

# DISEÑO Y CONSTRUCCION DE UN CONTROL DE VELOCIDAD PARA UN MOTOR DE INDUCCION DE ROTOR DEVANADO APROVECHANDO LA ENERGIA DE DESLIZAMIENTO.

Jaramillo P. Fabián, Ing.  
Torres P. Fabián, Ing.  
Torres P. Luis, Ing.

UNIVERSIDAD DE CUENCA  
CUENCA - ECUADOR

## RESUMEN

El trabajo hace referencia a los resultados del diseño y construcción de un equipo didáctico modular de un controlador de velocidad para motores de inducción de rotor devanado, conocido como Sistema Recuperador de la Energía de Deslizamiento.

El diseño del Sistema de Control es basado en los métodos de modelación de la máquina y los convertidores estáticos. Por último, se hace una evaluación del equipo a partir de los resultados obtenidos a través de las pruebas realizadas.

Cabe señalar que en este trabajo no se considera el comportamiento dinámico de la máquina.

## ABSTRACT

This work is referred to the design and construction results of a modular and didactic equipment for controlling the speed of wound rotor induction motors, which is known as Slip Energy Recovery System.

The Control System design is based on modeling methods of induction machine and solid state converters. Finally, the equipment is evaluated through the results of the tests made so far.

It is important to mention that the present work did not consider the dynamic behavior of the machine.

## INTRODUCCION

La mayoría de las máquinas eléctricas utilizadas especialmente como motores, han llegado a convertirse en parte primordial de los procesos industriales y puesto que en algunos casos se requiere realizar trabajos específicos que exigen mantener su velocidad constante pese a variaciones que puedan presentarse debido a cambios en la carga o a variaciones de voltaje en la red de alimentación, se recurre a diversos sistemas de control de velocidad.

Tradicionalmente la mayor parte de los problemas de regulación de velocidad de los motores eléctricos han sido resueltos mediante el motor de corriente continua que posee excelentes condiciones para ello. Sin embargo, comparado con el motor de corriente alterna, presenta las desventajas de mayor tamaño, precio y complicación constructiva del colector de delgas, que a veces plantea serios problemas de explotación y mantenimiento.

Hasta la aparición de los semiconductores de potencia, la regulación de velocidad en los motores de C.A. no había tenido más que un éxito precario, consiguiéndose la regulación mediante el control de tensión de entrada al estator, por reactancias saturables o autotransformador variable, así como también el cambio de deslizamiento incluyendo resistencias externas

en el circuito del rotor o por medio de aplicación de voltajes a fin de convertir la potencia de deslizamiento a una forma útil.

Para el caso de conectar resistencias a los circuitos del rotor se consigue regular la velocidad del motor pero a costa de un derroche de energía ya que la potencia que cruza el entrehierro es disipada en las bobinas del rotor y en las resistencias externas. Las pérdidas de potencia pueden recuperarse en un buen porcentaje a través del Sistema Recuperador de Energía de Deslizamiento (SRED), que consta de un equipo estático de regulación formado por un rectificador y un inversor.

El presente trabajo tiene como finalidad el incentivar el uso de este sistema en el campo del control y automatismo industrial para de esta manera marchar acorde con el avance tecnológico e implementar nuevos y mejorados procedimientos de regulación de las máquinas eléctricas, con el fin de reducir costos y optimizar el rendimiento de estos procesos de control.

## MÉTODOS DE CONTROL DE LA VELOCIDAD DE LOS MOTORES DE INDUCCION

Para un motor de inducción con un número de polos "P", con una frecuencia "f" y un deslizamiento "s", la velocidad del viene dada por la expresión:

$$N_r = (1-s) \cdot 120 \frac{f}{P} \text{ [RPM]}$$

De la ecuación anterior se puede deducir que existen tres métodos básicos para el control de la velocidad, éstos son controlando: el número de polos "P", la frecuencia "f" y el deslizamiento "s", el último de los cuales fue el empleado en este trabajo.

Los primeros esquemas de control que aprovecharon la energía de deslizamiento para la regulación de la velocidad de los motores de inducción de rotor devanado, aparecieron en el año de 1906 y fueron conocidos como sistemas KRAMER, el cual consistía en extraer la potencia eléctrica a frecuencia de deslizamiento desde los terminales del rotor, la misma que es convertida en potencia mecánica por un motor auxiliar de corriente continua acoplado mecánicamente al eje del motor de inducción (MI) y que suple la potencia de salida del mismo (Figura 1). Este sistema es un recuperador mecánico.

En el mismo año se ideó un recuperador eléctrico conocido como sistema SCHERBIUS; en el que los circuitos del rotor del MI se conectan a un aparato auxiliar cambiador de frecuencia representado por CF en la Figura 2, en el que la potencia eléctrica a frecuencia de deslizamiento generado en el rotor del motor principal se convierte a la frecuencia de entrada y se restituye a la línea [1].

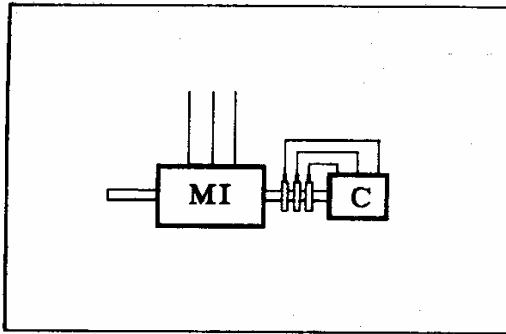


Fig. 1.- Sistema Kramer

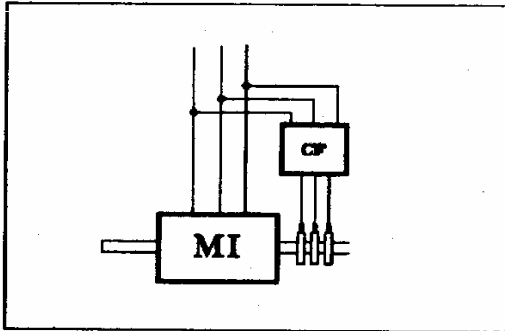


Fig. 2.- Sistema Scherblus

Los esquemas mencionados anteriormente utilizaban dispositivos auxiliares que consistía en un sistema relativamente complicado de máquinas rotativas, transformadores de relación variable y conmutadores de motores ac. y dc.

En el año de 1960, con la aparición de los semiconductores de potencia en el campo de la electrónica se ha conseguido reemplazar a la mayoría de los dispositivos anteriores, utilizando rectificadores e inversores. Desde entonces al esquema Scherblus estático se lo denomina Sistema Recuperador de Energía de Deslizamiento (SRED).

#### SISTEMA RECUPERADOR DE ENERGIA DE DESLIZAMIENTO

La teoría de Ejes Referenciales, ha sido utilizada para analizar y predecir el funcionamiento en régimen permanente del SRED. Los resultados de las ecuaciones son utilizados para el dimensionamiento del circuito de potencia del sistema. En el análisis matemático de las ecuaciones del sistema se han despreciado los efectos de la conmutación y los armónicos de los circuitos convertidores. Este trabajo está dirigido más al análisis del diseño del control electrónico de velocidad. El dimensionamiento de estos circuitos depende de la potencia del motor y del rango de velocidad a regularse. El SRED, ha utilizado como señal de realimentación una señal de velocidad pudiéndose también incluir una señal de corriente. En motores en los cuales la relación de espiras del estator y del rotor no es la unidad, se puede utilizar un transformador a la salida del circuito inversor para compensar esta relación y de ésta manera conseguir velocidades de regulación cercanas a la sincrónica.

En la figura 3, se puede observar la configuración del circuito del SRED considerado

en este trabajo.

