. Oxford. Clarendon Press. 1990.
- 3- Bittel, L./Ramsey, J. (1992). Enciclopedia del MANAGEMENT. Ediciones Centrum Técnicas y Científicas. Barcelona, España.
- 4- Bodson, M. and J. Chiasson, Differential -Geometric Methods for Control of Electric Motors. International Journal of Robust and Nonlinear Control, 1998.
- 5- Bose, B.K., T.-W. Chun, and M.-K. Choi, A Novel Start-Up Scheme of Stator Flux Oriented Vector Controlled induction Motor Drive Without Torque Jerk.IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2001.
- 6- Buja, G.S. and M.P. Kazmierkowski, Direct Torque Control of PWM Inverter- Fed AC Motors- A Survey. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2004.
- 7- Cardoso, F.D.S., J.F. Martins, and V.F. Pires, A Comparative Study of a PI, Neural Network and Fuzzy Genetic Approach Controllers for an AC-Drive, in COIMBRA1998, IEEE: AMC.
- 8- Casadel, D. et. al. *Two Viable Schemes for Induction Motors Torque Control. Transacciones del IEEE sobre la Electrónica de Potencia, septiembre 2002, 17(5).*
- 9- Chiasson, J., Nonlinear Controllers for an induction motor. Control Eng. Practice, 1996.4(7): p. 77-990.
- 10- DwayneTelford, M.W. Dunnigan, and B.W. Williams, Online Identification of Induction Machine Electrical Parameters for Vector Control Loop Tuning.IEEE
- 11- FAG SOUTH EAST ASIA PTE LTD 2002).
- 12- Fitzgerald, A. E.; Kingsley, Ch.; Umans, S.: "Electric Machinery", Ed. Mc. Graw Hill.Fitzgerald, et al., 2004).
- 13- Forschungszentrum Karlsruhe, FZK; Institut fur Mikroelektronik Stuttgart IMS: "Sand" Powerful neuroprocessor for intelligent system. Notes 8/1997.
- 14- Guidi, G. and H. Umida, A novel Stator Resistance Estimation Method for Speed-Sensorless Induction Motor Drives. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2000.
- 15- Habetler, T.G.; Divan, D.M: Control strategies for direct torque control using discrete pulsen modulation.IEEE trans on Ind. Applicat., Vol"7, No.5, pp893 – 901, September/october 1991.
- 16- Harnefors, L., M. Jansson, and R. Ottersten, Unified Sensorless Vector Control of Synchronous and Induction Motors. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2003.
- 17- Haykin, S: Neural networks. A comprehensive foundation. 1994. Macmillam College Publishing Company Inc.



- 18- Headquarters, dSPACEmbh; USA y Canada, dSPACEInc; dSPACE Solutions for control. S1103 PPC controller board new products. Summer 1998
- 19 Hinkkanen, M. and J. Luomi, Parameter Sensitivity of Full-Order Observers for Induction Motors. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2002.
- 20- Hurst, K.D., T.G. Habetler, and F. Profumo, Zero-Speed Tacholeless IM Torque Control: Simply a Matter of Stator Voltage Integration. IEEE Transactions on Industrial Applications, 1998.
- 21- Intel Corp.: Neural network solution. 1991.
- 22- Ivanov - Smolensky, A.V.: "Máquinas Eléctricas", Editorial Mir, Moscú.
- 23- K., J.-I. Ha, and M. Sawamura, A Hybrid Speed Estimator of Flux Observer for Induction Motor Drives. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2006.
- 24- Kerkman, R.J., J.D. Thunes, and Otros, A Frequency Based Determination of the Transient Inductance and Rotor Resistance for Field Commissioning Purpose. Allen-Bradley Co., 1999. Standard Drives Bussines (POB 760).
- 25- Klingshern, E; Jordan, H. E.: "Polyphase Induction Motor Performance and Losses on Nonsinusoidal Voltaje Sources", IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol.87, No.3, 1968.
- 26- Lee, J.-S., T. Takeshita, and N. Matsui, Stator-Flux-Oriented Sensorless Induction Motor Drive for Optimum Low-Speed Performance. IEEE Transactions on Industrial Applications, 1997.
- 27- Lippmann, R. P: An introduction to computing with neuronal nets. IEEE ASSP Magazine, PP. 4-22, April 1987.
- 28- Massoumnia, M. (1986). *A geometric approach to the synthesis of failure detection filters*. IEEE Trans. Aut. Control, 839-846.
- 29- Masters, T: Advanced algorithms for neural networks a C++ sourcebock, John Wiley & Sons, INC. 1993.
- 30- Nash, James N: Direct toque control, Induction motor vector control without an encoder. IEEE Trans. on Ind. Applicat., Vol. 33, No. 2, PP. 333-341, March/April 99
- 31- Ohishi, K., et al., High-Performance Speed Servo System Considering Voltage Saturation of a Vector-Controlled Induction Motor. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2006.
- 32- Rios, A., Mousalli, G., & Rivas, F. (2002). *Invertibility and neural networks based FDI filter*. En IASTED international conference on intelligent systems and control. Tsukuba – Japan.
- 33- Rojas Purón, L. D. *Accionamiento eléctrico asincrónico para transporte eficiente de pulpa laterítica. Tesis doctoral. ISPJAE, 2006.*

