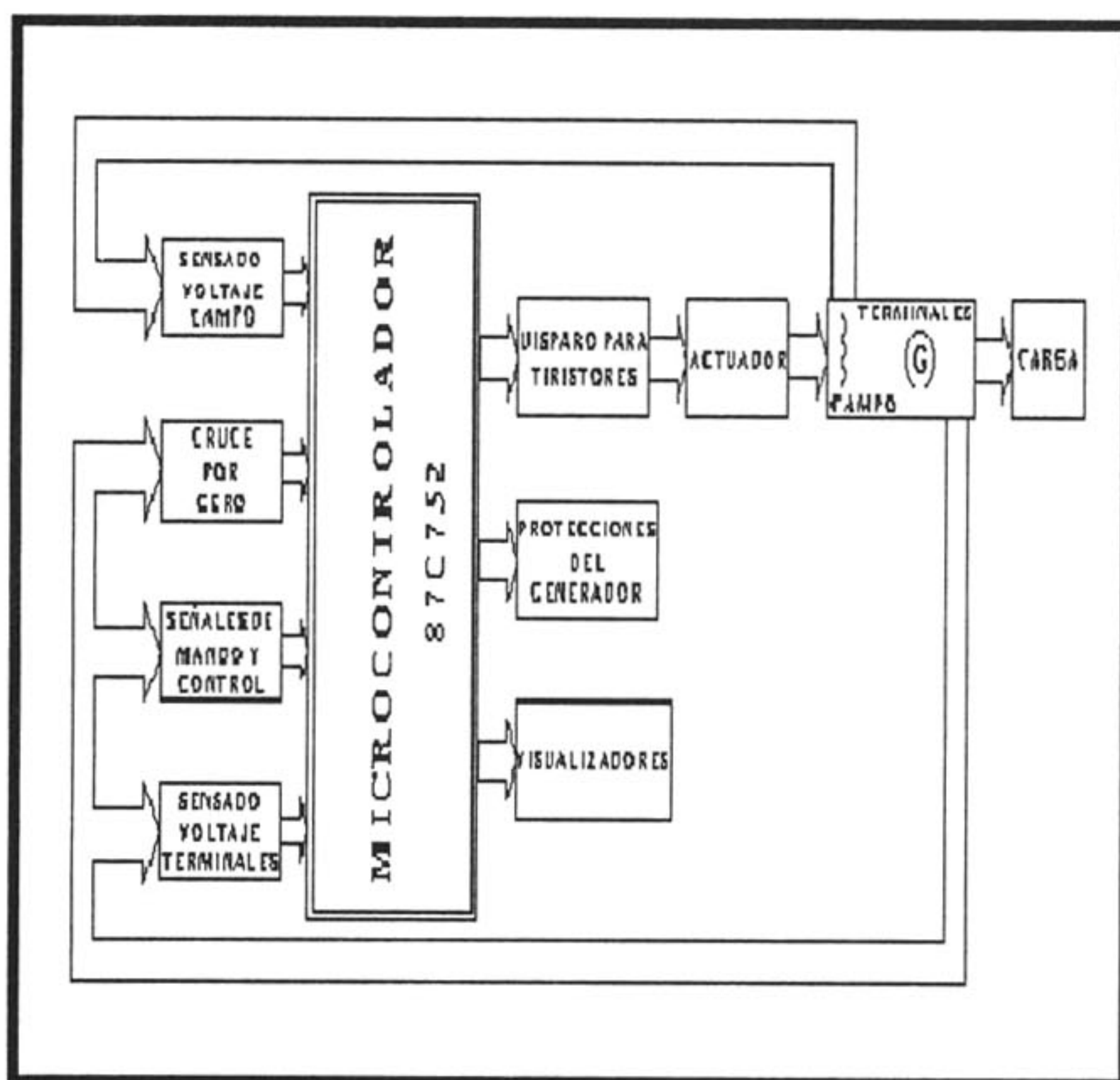


Regulador digital de voltaje para un generador sincrónico trifásico



RESUMEN

En este artículo se presenta el diseño de un regulador de voltaje microcontrolado para un generador sincrónico. El trabajo muestra las ventajas que un control digital proporciona frente a uno analógico, por ejemplo el desarrollo de las estrategias de control como algoritmos digitales. El microcontrolador utilizado es el 87C752. Se presentan los resultados obtenidos y sugiere futuros desarrollos.

PALABRAS CLAVES

Máquinas sincrónicas, control de excitación, compensación, algoritmo de control, control digital.

ABSTRACT

This paper presents the design of a voltage regulator microcontrolate for synchronous machine. This work shows the advantages that a digital regulator provide, for example the development of control strategies like digital algorithms. The used microcontroller is the 87C752. Appear the obtained results and developments futures are suggested.

KEYWORDS:

Synchronous machines, excitation control, compensation, control algorithms, digital control.