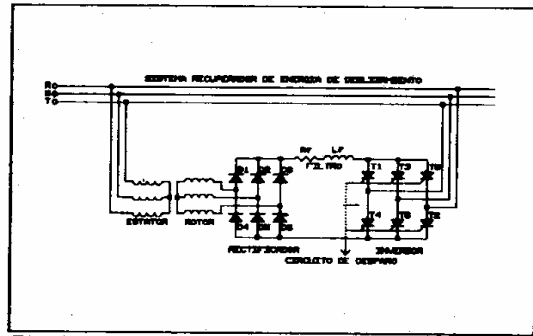


Fig. 3.- SISTEMA RECUPERADOR DE ENERGIA DE DESLIZAMIENTO.

#### COMPONENTES DEL CONTROL DE VELOCIDAD.

Se ha hecho una clasificación en dos grupos; el primero que se lo llamará sistema de fuerza, en el cual se considera el motor, el sistema de arranque que se utilizó, así como también lo que es el sistema de rectificación, inversión y filtrado. Al segundo grupo de componentes se lo especificará como Sistema de Control, en el cual se incluyen: El circuito de disparo, circuito de generación de impulsos, circuito de inhibición y circuito de realimentación. A continuación se hará una breve explicación del funcionamiento de cada uno de los componentes que integran los grupos antes mencionados.

#### COMPONENTES DEL SISTEMA DE FUERZA.

Según el modelo matemático de las ecuaciones de la máquina de inducción en un eje de referencia rotando sincrónicamente se obtuvo las curvas características del funcionamiento y se establecieron valores que permitan realizar el diseño y construcción del SRED.

El motor de inducción que se utilizó en la construcción del Sistema Recuperador de Energía de Deslizamiento tiene las siguientes características:

Potencia	=	0.5 HP
Número de Fases	=	3
Tensión línea-línea	=	208 V.
Frecuencia	=	60 Hz
Número de polos	=	4
Velocidad Sincrónica	=	1800 rpm

A continuación se presenta los parámetros de la máquina de inducción de rotor devanado obtenidos a partir de pruebas realizadas en laboratorio, que son: medición de la resistencia del estator, prueba de rotor bloqueado, prueba en vacío; recomendado por el standar 112 de ANSI/IEEE1978.

PARAMETROS DEL MOTOR DE INDUCCION		
	ohms	p.u.
rs	7.369	0.0567
Xls	13.449	0.1036
rr	4.009	0.0309
Xlr	13.449	0.1036
Xm	98.442	0.7585
a	1.51	

En la figura 4 se presenta la corriente de enlace Idc, entre el inversor y el rectificador versus la velocidad para el motor en mención.

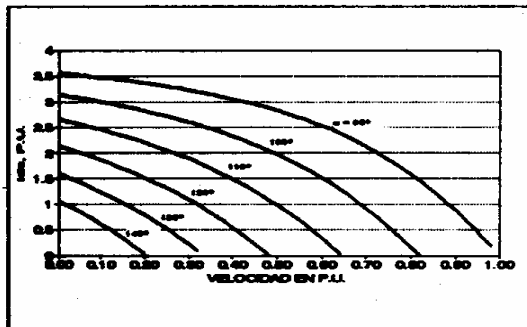


Fig. 4.- CORRIENTE Idc VERSUS VELOCIDAD

**CIRCUITO RECTIFICADOR.**

Las características que presenta el rectificador utilizado para este trabajo son las siguientes:

- El rectificador es de onda completa o puente trifásico.
- El tipo de rectificador es no controlado, es decir, utiliza tan sólo diodos pues en el Sistema de Recuperación de Energía de Deslizamiento el flujo de potencia se lo realiza desde los devanados del rotor por medio del rectificador y el inversor hacia la red en forma unidireccional.
- No existe circuito de mando.
- La confiabilidad y simplicidad de estos dispositivos es mayor.
- La conducción es en forma natural, lo que implica que cada diodo conduce un ángulo de  $2\pi/3$ .

En la figura 5 Se puede observar la configuración de este tipo de rectificador.

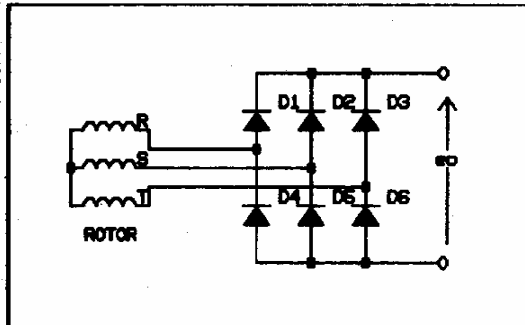


Fig. 5.- RECTIFICADOR TRIFASICO DE ONDA COMPLETA TIPO PUENTE.

Según la figura 4, se puede observar que la máxima corriente continua que deberán conducir los diodos será de 3.61 en p.u.; es decir 7.54 AMPERIOS; por tanto para la construcción será necesario por lo menos de diodos de 12 A, pero como económicamente es más rentable el emplear puentes monofásicos integrados, en la construcción se utilizó dos del tipo ECG5318.

**CIRCUITO INVERSOR.**

A continuación se especifica las características que deberá tener el inversor que se empleó en la

ejecución de este trabajo:

- El inversor es del tipo no autónomo debido a que la salida está conectada a la fuente principal de alimentación del motor de inducción.
- Puesto que el inversor es no autónomo, la forma de onda de salida seguirá la forma de onda de la fuente, es decir será senoidal y será capaz de mantener su forma mientras se absorbe la potencia del motor de inducción a través del rotor.
- La conmutación de este inversor es natural.
- Se puede controlar al inversor de tal manera que cada SCR conduzca  $120^\circ$ .

A continuación en la figura 6 se muestra el circuito inversor tipo puente que se empleará en el presente trabajo.

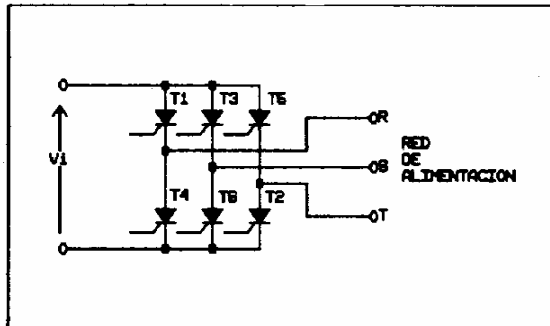


Fig. 6.- CIRCUITO INVERSOR NO AUTONOMO

Al igual que para el dimensionamiento de los diodos, la corriente para dimensionar los SCR's es de 7.54 Amperios, por lo cual para la ejecución del trabajo se utilizó tiristores del tipo MCR 221-6.

**CIRCUITO FILTRO.**

El objetivo de utilizar el filtro, que no es más que un inductor, "choke" o reactor, es el de atenuar el rizado de la corriente a la salida del circuito rectificador. A continuación se pone en consideración las ecuaciones que rigen el funcionamiento del inductor para determinar las características del mismo.