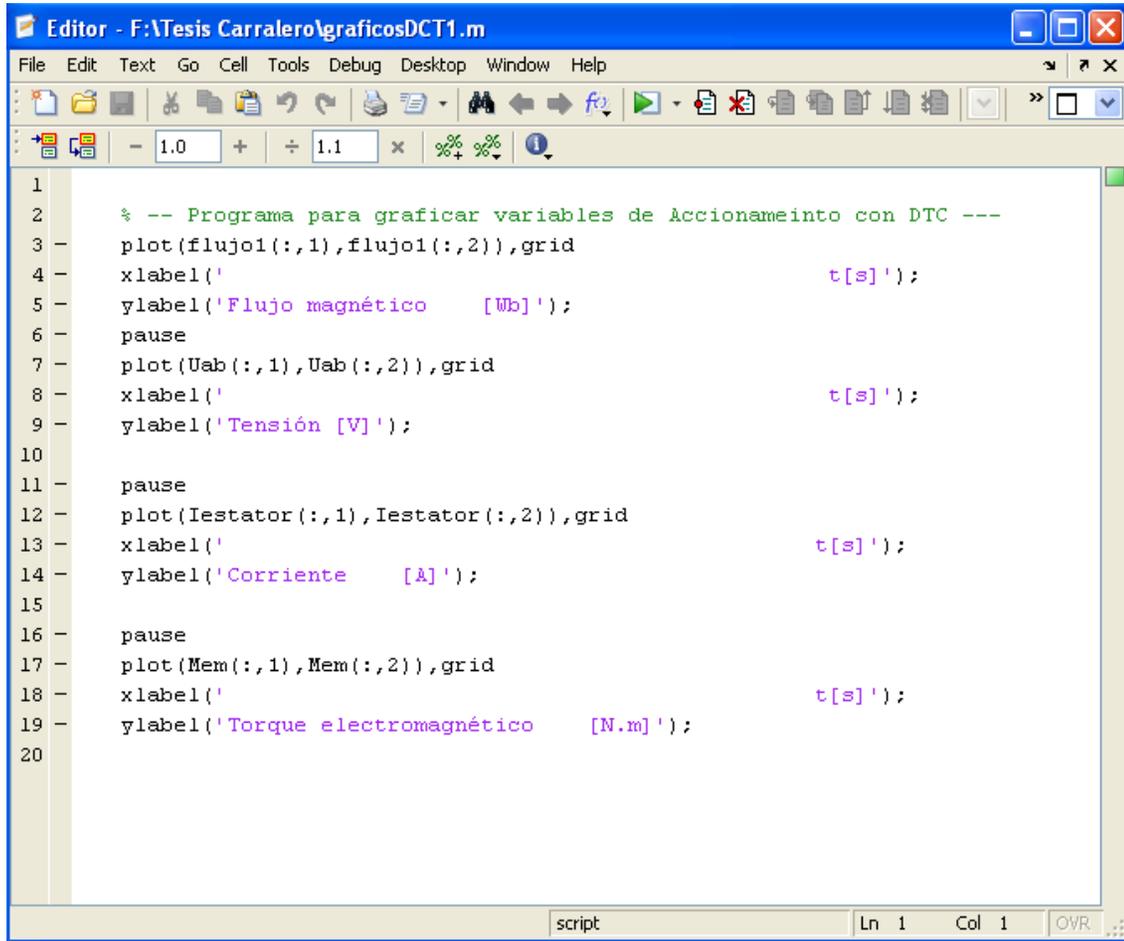


- 34- Rosaler, Robert C. (2002). Manual del Ingeniero de Planta. Mac-Graw-Hill/Interamericana de Editores, S.A. de C.V.
- 35- Salo, M. and H. tuusa, A Vector-Controlled PWM Current-Source-Inverter-Fed Induction Machine Drive Whit Stator Current Control Method. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2005.
- 36- Silva, Márquez Cardoso, 2005); SIEMENS A&D SD CS Service Cooperation, 1995; FAG SOUTH EAST ASIA PTE LTD, 2002)
- 37- Steinke, J.K., G.J. Dudler, and B.P. Huber, Field Oriented Control of a High Power GTO-VSI Fed AC Drive with High Dynamic Performance Using a Programmable High Speed Controller (PHSC). IEEE Transactions on Control Systems Technology, 1992.
- 38- Takahashi, I.; Noguchi, T: A new quick-response and High-efficiency control strategy of an induction motor. IEEE Trans. on Ind. Applicat., Vol IA-22, No. 5, PP. 820-827, September/October 1986.
- 39- Trzynadlowski, A. M.; Legowski, S: Application of neural networks to the optimal control of three phase voltage controlled inverters. IEEE Trans. On Power Electron, Vol. 9, No 4, PP. 397-404, July 1994.
- 40- Vaclavek, P. and P. Blaha, Lyapunov-Function-Based Flux and Speed Observer for AC Induction Motor Sensorless Control and Parameter Estimation. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2006.