□ **Martha Lucia Orozco G.**
Ingeniera Electrónica
Asistente de Docencia

□ **Jairo Fernando Guerrero A.**
Ingeniero Electrónico

□ **Hernando Vásquez P, M.Sc.**
Ingeniero Electricista,
Profesor Titular
Universidad del Valle

□ **Jorge Eliécer Quintero, M.Sc.**
Ingeniero Electricista
Profesor Auxiliar
Universiad de Valle

1. INTRODUCCIÓN

El sistema a regular consiste de un generador sincrónico trifásico en funcionamiento independiente. Cuando en terminales del generador se conecta una carga, es decir que éste entrega su potencia a otro sistema, en este caso una carga del tipo resistivo-inductivo, se presenta una depresión del voltaje en terminales; el sistema de regulación se encarga de recuperar el voltaje entregado a la carga de tal forma que las condiciones de sobrepaso y tiempo de estabilización se encuentren dentro de las normas internacionales. El controlador del sistema, las funciones de protección, mando y control, y las señales de disparo para el actuador son definidas por un algoritmo digital. Con un sistema microcontrolado se pueden tener en un mismo circuito integrado varios dispositivos de hardware, lo que reduce el tamaño del sistema y lo hace modular. Este trabajo proporciona unas bases importantes para implementar posteriormente un regulador en un generador que se encuentre conectado a la red eléctrica en la que el barraje infinito determina la magnitud y frecuencia del voltaje, donde la regulación se haría no sobre el voltaje sino sobre la compensación de reactivos en la red eléctrica.

2. DISEÑO DEL SISTEMA DE REGULACIÓN

A continuación se presenta el diagrama de bloques del sistema en la forma como se relacionan las señales que entrega el generador con el microcontrolador, que es el encargado de realizar el control automático a través de un algoritmo digital.

2.1. Dectector de cruce por cero

Este módulo se encarga de detectar cada vez que la señal alterna del generador cruce por cero. El microcontrolador recibe un "1 lógico" durante el semiciclo