- En primer lugar se debe determinar la máxima corriente que circulará por el inductor, que será la que atraviesa, tanto por el rectificador como por el inversor y es igual a 7.54 Amperios.
- A continuación, se determina el valor de inductancia crítica. Para ello se deberá determinar, para algunos ángulos de disparo, la corriente transferida desde el rectificador hacia el inversor; que está determinada por la diferencia de tensiones a los extremos del inductor, es decir:

$$i_L = \frac{1}{L} \int v_L(t) dt$$

$v_L$  = Tensión en el inductor.  
 $i_L$  = Corriente a través del inductor.

donde  $v_L$  será:

$$v_L = V_{m\acute{a}x} [\text{Sen}(wt - 120^\circ)] - 3 \cdot \frac{\sqrt{3}}{\pi} V_{m\acute{a}x} \text{Cos}\alpha$$

A partir de las ecuaciones anteriores se determina la corriente máxima y corriente media para el inductor; y considerando una amplitud de

ondulación de 0.2, que es un valor de rizado aceptable, se determina la inductancia.

$$\delta i = i_{max} - i_{med}$$

Con el procedimiento antes mencionado se determina la inductancia para ángulos de: 90°, 120°, 135°, 150°, es decir:

$$\alpha = 90^\circ \quad L = 9.70 \text{ mH}$$

$$\alpha = 120^\circ \quad L = 32.96 \text{ mH}$$

$$\alpha = 135^\circ \quad L = 38.86 \text{ mH}$$

$$\alpha = 150^\circ \quad L = 28.68 \text{ mH}$$

Por tanto la inductancia requerida es de 39 mH.

#### SISTEMA DE ARRANQUE.

El sistema de arranque consiste de un equipo convencional que conecta resistencias a los devanados del rotor, las mismas que se desactivarán en el instante que se alcanza el rango de control para el cual está diseñado el sistema, y por medio de un control mediante contactores se conectará los devanados del rotor al convertidor. El sistema de control y fuerza del arranque del motor de inducción se muestra en las figuras 7 Y 8 respectivamente.

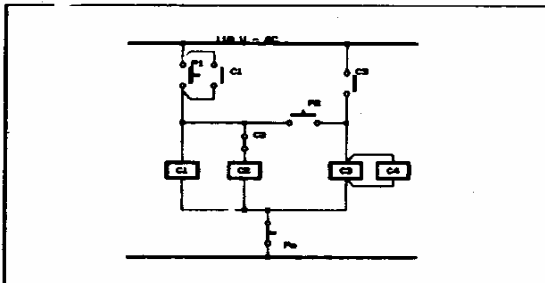


Fig. 7.- CIRCUITO DE CONTROL DEL SISTEMA DE ARRANQUE DEL MOTOR DE INDUCCION

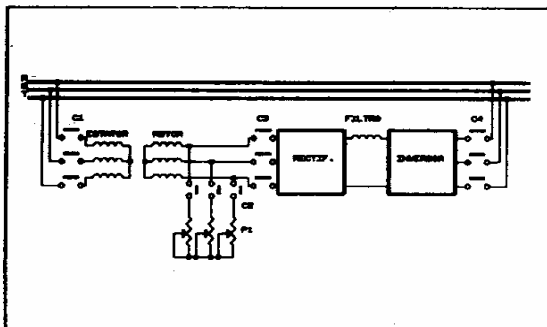


Fig. 8.- CIRCUITO DE FUERZA DEL SISTEMA DE ARRANQUE DEL MOTOR DE INDUCCION.

Si se considera las figuras anteriores se puede observar que al pulsar P1 se activan los contactores C1 y C2, de esta manera comienza a funcionar el motor en el sistema convencional; es decir, con resistencias conectadas en estrella a los devanados del rotor; una vez que se logre el rango de control del motor de inducción se presionará el pulsante P2, de manera que energiza los contactores C3 y C4 y desenergiza C2, con esto se logra conectar el

sistema convertidor y desconectar las resistencias y el motor de inducción funcionará a través del recuperador de energía.

#### COMPONENTES DEL SISTEMA DE CONTROL.

##### Circuito de Disparo.

En la figura 9, se representa a manera de diagrama de bloques el funcionamiento del circuito de disparo. Se procederá a continuación a describir el diseño propuesto para cada una de estas etapas.

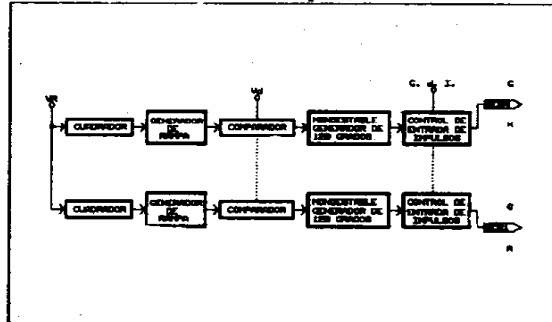


Fig. 9.- DIAGRAMA DE BLOQUES PARA EL CIRCUITO DE DISPARO.

##### PRIMERA ETAPA

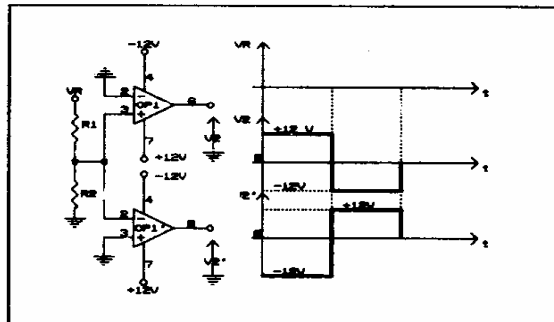


Fig. 10.- DETECTOR DE CRUCE POR CERO DE LA RED.

En la figura 10 se puede observar que el circuito representa dos detectores de cruce por cero, uno inversor y otro no inversor, es por ello que se obtiene tensiones defasadas 180° a la salida de cada uno de los operacionales, esto con el fin de realizar el control de fase tanto para el semiciclo positivo como para el semiciclo negativo.

Las señales de entrada (R-S-T) son obtenidas de la red de alimentación a través de un transformador de sincronización, el mismo que consta de un pequeño banco de transformadores monofásicos de relación 120/12 Voltios, conectados en YY, de manera que las señales de entrada este en fase con las señales de salida del banco de transformadores.

##### SEGUNDA ETAPA

Esta etapa cumple la función de un circuito integrador y su funcionamiento es el siguiente: Cuando la tensión V2 sube a un valor de +Vcc (tensión de saturación del operacional), el diodo D2 conduce y el capacitor C1 se carga a través de las resistencias R3, R4, R5 y P1. Con

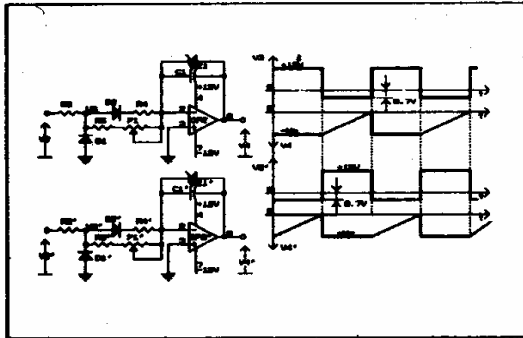


Fig. 11.- CIRCUITO GENERADOR DE RAMPA.

el fin de que la constante de tiempo de carga, sea reducida, es decir el condensador se cargue muy rápidamente, el valor de la resistencia equivalente deberá ser muy pequeña. El diodo Zener Z1, limita la tensión de carga del condensador, a un valor negativo establecido por la tensión del zener.

Cuando la tensión V2 se hace igual a - Vcc, conduce el diodo D1 el cual elimina la componente negativa proporcionada por V2, por lo tanto la tensión que existirá en V3 será aproximadamente - 0.7 V, en este momento el condensador se descarga a través del potenciómetro P1 y la resistencia R5. La constante de tiempo estará regida por la resistencia R5 y P1 el cual se utiliza para que la rampa llegue a cero voltios, consiguiéndose de esta manera una rampa sincronizada con la red.