- 41- Wai, R.-J. and K.-M. Lin, Robust Decoupled Control of Direct Field-Oriented Induction Motor Drive. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2005.
- 42- Wang, K., J. Chiasson, and M. Bodson, An online Rotor Time Constant Estimator for the Induction Machine. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2005.
- 43- [www.fio.unicen.edu.ar/usuario/verucchi/curriculum.pdf](http://www.fio.unicen.edu.ar/usuario/verucchi/curriculum.pdf)
- 44- [www.mantenimientomundial.com/](http://www.mantenimientomundial.com/)
- 45- [www.solomantenimiento.com/](http://www.solomantenimiento.com/)



## ANEXOS

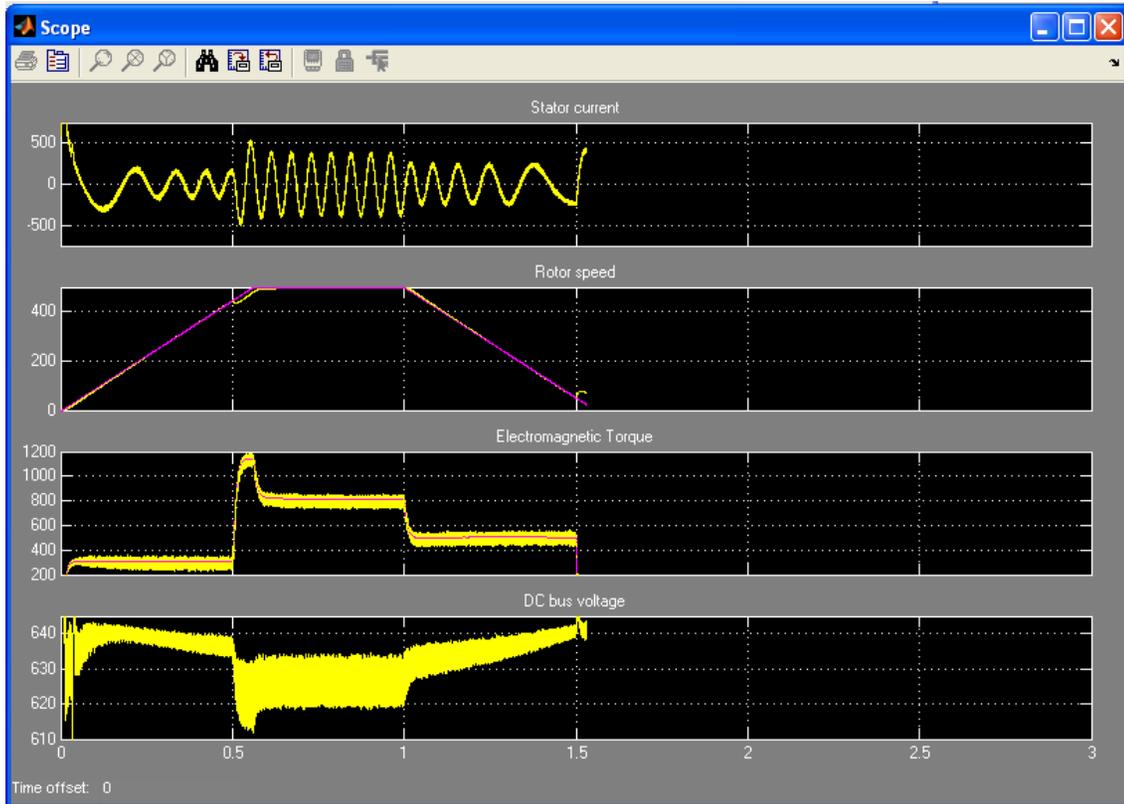
### Anexo 1 Programa en MATLAB para graficar variables de accionamientos con DTC.



```
1
2  % -- Programa para graficar variables de accionamiento con DTC ---
3  plot(flujoi(:,1),flujoi(:,2)),grid
4  xlabel('                                t[s]');
5  ylabel('Flujo magnético [Wb]');
6  pause
7  plot(Uab(:,1),Uab(:,2)),grid
8  xlabel('                                t[s]');
9  ylabel('Tensión [V]');
10
11  pause
12  plot(Iestator(:,1),Iestator(:,2)),grid
13  xlabel('                                t[s]');
14  ylabel('Corriente [A]');
15
16  pause
17  plot(Mem(:,1),Mem(:,2)),grid
18  xlabel('                                t[s]');
19  ylabel('Torque electromagnético [N.m]');
20
```