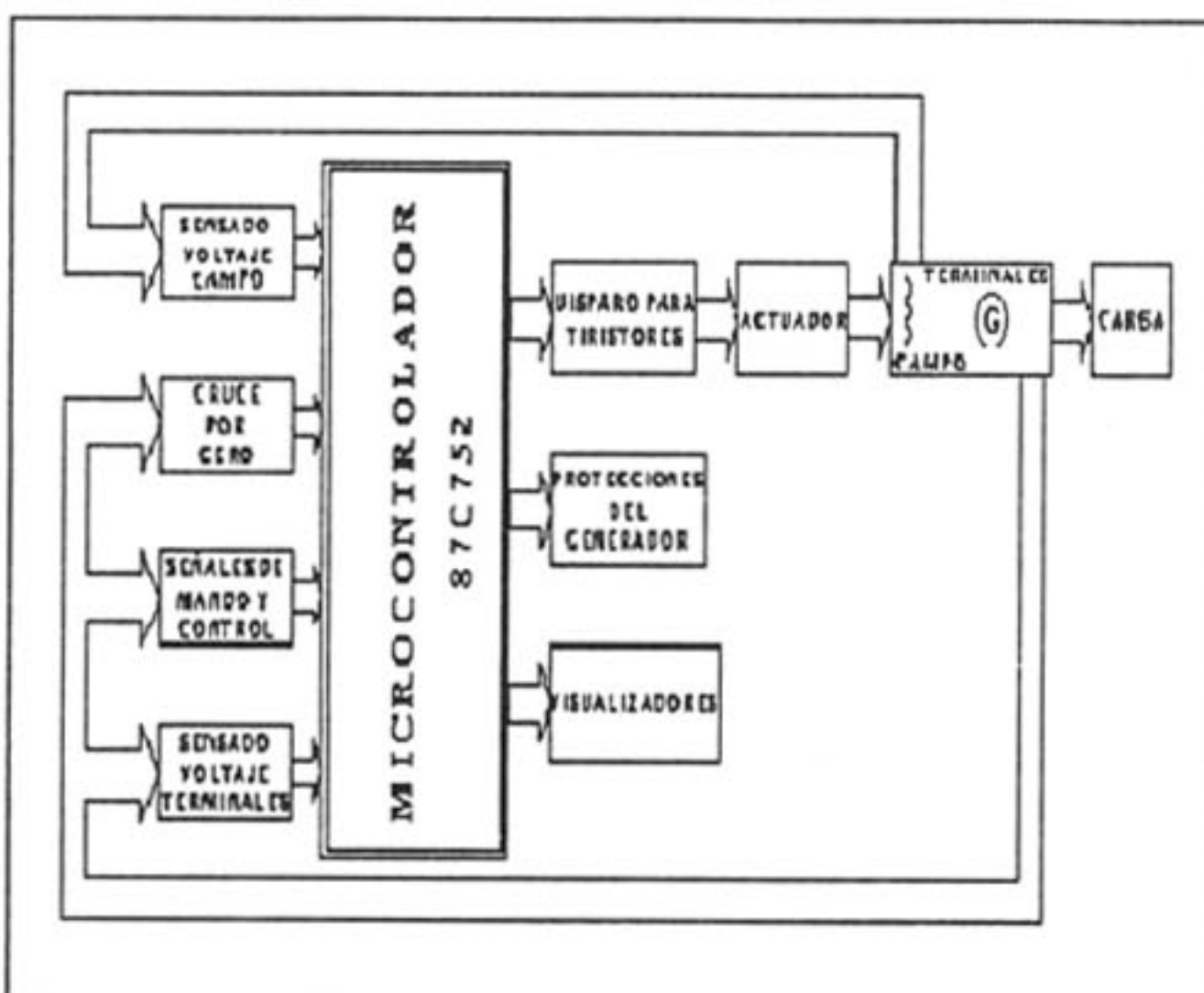


Figura 1. Señales entrada/salida del 87C752

positivo y un "cero lógico" durante el semiciclo negativo de la señal alterna a la salida del generador. Esta señal es llevada a la interrupción externa del microcontrolador de tal forma que cuando reciba un nivel lógico bajo se genere la interrupción y pase a ejecutar la rutina diseñada para realizar el disparo de los tiristores que correspondan a este semiciclo, con un temporizador se cuentan 180 grados para el disparo del siguiente par de tiristores en el semiciclo positivo.

2.2. Sensado de Voltaje en terminales

La salida del generador es trifásica alterna con 208 voltios nominales línea - línea, la cual es reducida y aislada a través de dos transformadores reductores de 220 II 6 volt; se hace una conexión en forma de delta abierta, para hacer el sensado de las tres fases. El circuito de adecuación de este voltaje comprende las etapas: rectificación trifásica, filtro RC y amplificación. Esta señal es llevada al conversor A/D del microcontrolador.

2.3. Actuador

La excitación de campo del generador se hace a través de un puente monofásico totalmente controlado. La alimentación para este puente monofásico se toma del mismo voltaje en terminales del generador, lo cual le imprime al sistema de excitación el carácter de autoexcitado.

La relación del voltaje de salida con el ángulo de disparo es [8]:

$$V_d = \frac{2V_m}{\pi} \cos \alpha \quad (1)$$

Otro módulo que hace parte del actuador es el sistema de arranque por baterías. En un principio existe un voltaje en terminales muy pequeño debido a la remanencia de la máquina pero no es suficiente para el enganche de los tiristores (a causa de su corriente de mantenimiento) por lo que es necesario excitarlo al inicio con un voltaje externo que es el voltaje de la batería.

2.4. Señal de disparo para los tiristores

La señal de disparo para los tiristores del puente monofásico es entregada por el microcontrolador; el sistema de control digital es el que ordena el instante en que debe aparecer la señal de disparo. El microcontrolador recibe la señal de cruce por cero y determina el ángulo de disparo a través de su algoritmo de control digital.

2.5. Sensado de voltaje de campo

La señal que entrega el actuador se lleva a un filtro RC para eliminar el rizado que entrega el puente monofásico.

Se utiliza una etapa de aislamiento a través de un optoacoplado y una etapa de amplificación. Esta señal es llevada al conversor A/D del microcontrolador.

2.6. Protecciones del sistema

Uno de los aspectos fundamentales en el sistema de regulación se relaciona con las protecciones de la máquina. Ante todo, el generador sincrónico debe estar protegido contra cualquier falla. Existen tres tipos de protecciones que se han considerado; la primera de ellas es la sobretensión, la cual se presenta cuando existe en terminales un voltaje muy por encima de la tensión nominal, aproximadamente un 20%. Este voltaje se puede presentar ya sea porque existe en terminales una carga capacitiva, por una falla en algún componente del sistema o por desconexión de la carga del generador. La segunda se relaciona con bajo voltaje en terminales, y representa una pérdida de tensión por debajo del 20% del voltaje nominal, caso que se presenta con cargas del tipo resistivo-inductivas, por pérdida del sistema de regulación o falla en algún componente del sistema. Es claro que el sistema de regulación tiene un rango de operación de más o menos 20% del voltaje nominal; dentro de este rango las condiciones de funcionamiento son normales pero fuera de este rango es cuando actúan las protecciones mencionadas.

La última protección de la máquina se relaciona con la sobreexcitación. Toda máquina generadora tiene un límite de excitación, ya sea por corriente o por voltaje, por encima del cual es peligroso ponerla a funcionar[4]. La sobreexcitación se presenta cuando la máquina se excita por encima de su límite de funcionamiento, estado que es muy peligroso porque se produce sobrecalentamiento en los devanados del rotor.