#### TERCERA ETAPA

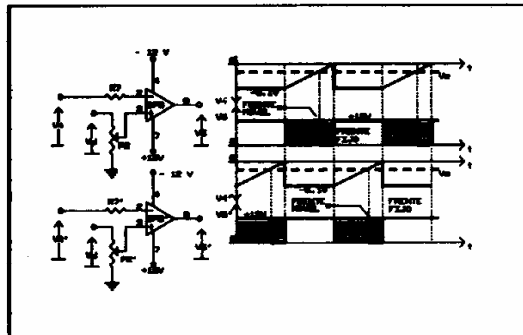


Fig. 12.- CIRCUITO COMPARADOR DE NIVEL.

El amplificador operacional trabaja como un comparador de nivel; la comparación se la hace entre el voltaje V4 que alimenta a la entrada inversora, y el voltaje Vd es el que determina el frente de onda a la salida del operacional.

#### CUARTA ETAPA

En la figura 13, se puede apreciar las configuraciones que se adoptaron para obtener las tensiones de ventana y poder controlar la apertura o cierre del transistor de la siguiente etapa. Cabe señalar que los elementos R8, C2 y R8', C2', se dimensionaron de manera que se obtenga a la salida del temporizador un pulso con duración de 5.5 mseg. es decir 120°:

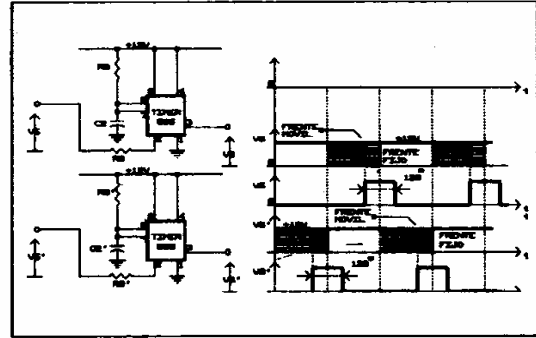


Fig. 13.- Operación Monoestable para fijar la señal de disparo durante 120° de conducción de los SCR's.

$$1.1 \cdot R_8 \cdot C_2 = 1.1 \cdot R_8' \cdot C_2' = 5.5 \text{ mseg.}$$

#### QUINTA ETAPA

En las figuras 14 y 15, se puede apreciar el circuito que constituye esta etapa. Al colector del transistor T1 se inyecta impulsos provenientes del "timer" 555. En la base del transistor ingresa una tensión de ventana V6; el transistor se cierra y pasan los impulsos a través del transformador a las compuertas de los tiristores. El transistor actúa como un interruptor estático dejando pasar los impulsos dependiendo de la tensión de ventana V6. La resistencia conectada a la salida de los transformadores de impulso son con el fin de evitar falsos disparos y por lo general se dimensionan con una valor de 1 kΩ.

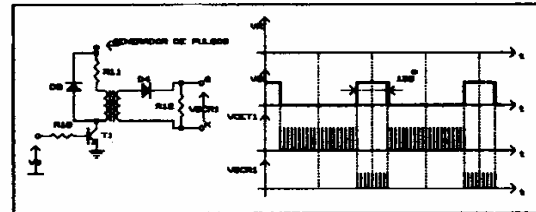


Fig. 14.- CIRCUITO DE CONTROL DE ENTRADA DE IMPULSOS, SEMICICLO NEGATIVO.

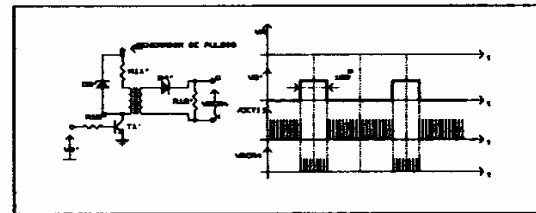


Fig. 15.- CIRCUITO DE CONTROL DE ENTRADA DE IMPULSOS, SEMICICLO POSITIVO.

#### CIRCUITO GENERADOR DE IMPULSOS.

En la siguiente figura se puede observar la configuración del circuito generador de impulsos, que no es más que un circuito temporizador 555 funcionando en operación estable. Dependiendo del tiempo necesario para asegurar que el tiristor seleccionado se dispare, se deberá establecer los valores de R1, R2 y C1.

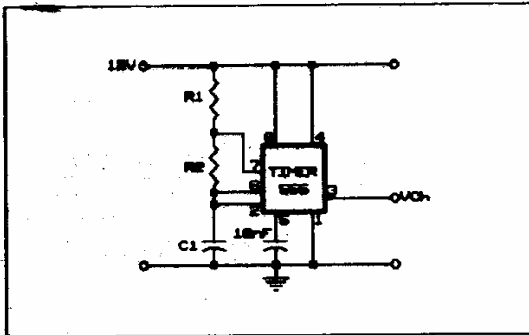


Fig. 16. - GENERADOR DE IMPULSOS.

**CIRCUITO DE INHIBICION.**

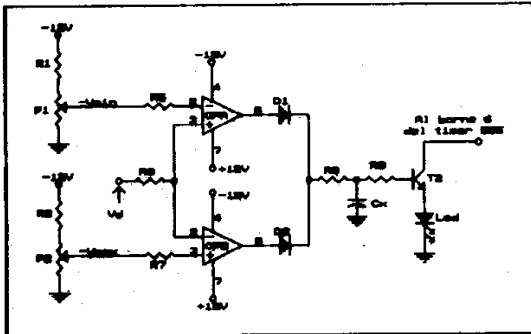


Fig. 17. - CIRCUITO DE INHIBICION.

Este circuito se lo emplea con el fin de controlar que el sistema de regulación opere en el rango establecido de velocidad; para ello disponemos de la referencia de tensión máxima (-V<sub>máx</sub>) y tensión mínima (-V<sub>mín</sub>); la señal de entrada será la tensión V<sub>d</sub>, que controla el ángulo de disparo de los tiristores proporcionada por el circuito de realimentación. La tensión -V<sub>máx</sub> se la calibra a través de potenciómetro P2 y la tensión -V<sub>mín</sub> a través de P1, de tal manera que para cualquier tensión que esté entre los valores (-V<sub>mín</sub>, -V<sub>máx</sub>), la tensión a la salida de OPA y OPB sean negativas de manera que no se produce la inhibición; caso contrario la señal de salida de uno de los operacionales, dependiendo del límite que se supere, será de +12 Vdc, la misma que saturará al transistor T2 e inhibirá el circuito generador de impulsos, dando como resultado que los SCR's del inversor no conduzcan.

**CIRCUITO DE REALIMENTACION.**

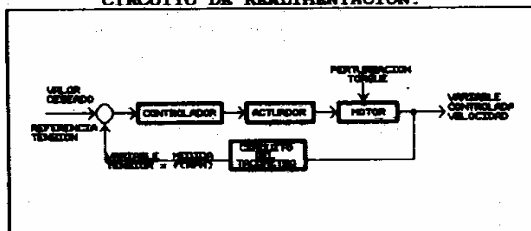


Fig. 18. - DIAGRAMA DE BLOQUES DEL CIRCUITO DE REALIMENTACION.

En la figura 18 se presenta un diagrama de bloques simplificado del sistema en estudio. Como se puede observar, al aplicar al motor una carga TL, la velocidad del motor N comienza a reducirse. Este cambio de velocidad es captado por el circuito taquimétrico que genera un voltaje proporcional a dicho cambio. Un controlador opera sobre la diferencia entre la velocidad deseada del motor de inducción y la velocidad medida y proporciona una tensión a un actuador. El actuador en este caso es el circuito inversor que responderá a la tensión del controlador que determina el ángulo de disparo para regresar a la velocidad original.

**CIRCUITO TAQUIMETRICO.**

El circuito taquimétrico, como anteriormente se mencionó, tiene la finalidad de generar una tensión proporcional a la velocidad del motor de inducción. Este circuito consta de un Detector de Velocidad y un Conversor Velocidad-Tensión.