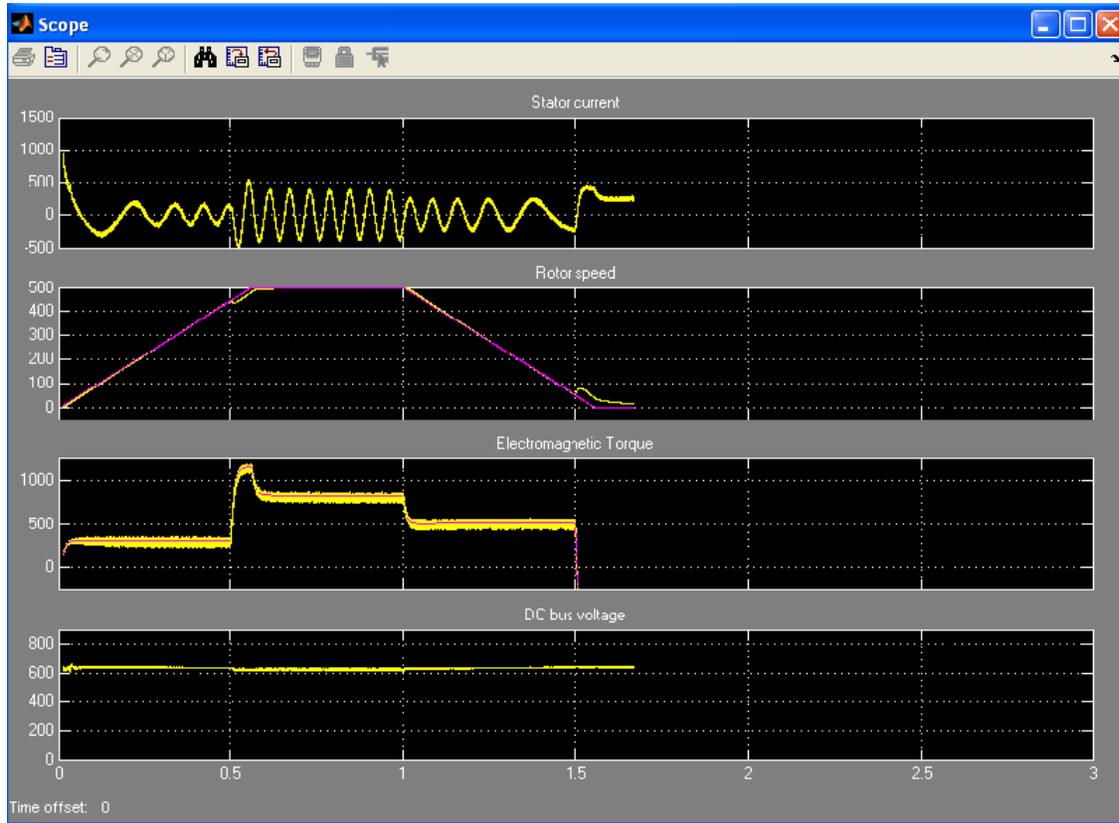


**Anexo 2** Vista del scope que muestra el comportamiento de las variables del accionamiento con DTC y RNA.



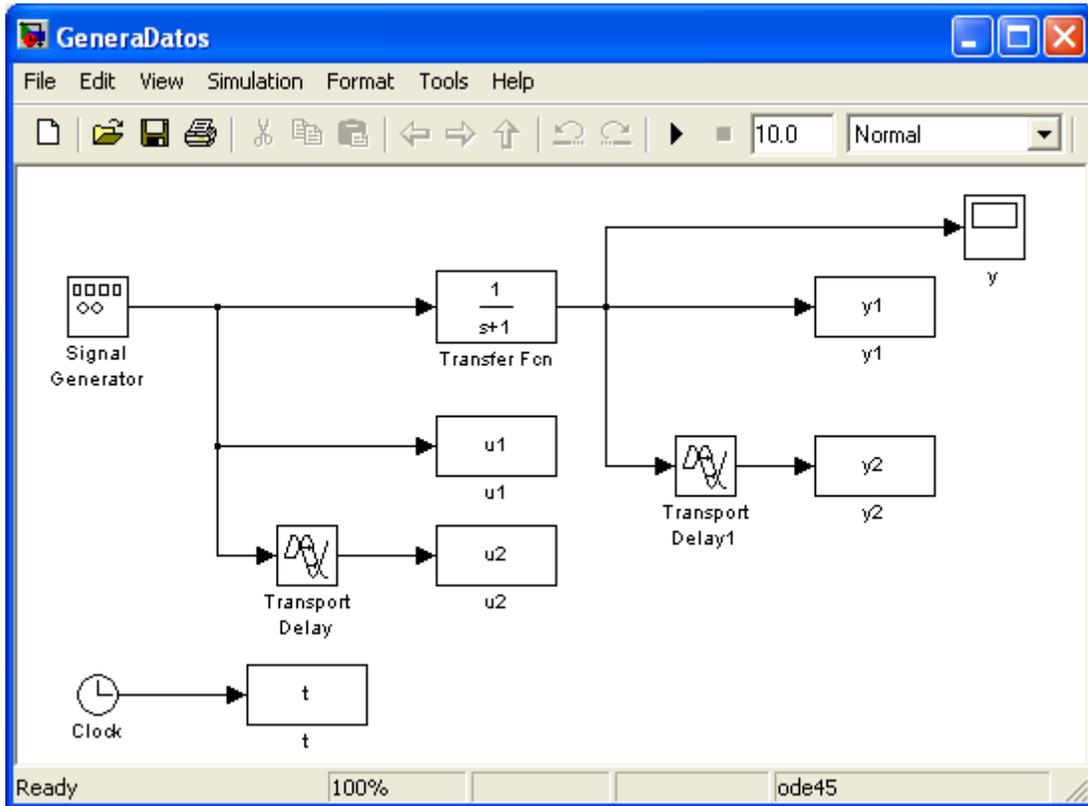