2.7. Señales de mando y control

Se debe poder controlar externamente el sistema de regulación, o sea entregarle el mando a una persona quien se encarga de ejecutar las acciones adecuadas frente a algún problema del sistema o cambiar de un tipo de regulación a otro; estas operaciones se presentan de acuerdo con el diseño del sistema de regulación para lo que se tienen las siguientes acciones:

- **Conexión del puente:** mando externo para conectar la alimentación del puente monofásico, actuador, esto es, entregarle excitación al campo del generador.
- **Desconexión del puente:** existe una desconexión automática generada por el microcontrolador cuando se presenta una protección por sobrevoltaje, bajo voltaje o sobreexcitación; primero se desactiva el contacto de línea y luego el que alimenta al puente monofásico. Pero también tiene la posibilidad de desconectarse en forma manual a través de un pulsador; en este caso si las protecciones fallan, el

operario puede desconectar el puente y proteger la máquina.

- **Incremento y decremento:** Se tiene control sobre la referencia de voltaje. El sistema regula sobre un voltaje de referencia, el cual inicialmente es el nominal pero el sistema debe estar en capacidad de regular sobre otro nivel de voltaje deseado, obviamente dentro de un rango de valores adecuados; este cambio del nivel de voltaje a regular se hace modificando la referencia de voltaje o set-point.

2.8. Visualizadores

Estos visualizadores se utilizan como señal de sobreexcitación, sobrevoltaje y bajo voltaje y se ejecutan a través de puertos de salida del microcontrolador.

3. ANALISIS DEL SISTEMA DE CONTROL

El sistema de control se estudia con el diagrama de bloques de la figura 2 [6]:

Como se puede observar, es el microcontrolador quien recibe las señales del sistema, las cuales son tomadas por el controlador para procesarlas y entregarle una señal adecuada a la ley del disparo; finalmente el actuador recibe el ángulo de disparo con el que modifica la alimentación al campo de la máquina y ésta genera una respuesta dinámica que mantiene la regulación de su voltaje en terminales.

3.1. Conversor A/D

El microcontrolador incluye dentro del chip un conversor análogo a digital de 8 bits [7]. El software se diseñó para que este conversor se habilite cada 16.66 ms y desde este instante toma 40 ciclos de máquina (40 ms) para completar su operación. El tiempo de muestreo es muy pequeño comparado con la dinámica de la planta, lo que hace que el sistema de regulación responda rápidamente a cualquier cambio. El resultado, voltaje sensado, se almacena en el registro de 8 bits ADAT, es entonces una palabra digital de 0 a 255.

3.2. Voltaje de referencia

El voltaje de referencia es una palabra digital de 8 bits que corresponde al voltaje sobre el que se regula; inicialmente se toma el voltaje de referencia como 208 volt, pero este valor se puede variar en un rango de 190 volt a 220 volt. Esta operación se ejecuta a través de los pulsadores de incremento y decremento, y representa aumentar o decrementar en dos unidades la palabra digital que corresponde al voltaje de referencia.

3.3. Control digital

En el diagrama de bloques se observa que el sistema de control tiene señales de tipo continuo y señales de