**Detector de Velocidad.**

En la figura 19 (A) se presenta la constitución física del detector de velocidad del motor, como se puede observar consta de un disco acoplado al rotor, el cual tiene 8 perforaciones, el disco pasa a través de un optoacoplador (NTE 3001), el mismo que consta de un diodo emisor de luz infrarroja y un fototransistor, de tal manera que cuando una perforación pasa a través de la superficie sensible del optoacoplador, la luz del diodo emisor polariza directamente al fototransistor y conduce, de tal manera que en el punto D se obtiene un BAJO; es decir, la caída de tensión en el fototransistor; caso contrario, cuando el disco bloquea el paso de la luz infrarroja, el punto D se presenta un ALTO, es decir +12 V. De esta manera se obtiene una forma de onda cuadrada con frecuencia proporcional a la velocidad del motor.

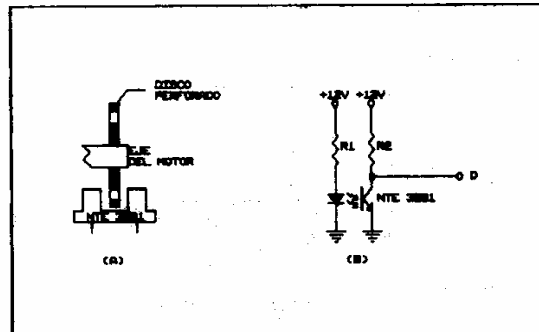


Fig. 19. - DETECTOR DE VELOCIDAD.

**Conversor Frecuencia-tensión.**

Se presenta un detector de frecuencias que puede emplearse como un comparador de frecuencias o bien como detector de diferencia de frecuencias. Considérese el circuito de la fig.20. Sea la señal  $v_r$  la señal de referencia, con una frecuencia de  $f_r$ , y sea  $v_i$  la señal de entrada con la frecuencia variable  $f_i$ . Cada una de estas señales dispara un solo pulso una vez cada ciclo. Estos pulsos únicos se ajustan de manera que el ancho y la amplitud de los pulsos en  $v_A$  y  $v_B$  sean idénticos (para una operación equilibrada). Las componentes R1 a R4, C2, C4 y el amplificador operacional forman un filtro pasabajas. El tren de pulsos en  $v_A$  se aplica a la entrada de inversión del filtro pasabajas a través de R1, y el tren de pulsos en  $v_B$  a la entrada de no inversión del filtro pasabajas a través de R3. Sea V la amplitud de  $v_A$  y de  $v_B$ ; es decir, la oscilación de los pulsos entre 0 y

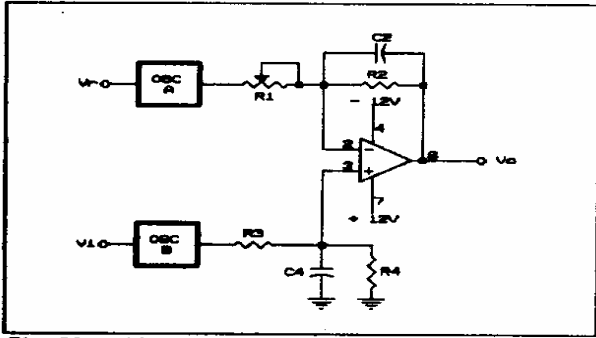


Fig. 20.- CONVERSOR DE FRECUENCIA.

V, y sean sus anchuras iguales a T; los valores promedio de  $v_A$  y  $v_B$  son:

$$v_{A_{prom}} = V \cdot T \cdot f_2$$

$$v_{B_{prom}} = V \cdot T \cdot f_1$$

Si  $R_1$  a  $R_4$  se eligen de modo que  $R_1 = R_2$  y  $R_3 = R_4$ , entonces se puede demostrar que la salida del filtro pasabajas está dada por:

$$v_o = V \cdot T \cdot (f_1 - f_2)$$

De este modo, si  $f_1 = f_2$  para un circuito equilibrado, la salida  $v_o = 0$ ; si  $v_o > 0$ , entonces  $f_1 > f_2$ ; si  $v_o < 0$ , entonces  $f_1 < f_2$ .

**CIRCUITO CONTROLADOR DEL ANGULO DE DISPARO.**

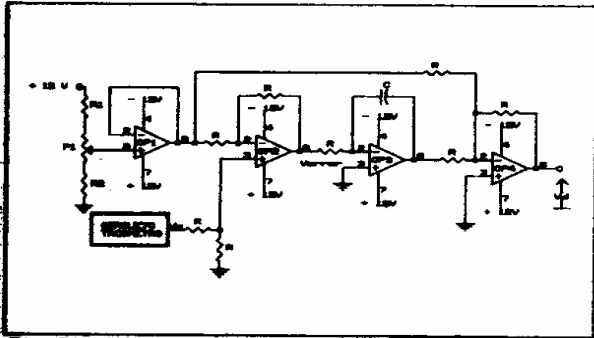


Fig. 21.- CIRCUITO CONTROLADOR DEL ANGULO DE DISPARO.

En primer lugar se dispone de un divisor de tensión formado por  $R_1$ ,  $R_2$  y  $P_1$ ; el potenciómetro  $P_1$  define la velocidad de referencia o deseada, las resistencias  $R_1$  y  $R_2$  fijan la velocidad mínima y máxima de operación del sistema. Con el fin de obtener una señal con baja impedancia de salida y no tener perturbaciones en la siguiente etapa se dispone un amplificador operacional OP1 como un seguidor de voltaje, obteniéndose a la salida una tensión de referencia VR. A continuación se hace la diferencia de la tensión proporcionada por el circuito taquimétrico  $V_m$  y la señal de referencia, a través del amplificador operacional OP2, de manera que a la salida de OP2 se obtiene una tensión de error, en el caso que no se estuviese operando a la velocidad deseada; esta tensión de error es integrada a través de OP3 y la señal de salida sumada nuevamente a la señal de referencia por medio

del amplificador operacional OP4; esto con el fin de cambiar el ángulo de disparo progresivamente hasta recobrar la velocidad de referencia. En la siguiente tabla se puede apreciar el comportamiento del circuito de realimentación.

CARGA	VELOCIDAD	Error	ANGULO DE DISPARO	RECUPERACION DE VELOCIDAD
NORMAL	DESEADA	CERO	ALPHA	-
SUBE	DISMINUYE	NEGATIVO	DISMINUYE	SUBE
BAJA	AUMENTA	POSITIVO	AUMENTA	BAJA

Si se aumenta la carga la velocidad tiende a disminuir por tanto aparece un error negativo, el mismo que hace una rectificación del ángulo de disparo de modo que éste disminuye obligando a que se aumente nuevamente la velocidad recuperandola a su valor inicial. Caso contrario; cuando existe una disminución de carga la velocidad del motor tiende a subir y aparece un error positivo que hace que aumente el ángulo de disparo y por tanto disminuya la velocidad a su valor inicial. Claro, como se explica aquí, la recuperación de la velocidad no será en un sólo paso sino que existirá una oscilación alrededor de la velocidad inicial hasta que nuevamente el voltaje de error sea cero.

**PRUEBAS Y RESULTADOS**

En primer lugar se realizó las pruebas del sistema de control en un "proto-board". Una vez determinado el buen funcionamiento del sistema se procedió a la construcción definitiva del equipo. En las fotografías que se presentan al final del documento se puede apreciar cada uno de los módulos constituyentes del sistema de control.

En la fig. 22 se representa la curva de comportamiento de la tensión proporcionada por el circuito taquimétrico  $V_m$  versus la velocidad del motor, como se puede apreciar es una curva prácticamente lineal objetivo al cual se pretendió llegar para obtener un buen control de la velocidad.