### Anexo 3 Vista del scope que muestra el comportamiento de las variables del accionamiento con DTC.





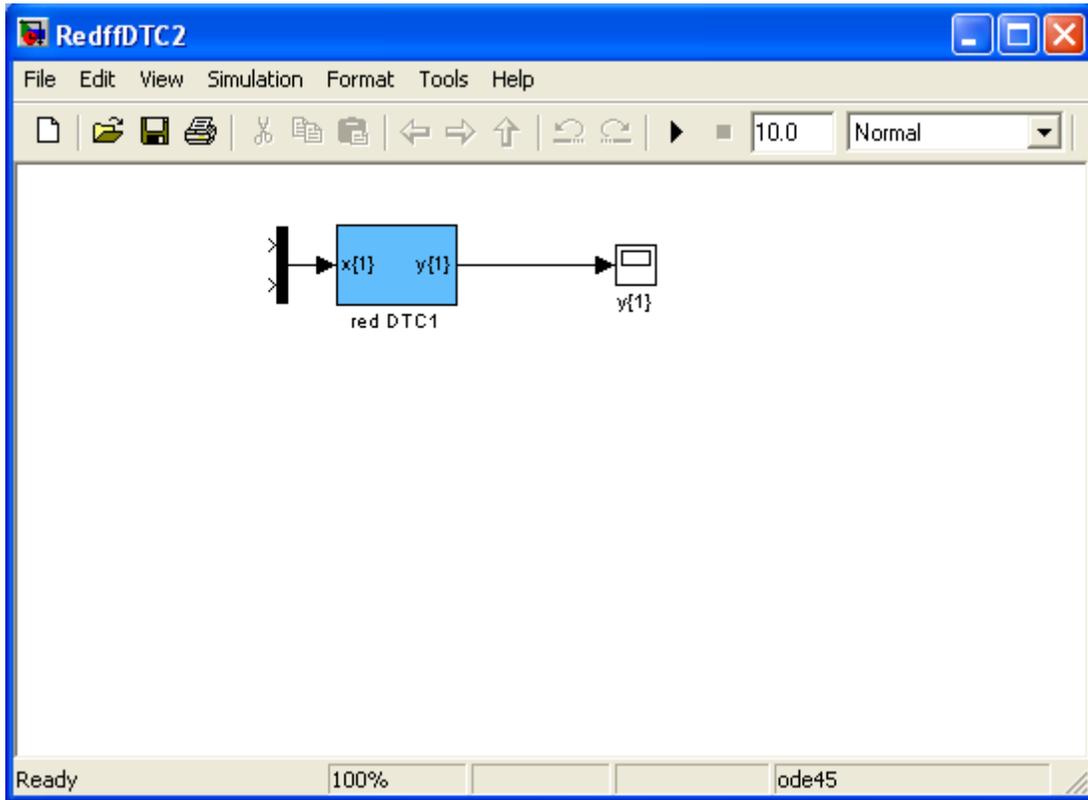
### Anexo 4 Circuito para general datos utilizados para entrenar la red.