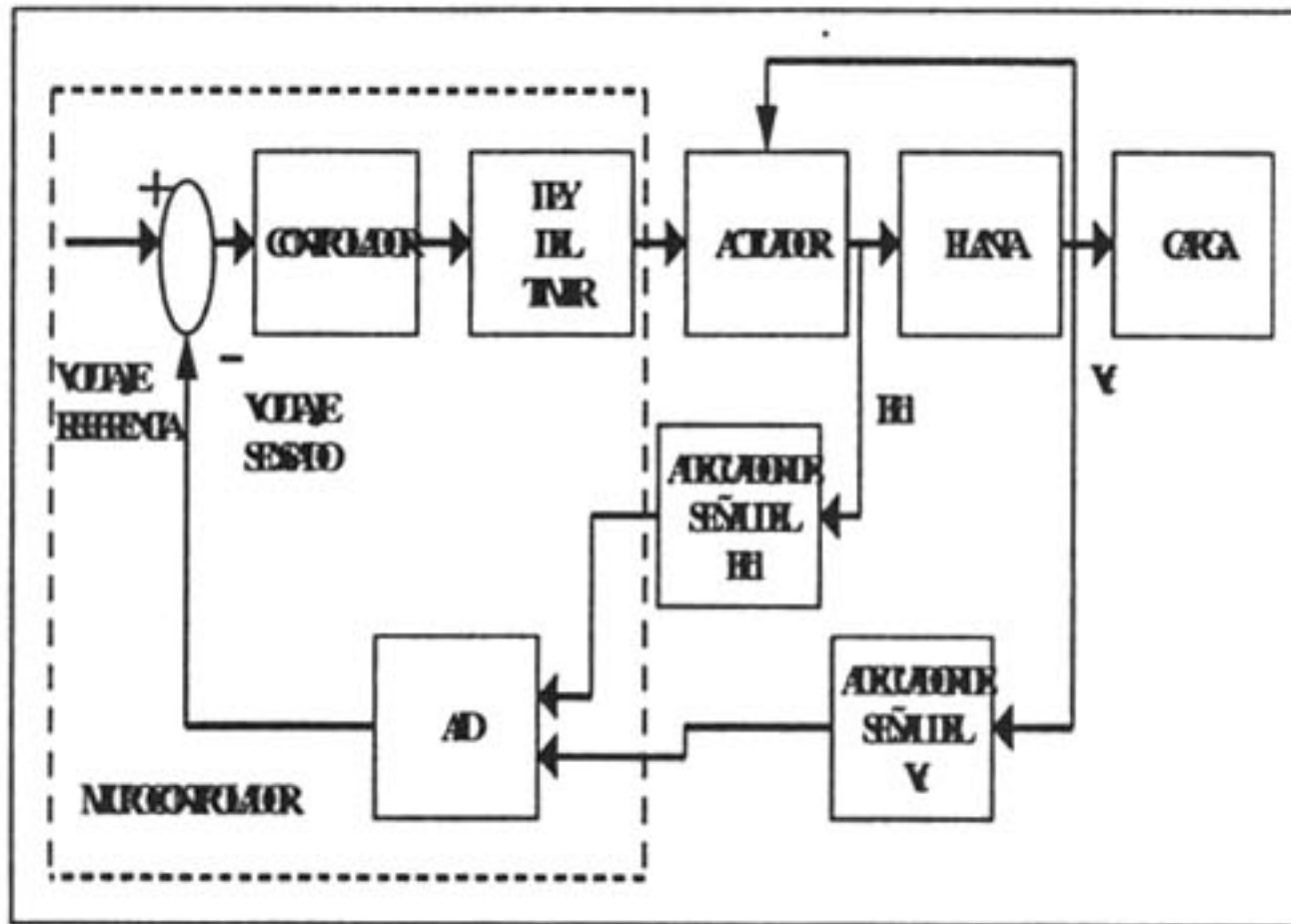


Figura 2

tipo discreto: por ejemplo, la señal que entrega la planta es del tipo continuo, mientras la señal sensada que se utiliza en el controlador es codificada digitalmente por un conversor A/D. Estos números son procesados por el algoritmo de control digital y generan nuevas secuencias digitales. El algoritmo de control digital es una ecuación de diferencias en función del error: $(V_{\text{referencia}} - V_{\text{sensado}}) \times K_p [1]$, donde K_p representa la constante proporcional. La implementación de esta función es la parte más importante del sistema de control ya que es la relación de la dinámica del sistema con la regulación deseada.

3.4. Ley del timer

La ley del timer o temporizador es la relación entre la palabra digital entregada por el controlador (# de control) y el ángulo de disparo. El #de control puede variar entre -65535 y 65535, lo cual permite un amplio rango de valores de K_p antes de desbordarse las operaciones de la ecuación de diferencias del controlador digital. El resultado de esta operación es una palabra digital que representa un ángulo de disparo.

3.5. Planta a controlar

El sistema a controlar es un generador sincrónico trifásico, movido mecánicamente por un motor sincrónico.

La función de transferencia aproximada es [2]:

$$G(s) = \frac{0.52}{0.387s + 1} \quad (2)$$

4. PRUEBAS Y RESULTADOS

En estas gráficas el eje x representa el tiempo y el eje y el nivel de voltaje. Se observa el arranque en vacío del generador, visto a la entrada del microcontrolador (voltaje sensado), en la cual inicialmente el micro-