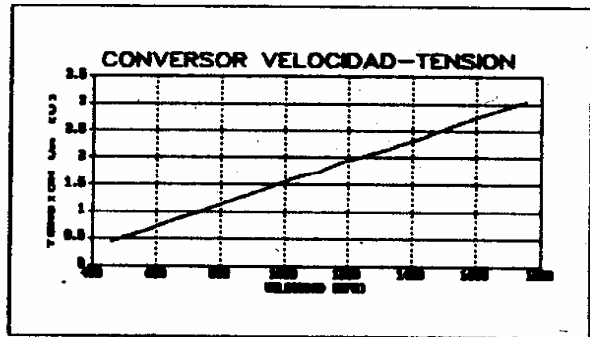


Fig. 22.- Tensión del Conversor  $V_m$  versus Velocidad.

En lo referente a la fijación del ángulo de disparo, en la figura 23, se puede observar los resultados obtenidos de la tensión de control  $V_d$  versus el ángulo de disparo, al igual que la curva anterior ésta es prácticamente lineal, por lo que se realiza más fácilmente el control.

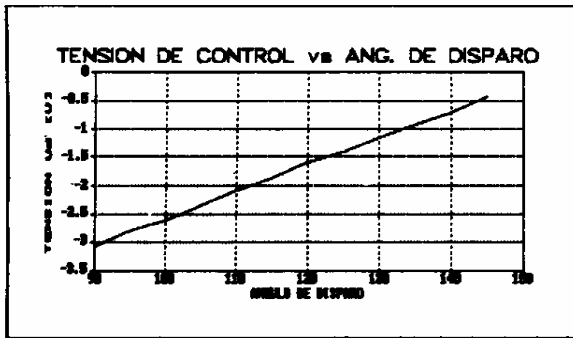


FIG. 23.- TENSION DE CTRL Vd vs ANG. DE DISPARO.

Los resultados fueron satisfactorios en lo referente al circuito inversor, puesto que se obtuvieron formas de onda prácticamente iguales a las presentadas en libros que tratan a cerca del tema. A continuación se presenta las formas de onda obtenidas para ángulos de disparo de 90, 120 y 150°. En la parte superior de cada una de las fotografías se representa la tensión de cátodo con respecto a ánodo de uno de los tiristores, y en la parte inferior la tensión de salida del circuito inversor.



FIG. 24.- TENSION DE SALIDA Y TENSION VSCR1 ANGULO DE DISPARO DE 90°.

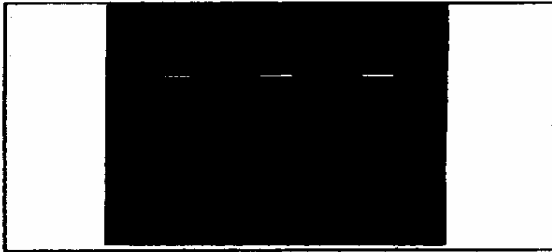


FIG. 25.- TENSION DE SALIDA Y TENSION VSCR1 ANGULO DE DISPARO DE 120°.



FIG. 26.- TENSION DE SALIDA Y TENSION VSCR1 ANGULO DE DISPARO DE 150°.

Una vez verificado el correcto funcionamiento de cada uno de los módulos componentes del SRED, se procedió a realizar pruebas en lazo abierto y en lazo cerrado.

Debido a que en lazo abierto no existe un control de velocidad propiamente dicho, puesto que al funcionar el sistema a una determinada velocidad a través de la fijación de determinado ángulo de disparo, al incrementar o disminuir carga, el motor responderá disminuyendo o incrementando respectivamente su velocidad. Es por ello que el rango de operación en ciclo abierto es limitado a través del control del ángulo de disparo. En éste trabajo se fijó el ángulo de disparo de manera que pueda variar desde los 95° a los 130°, para un satisfactorio funcionamiento del motor de inducción.

En la fig. 27 se representa la gráfica de velocidad vs ángulo de disparo, se puede observar que la velocidad es inversamente proporcional al ángulo de disparo, es decir, que a incrementos de ángulo de disparo se disminuye la velocidad, además se puede observar que la proporcionalidad es prácticamente lineal para distintos valores de carga.

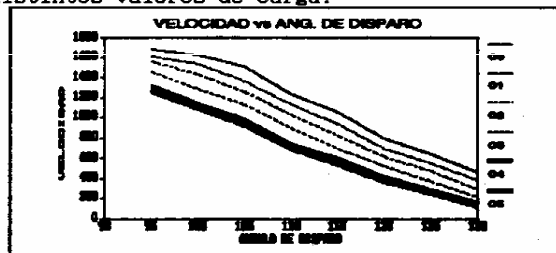


Figura 27

En el caso la curva velocidad versus carga fig.(28), se puede observar que el comportamiento de la velocidad es idéntico al caso anterior, puesto que la velocidad es inversamente proporcional a la carga; para incrementos de carga la velocidad disminuye. Se concluye por consiguiente que si bien existe una recuperación de energía, en lazo abierto, no se puede mantener constante la velocidad para variaciones de carga.

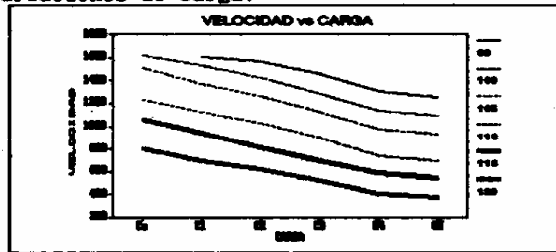


Figura 28

En las figuras 29 y 30, se puede apreciar el comportamiento de la corriente que se retorna a la red versus ángulo de disparo con carga constante y versus carga con ángulo de disparo constante, respectivamente. La corriente es inversamente proporcional al ángulo de disparo, esto es debido a que al incrementar el ángulo de disparo los tiristores permiten menos paso de potencia a la red. Lo contrario sucede al mantener el ángulo de disparo constante, es decir, la corriente proporcionada por el rotor es directamente proporcional a los incrementos de carga, siendo la pendiente mayor para ángulos de disparo menores, lo que es lo mismo decir para velocidades cercanas a la nominal.



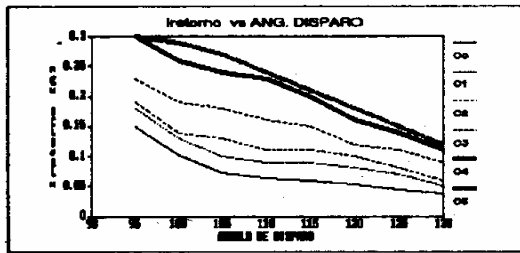


Figura 29

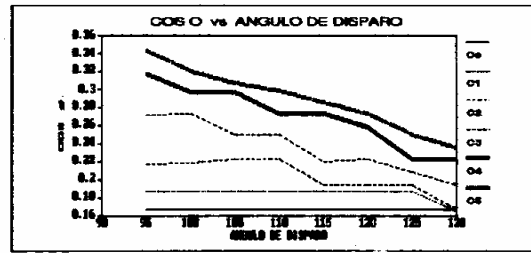


Figura 33

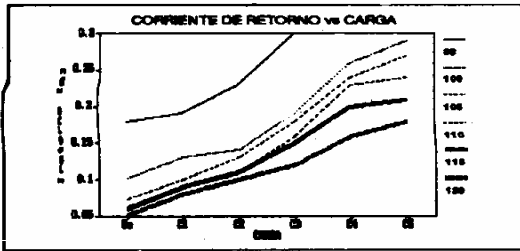


Figura 30

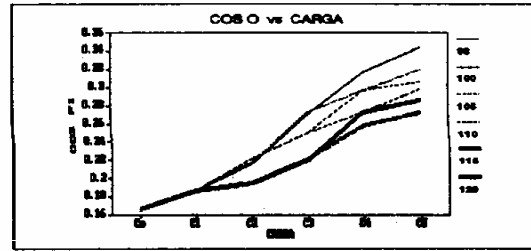


Figura 34

La tensión del inversor depende únicamente del ángulo de disparo, esto lo podemos apreciar en las curvas correspondientes, obsérvese que para cualquier valor de carga, la tensión del inversor es prácticamente lineal y es proporcional al ángulo de disparo, esto se puede visualizar en la curva tensión de inversor vs carga, se ve que para cierto ángulo de disparo la tensión se mantiene constante.