**Anexo 6** Modelo de la red neuronal obtenida lista para aplicar al esquema con DTC.



**Anexo 7** Tabla del comportamiento de la tensión en los días estudiados

Hora	Día # 1	Día # 2	Día # 3	Día # 4	Día # 5	Día # 6	Día # 7	Día # 8	Día # 9	Día # 10
7:00 AM	398.3	398.3	398.5	340.4	354.6	354.5	354.4	354.9	358.7	391.5
8:00 AM	398.7	397.9	398.8	339.2	354.8	354.3	354.8	354.4	358.9	392.8
9:00 AM	399.5	398.6	0,00	340.3	354.4	354.7	354.6	355.7	357.8	392.9
10:00 AM	400	398.3	474.5	340.5	354.6	355.6	354.9	354.4	358.4	390.9
11:00 AM	401.8	398.7	475.4	340.2	355.3	354.5	355.3	355.3	356.9	392.4
12:00 PM	400.7	398.5	475.3	340.6	355.7	354.4	356.4	355.8	356.7	395.1
1:00 PM	399.3	398.2	474.8	340.9	354.5	655.9	356.6	355.4	358.2	390.6
2:00 PM	398.2	398.7	474.4	340.4	356.6	354.7	356.1	355.5	358.8	392.8
3:00 PM	398.9	398.2	371.6	340.5	356.9	355.4	353.3	354.9	357.5	392.6
4:00 PM	399.1	399.1	341.3	340.8	355.8	355.1	355.9	354.7	357.3	391
5:00 PM	398.4	398.6	341.9	340.3	354.7	354.2	356	354.9	357.8	391.8

**Anexo 8** Tabla del comportamiento de la corriente de carga en los días estudiados

Hora	Día # 1	Día # 2	Día # 3	Día # 4	Día # 5	Día # 6	Día # 7	Día # 8	Día # 9	Día # 10
7:00 AM	57.9	47.9	50.4	50.4	46.8	50.2	49.2	43.8	46.7	45.6
8:00 AM	48.8	56.8	49.5	51.5	46.2	47.6	44.8	44.3	46.9	54.4
9:00 AM	56.7	59.4	0,00	50.5	44.9	46.7	45.3	31.9	45.6	44.8
10:00 AM	61.3	55.3	54.6	51.2	45.8	45.9	47.4	45.6	46.1	52.1
11:00 AM	66.2	57.9	55.1	52	44.5	47.7	37.9	48.1	30.2	50.7
12:00 PM	57.3	49.6	55.8	50.8	43.8	46.8	25.8	42.3	28.9	49.8
1:00 PM	50.8	51.3	56.2	48.9	42.3	45.5	25.4	44.7	45.9	51.5
2:00 PM	64.3	59.6	54.8	52.7	26.9	44	25.7	43.3	46.3	53.2
3:00 PM	58.4	49.9	34.9	23.1	30.2	47.1	26.2	42.4	44.5	50.6
4:00 PM	61.2	56.7	34.6	49.1	29.9	45.3	25.9	43.5	45.1	51.5
5:00 PM	57.9	54.8	29.9	58.9	31.3	46.8	25.7	44.4	45	51.7