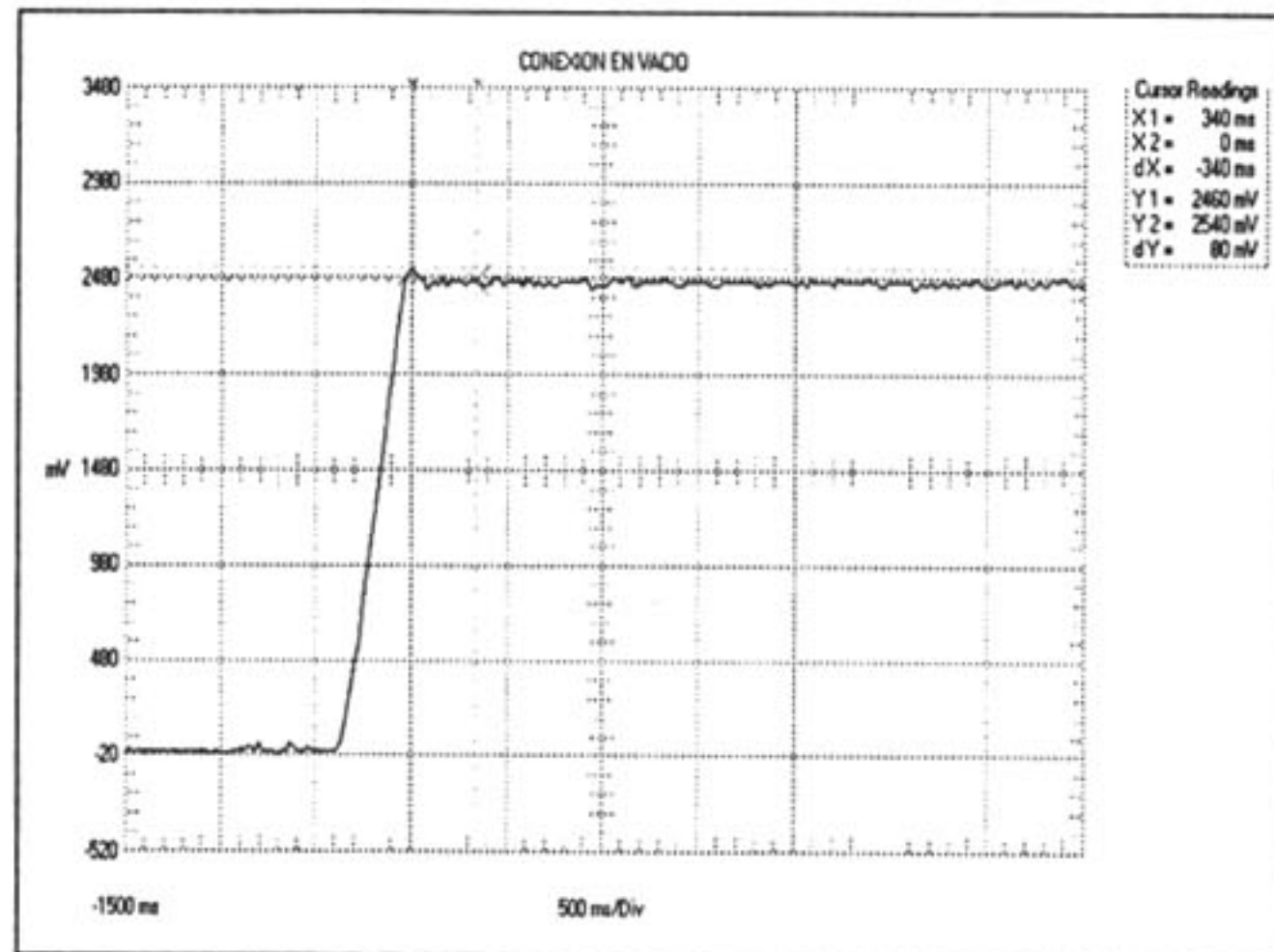


Figura 3. Conexión en vacío

controlador lee un voltaje de dc debido a la entrada activa alta, posteriormente empieza a leer el voltaje sensado del generador sincrónico en vacío. el sobreimpulso máximo es de 3.25%, y el tiempo de estabilización es 340ms

En esta figura se presenta la conexión de un motor de inducción de 0.9 amperios sobre una carga RL de 4 amperios. Se obtiene un sobreimpulso máximo de 11.7% y un tiempo de estabilización de 400ms, presenta un error de estado estacionario del 0.8% sobre el voltaje en terminales.

La gráfica 5 corresponde a la desconexión de 2 motores de inducción de 1.8 amperios. El sobreimpulso máximo es 4.06% y un tiempo de establecimiento máximo de 300ms.

5. CONCLUSIONES

El sobreimpulso máximo y el tiempo de estabilización obtenidos para distintas cargas, están dentro de la norma IEEE. Std 421A-1992 [3]. El valor del sobreimpulso máximo depende de la carga inicial que