A continuación se presentarán los resultados obtenidos del comportamiento de sistema en lazo cerrado, los parámetros que se podrán variar en esta modalidad de funcionamiento serán ya sea la carga o la velocidad.

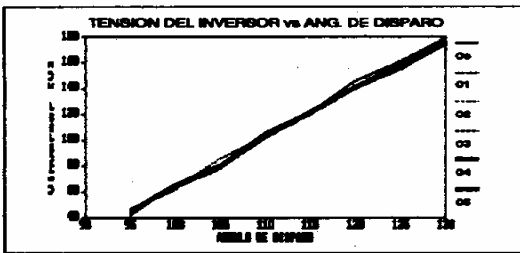


Figura 31

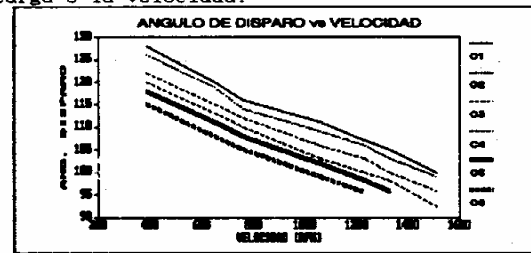


Figura 35

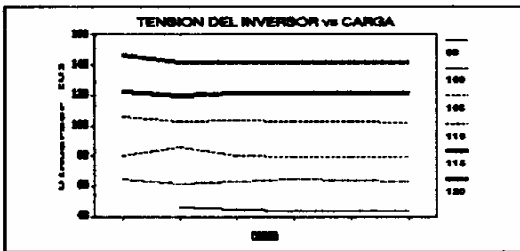


Figura 32

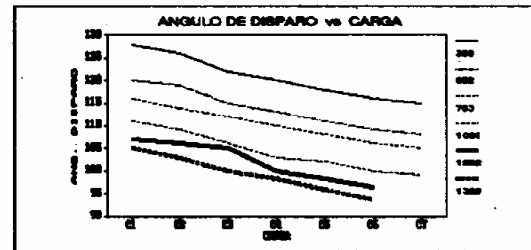


Figura 36

En las siguientes figuras se puede apreciar el comportamiento del  $\cos \phi$  de la máquina con respecto al ángulo de disparo y con respecto a la carga. Como se puede observar el  $\cos \phi$  varía de aproximadamente de 0.18 a 0.36 y es inversamente proporcional al ángulo de disparo y directamente proporcional a los incrementos de carga puesto que se consume mayor potencia activa mientras la carga es mayor.

El ángulo de disparo es inversamente proporcional tanto para incrementos de velocidad como para incrementos de carga, cabe señalar la linealidad que se presenta en estos dos tipos de curvas. En la siguientes gráficas se puede observar las curvas de tensión de inversor versus velocidad con carga constante y versus carga con velocidad constante, las dos curvas son inversamente proporcionales tanto para incrementos de velocidad como para incrementos de carga.

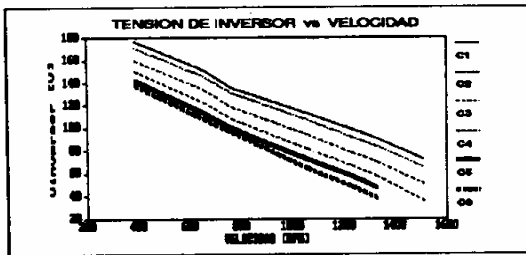


Figura 37

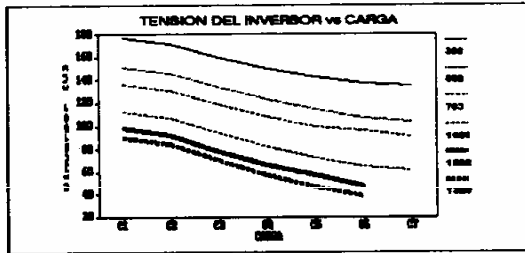


Figura 38

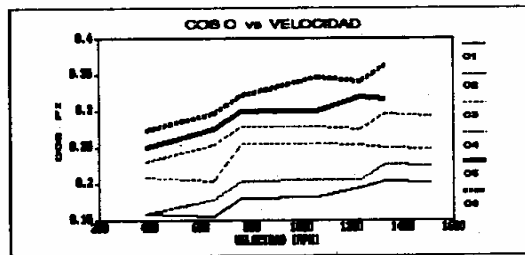


Figura 39

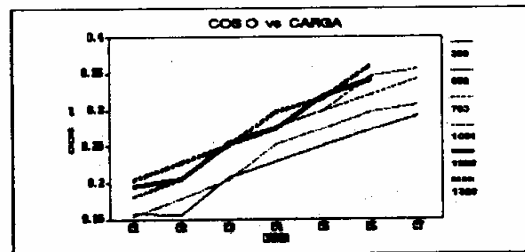


Figura 40

En las dos últimas gráficas se presenta el  $\cos \phi$  de la máquina de inducción. Como se puede apreciar, el  $\cos \phi$  es directamente proporcional tanto para variaciones de velocidad como para variaciones de carga.

#### CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

El sistema de control de velocidad del motor de inducción aprovechando la energía de deslizamiento cumple con los objetivos planteados en este trabajo.

El sistema opera sin ningún problema ante la

presencia de ruido eléctrico que hubiese podido presentarse en las líneas de alimentación de corriente alterna, provocada por la conmutación de los tiristores puesto que al trabajar el puente trifásico de tiristores como inversor no autónomo, es decir, su salida conectada a la red de alimentación, la forma de onda de salida seguirá a la forma de onda de la fuente; y ésta es capaz de mantenerse estable mientras absorbe la potencia desde los circuitos del rotor del motor de inducción. Por tanto los voltajes de línea y los voltajes fase-neutro reproducidos en el circuito de disparo a través del transformador de sincronización, presentan formas de onda libres de interferencia.

Puesto que el inversor del sistema del control de velocidad es conmutado por la tensión alterna de la línea, y aunque la tensión continua es baja, la inversión se realiza por conmutación retardada, dando como resultado una alta absorción de potencia reactiva de la red, y por tanto un bajo factor de potencia. Cabe mencionar que el factor de potencia varía aproximadamente desde 0.2 a 0.4 para las cargas de prueba que se le sometieron al motor.

Debido a que el motor de inducción tiene una buena característica de regulación de velocidad, ayuda en la estabilidad del sistema cuando se presentan disturbios.

Con el fin de observar el comportamiento del sistema de control de velocidad para fallas que se podrían presentar, se simuló en el sistema pérdida de una de las fases en diferentes puntos del sistema; obteniéndose las siguientes conclusiones:

En primer lugar se simuló pérdida de una de las fases en el sistema de inversión, para dicha falla se pudo concluir que el sistema de control permanece funcionando; pero, cuando se trabaja sin realimentación, debido a que el retorno de potencia se la hace a través de solamente dos fases restantes, la velocidad del motor disminuye. En el caso que se trabaja con realimentación, el ángulo de disparo se corregirá hasta conseguirse regresar a la velocidad inicial; siempre que éste que sea posible.