**Anexo 9** Tabla del comportamiento de la frecuencia de referencia en los días estudiados

Hora	Día # 1	Día # 2	Día # 3	Día # 4	Día # 5	Día # 6	Día # 7	Día # 8	Día # 9	Día # 10
7:00 AM	52.32	52.32	52.32	44.74	46.55	46.55	46.55	46.55	46.91	51.5
8:00 AM	52.32	52.32	52.32	44.74	46.55	46.55	46.55	46.55	46.91	51.5
9:00 AM	52.32	52.32	45.73	44.74	46.55	46.58	46.55	46.55	46.91	51.5
10:00 AM	52.32	52.32	60	44.74	46.55	46.58	46.58	46.55	46.91	51.5
11:00 AM	52.32	52.32	60	44.74	46.61	46.58	46.58	46.61	46.91	51.5
12:00 PM	52.35	52.35	60	44.77	46.61	46.64	46.64	46.61	46.85	51.54
1:00 PM	52.35	52.35	60	44.74	46.64	46.61	46.61	46.64	46.85	51.54
2:00 PM	52.35	52.35	60	44.74	46.58	46.64	46.61	46.64	46.85	51.53
3:00 PM	52.35	52.35	44.74	44.77	46.58	46.64	46.61	46.64	46.85	51.53
4:00 PM	52.35	52.35	44.77	44.77	46.58	46.64	46.6	46.61	46.85	51.54
5:00 PM	52.35	52.35	44.77	44.77	46.58	46.61	46.6	46.61	46.85	51.54

**Anexo 10** Tabla del comportamiento de la frecuencia de salida en los días estudiados

Hora	Día # 1	Día # 2	Día # 3	Día # 4	Día # 5	Día # 6	Día # 7	Día # 8	Día # 9	Día # 10
7:00 AM	52,76	52,78	52,69	45,19	46,91	46,98	46,93	46,87	46,98	51,88
8:00 AM	52,68	52,75	52,56	45,17	46,87	46,89	46,84	46,88	46,95	51,94
9:00 AM	52,7	52,6	0,00	45,12	46,9	46,9	46,92	46,76	46,97	51,78
10:00 AM	52,82	52,67	59,95	45,16	46,98	46,97	46,98	46,8	46,92	51,8
11:00 AM	52,71	52,83	59,98	45,13	46,93	46,94	46,84	46,98	47	51,85
12:00 PM	52,88	52,71	59,91	45,18	46,95	46,95	46,75	46,96	46,97	51,9
1:00 PM	52,81	52,64	59,84	45,12	46,9	46,93	46,71	46,93	46,91	51,92
2:00 PM	52,7	52,75	59,93	45,18	51,65	47,98	46,78	46,91	46,98	51,89
3:00 PM	52,86	52,69	45,98	45,15	50,71	47,91	46,72	46,89	46,94	51,86
4:00 PM	52,75	52,84	44,91	45,11	50,55	47,89	46,8	46,86	46,89	51,88
5:00 PM	52,8	52,63	44,95	45,18	50,7	47,95	47,1	46,9	46,96	51,93

**Anexo 11** Tabla del comportamiento de la potencia activa en los días estudiados

Hora	Día # 1	Día # 2	Día # 3	Día # 4	Día # 5	Día # 6	Día # 7	Día # 8	Día # 9	Día # 10
7:00 AM	22,5	19,8	17,6	15,3	14,2	15,4	15,2	13,5	15,2	15,4
8:00 AM	22,5	18,3	18,1	15,5	14,8	14,6	14,1	13,3	15,6	18,2
9:00 AM	21,9	20,5	0,00	16	13,8	14,5	14,5	8,4	14,9	18,6
10:00 AM	23,9	17,8	43,7	15,6	13,9	14,2	14	14,2	13,8	18,5
11:00 AM	21,3	19,7	45,7	15,7	14,1	14,6	11,2	14,6	13,3	18,3
12:00 PM	19,8	20,2	44,8	15,6	13,8	14,2	5,8	14,2	15,1	17,8
1:00 PM	21,8	19,4	45,5	14,4	13,2	14,4	5,7	13,7	14,7	18,1
2:00 PM	18,4	18,6	44,3	15,9	5,7	14,1	6	14	14,9	18,5
3:00 PM	20,5	17,8	9,5	16,1	8,9	14,6	5,6	13,9	13,6	18,8
4:00 PM	22,3	18,8	9,3	14,8	10,8	15,2	7,5	13,3	14,7	17,9
5:00 PM	19,7	18,2	7,4	16,1	10,9	15,4	7,1	13,4	14,8	18,7