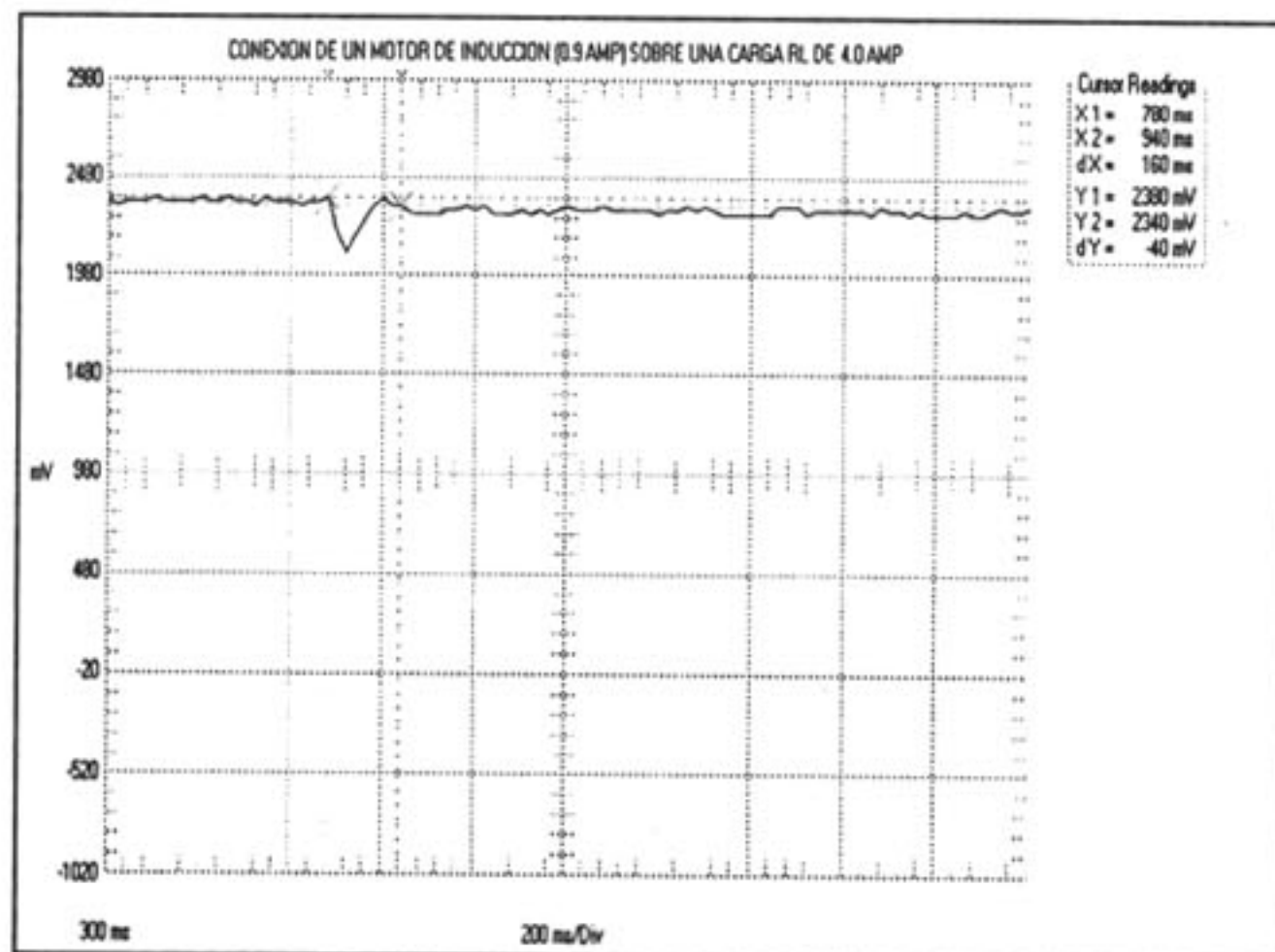


Figura 4. Conexión de un motor de inducción sobre una carga rl de 4 amperios

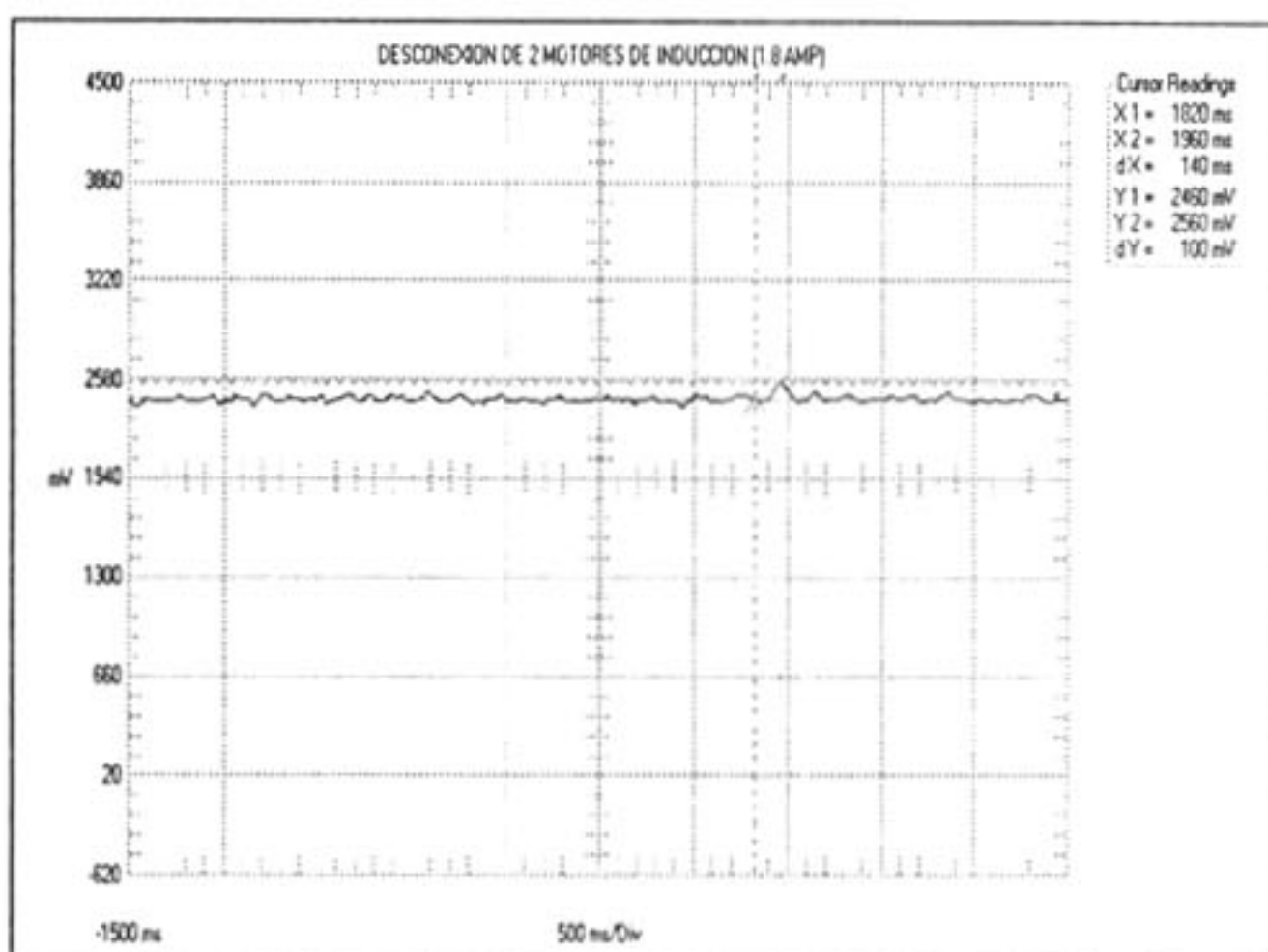


Figura 5. Desconexión de dos motores de inducción

se coloca en terminales del generador. La estabilización del voltaje se logra en un tiempo muy corto con un error de estado estable despreciable.

El sistema de control presenta protecciones y mandos sobre el generador como baja tensión, sobre tensión, y sobreexcitación. Además permite incrementar o decrementar el voltaje de referencia, encendido de los visualizadores (prueba de pilotos), conexión y desconexión de la carga, arranque del sistema.

Entre las ventajas de desarrollar sistemas microcontrolados frente a sistemas analógicos se encuentran la disminución del hardware del sistema de control, la flexibilidad para definir diferentes estrategias de control y la ausencia de valores de deriva por envejecimiento. En este caso el microcontrolador posee en su interior un conversor A/D de 8 bits, de fácil manejo que permite el sensado de voltaje en terminales; una interrupción externa que permite detectar el cruce por cero del voltaje y sirve como sincronismo para el disparo de los tiristores; un temporizador que permite el ángulo de disparo y puertos de I/O que permiten manejar con eficiencia los accionamientos (protecciones).

Este sistema de regulación constituye una base fundamental para continuar con un trabajo más complejo en sistemas de regulación como lo es conectar el generador a la red eléctrica y diseñar para este caso, en forma digital, la compensación de reactivos hacia la red y las funciones de limitación conocidas como sobre-excitación, sub-excitación, voltios-hertz, etc.