A continuación se simuló la pérdida de la señal de entrada al circuito de disparo de una de las fases; el comportamiento del sistema de control de velocidad para esta falla es igual al mencionado anteriormente; puesto que es como si saliera de servicio una fase del circuito inversor, debido a que al no existir la señal de entrada al circuito de disparo, no existe la señal de disparo para los SCR's correspondientes a la fase perdida, por consiguiente los mismos no conducirán en ningún momento y la transmisión de potencia de los devanados del rotor a la red se realizará por medio de las fases restantes. Esta prueba se hizo tanto eliminando una de las fases del primario, como del secundario de transformador de sincronización.

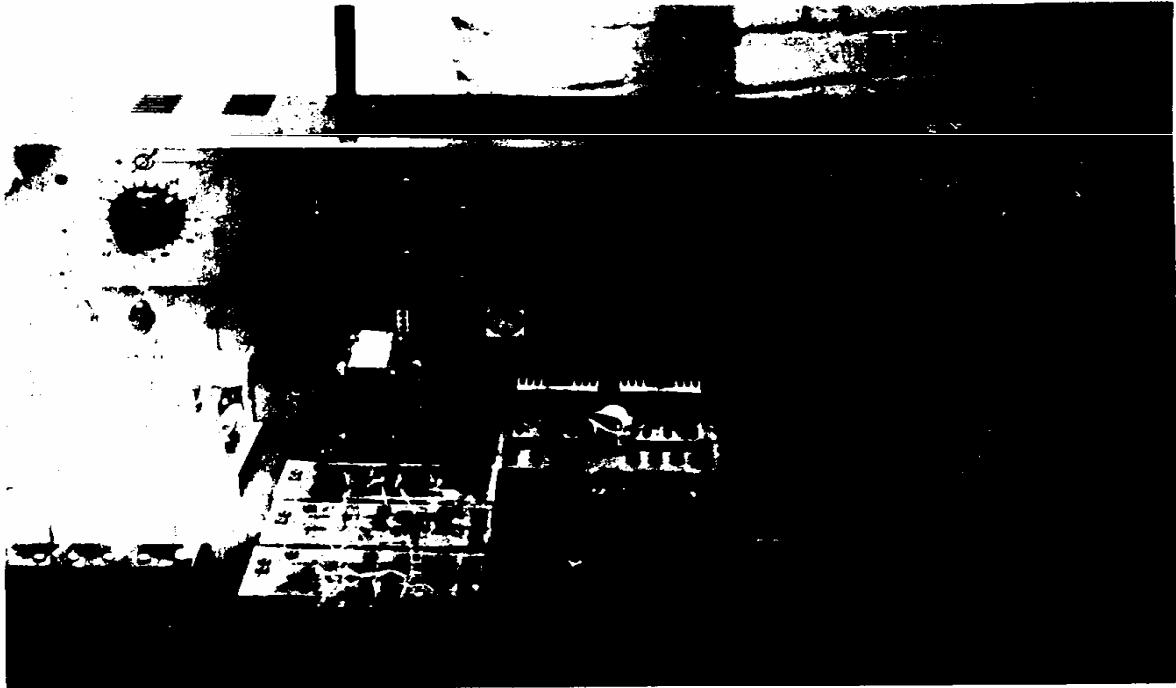
Es evidente que no se deberá mantener el motor en las condiciones de falla anteriormente mencionadas; pero es importante indicar que para un proceso en el que se requiera mantener estrictamente la velocidad constante, la recuperación de velocidad que se produce ante este tipo de fallas es conveniente, hasta que se tomen las medidas correctivas para sacar de servicio la máquina sin que exista ningún problema.

En la práctica se pudo constatar que con este sistema de control se puede fijar la velocidad de trabajo más finamente y permanecer en ella casi invariablemente, no así como el control de velocidad con el sistema tradicional de resistencias externas conectadas a los bornes del rotor.

El arranque del motor deberá ser realizado por medio de resistencias externas conectadas a los devanados del rotor, para luego ser transferido al sistema recuperador de energía; primeramente, fijando la velocidad y el ángulo de disparo en valores adecuados para hacer la transferencia para el sistema sin realimentación; y por último fijar la tensión de control del ángulo de disparo proveniente del circuito de realimentación de manera que coincida con la tensión de control del ángulo de disparo sin realimentación y hacer la transferencia a través del conmutador para trabajar con el sistema con realimentación. Es obvio que el proceso de arranque se lo puede hacer automáticamente para ser implementado en la industria, pero es adecuado para la enseñanza puesto que se entiende de mejor manera el proceso de control de velocidad en el arranque.

Una de las recomendaciones para el uso de éste sistema es la utilización de fusibles rápidos para la protección del inversor y del rectificador, puesto que con ello se asegura que el tiempo de actuación no supere en ningún caso un ciclo de línea, lo cual garantiza una efectiva protección de la máquina de inducción y del convertidor.

Como anteriormente se mencionó, el factor de potencia de trabajo de la máquina es muy bajo, por lo que se recomienda para posteriores investigaciones hacer un análisis para dar soluciones para corregir este defecto. Como se pudo comprobar, el sistema de control de velocidad funciona correctamente, lo cual da la pauta para posteriores investigaciones como es el uso del circuito rectificador-inversor en la transmisión de energía.



#### BIBLIOGRAFIA

- NN, "IEEE Standard Test Procedure for Poly phase Induction Motors and Generators", ANSI/IEEE Std 112, Nueva York, Mayo 2 de 1987.
- Semiconductors Master Replacement ECG212P 14th Edition, Philips ECG, Copyright October 1987.
- B. D. Bedford, R. G. Hoft, "Principies of Inverter Circuits", John Wiley and Sons Inc, 1974.
- Charles Belove, "Enciclopedia de la Electrónica, Ingeniería y Técnica", Departamento de Ingeniería Eléctrica y Computación, Florida Atlantic University, 1990.
- Raymond Ramshaw, "Electrónica de Potencia" Editorial Marcombo, Barcelona, 1977.
- Thomas A. Lifo, P. C. Krause, "Stability Analysis of a Rectifier - Inverter Induction Motor Drive", IEEE Transmision, Vol. Pas. 88 N° 1, January 1969.
- Driscoll, "Amplificadores Operacionales", Escuela Politécnica del Litoral, Ecuador, 1985.

#### BIOGRAFIAS



la Universidad de Cuenca.

JARAMILLO PALACIOS FABIAN.- Nació en Cuenca el 16 de Agosto de 1956. Obtuvo el Título de Ingeniero Eléctrico en la Universidad de Cuenca y el de "Master of Science" en Electrónica de Potencia en la Universidad de Loughborough - Inglaterra. Ha sido Director de la Escuela de Ingeniería Eléctrica y Decano de la Facultad de Ingeniería de



to se dedica al

TORRES PROANO FABIAN.- Nació en Cuenca el 2 de Octubre de 1964. Obtuvo el Título de Ingeniero Eléctrico en la Universidad de Cuenca en 1993. Ha cumplido funciones en el Sistema Eléctrico Morona Santiago (SEMS) como Ingeniero Auxiliar en la implementación del SICAP (Sistema de Información Computarizado de Alimentadores Primarios), al momento se dedica al ejercicio libre de la profesión.



TORRES PROANO LUIS.- Nació en Cuenca el 18 de Junio de 1960. Obtuvo el Título de Ingeniero Eléctrico en la Universidad de Cuenca en 1993. Al momento está dedicado al ejercicio libre de la profesión.