**Anexo 12** Tabla del comportamiento del torque electromagnético en los días estudiados

Hora	Día # 1	Día # 2	Día # 3	Día # 4	Día # 5	Día # 6	Día # 7	Día # 8	Día # 9	Día # 10
7:00 AM	34	27,3	26,5	27,4	23,6	26,6	25,6	22,7	25,6	23,7
8:00 AM	22,5	23,7	27,7	27,3	25	25,3	23,5	23,6	24,1	28,5
9:00 AM	21,9	29,4	0,00	28,5	23,9	24,1	24,9	14,3	24,3	27,2
10:00 AM	23,9	24,5	61,5	28	24	24,6	24,4	24,8	22	28,8
11:00 AM	21,3	29,5	61,8	27,8	23,7	25,1	19,2	25,1	23,8	26,6
12:00 PM	19,8	26,8	59,6	27,4	22,1	24,3	10,2	22,7	24,6	26,9
1:00 PM	21,8	29,6	60,4	25,5	24,8	24,8	9,4	23,1	23,5	28
2:00 PM	18,4	27,8	59,8	27,6	9,8	24,3	10,5	23,5	24,1	29,1
3:00 PM	20,5	29,4	17,8	28,1	12,3	25,8	10,8	23,3	22,9	28,6
4:00 PM	22,3	28,7	15,9	25,6	16,8	24,9	10,6	22,5	23,7	27,7
5:00 PM	19,7	27,5	12,6	28,4	17	25,2	10,4	24,1	23,9	28,5

**Anexo 13** Tabla del comportamiento del consumo energético en los días estudiados

Hora	Día # 1	Día # 2	Día # 3	Día # 4	Día # 5	Día # 6	Día # 7	Día # 8	Día # 9	Día # 10
7:00 AM	614,1	61,2	472,1	945,4	286,4	638	956,1	255,9	591	54,2
8:00 AM	630,1	73,8	490,1	954,8	311,8	649	968,5	269,4	605,8	68,4
9:00 AM	652,3	86,3	499,61	969,7	327,2	662,9	981,5	283,3	620,8	83,5
10:00 AM	667,7	102,7	513,2	984,5	340,3	678	996,2	297,8	634,7	98,4
11:00 AM	683,7	122,8	556	999,5	353,3	691,6	8,3	312,6	648,8	113,4
12:00 PM	708,8	141	597,8	17,4	368,5	707	19,1	325,7	664,2	128,8
1:00 PM	721,9	159,2	643,1	30,4	383,8	722,4	25,5	338,9	678	142,9
2:00 PM	749,6	172,7	686,5	45,5	392,8	735,7	33,8	352,4	692,5	158,7
3:00 PM	764,5	197,9	716,7	60,5	403	748,9	42,9	365,3	706,6	172,5
4:00 PM	776,6	209,9	141	74,8	416,4	762,5	52,9	378,9	721,3	186,8
5:00 PM	781,8	224,1	758,1	91	431,5	777,6	61,6	392,9	736,2	202,2



**Anexo 14** Tabla del comportamiento de la densidad en los días estudiados.

Hora	Día # 1	Día # 2	Día # 3	Día # 4	Día # 5	Día # 6	Día # 7	Día # 8	Día # 9	Día # 10
7:00 AM	1800	1740	1770	1770	1750	1680	1800	1750	1800	1700
8:00 AM	1800	1740	1770	1770	1750	1680	1800	1750	1800	1700
9:00 AM	1700	1760	1720	1700	1750	1700	1800	1750	1780	1750
10:00 AM	1700	1760	1720	1700	1750	1700	1800	1750	1780	1750
11:00 AM	1770	1750	1700	1800	1760	1700	1700	1750	1780	1750
12:00 PM	1770	1750	1700	1800	1760	1700	1700	1750	1780	1750
1:00 PM	1820	1750	1700	1700	1770	1750	1680	1750	1780	1680
2:00 PM	1820	1750	1700	1700	1770	1750	1680	1750	1780	1680
3:00 PM	1800	1760	1700	1770	1750	1680	1700	1800	1700	1700
4:00 PM	1800	1760	1700	1770	1750	1680	1700	1800	1700	1700
5:00 PM	1780	1750	1700	1800	1750	1700	1750	1780	1700	1700