6. BIBLIOGRAFIA

- [1.] BENNETT, S. (1998). Real Time Computer Control. Prentice Hall.
- [2.] ESCOBAR, C, LUCUMI, J. (1997). Diseño y construcción de un sistema de regulación de voltaje para un generador sincrónico por medio de DSP'S.
- [3.] IEEE. (1992). Guía para identificación, pruebas, y evaluación del desempeño dinámico de sistemas

de control de la excitación.

- [4.] Kostenko, M.P y Piotrovski, L.M. (1976). Máquinas eléctricas. Mir.
- [5.] Ogata, K. (1980). Ingeniería de control moderna. Prentice hall. 1ª edición.
- [6.] Ogata, K. (1996). Sistemas de control en tiempo discreto. Prentice hall. 2ª edición.
- [7.] Phillips, Semiconductor. (1995). Data handbook IC20. 80C51 basado en microcontroladores de 8 bits.
- [8.] Rashid, M. (1995). Electrónica de potencia, circuitos dispositivos y aplicaciones. Prentice hall. 2ª edición

AUTORES

Martha Lucia Orozco Gutierrez.

Ingeniera Electrónica, Universidad del Valle(2000). Asistente de Docencia y estudiante del Programa de Maestría en Automática de la universidad del Valle.

maloroz@latinmail.com



Jairo Fernando Guerrero Aguirre.

Ingeniero Electrónico, Universidad del Valle (2000). Áreas de interés: Control Electrónico de potencia, Instrumentación Electrónica, automatización y comunicaciones.

jfguerre@latinmail.com

Hernando Vásquez Palacios.

Ingeniero Electricista, Universidad del Valle. Diplom Ingenieur del Elektrotechnik, Technische Universität Braunschweig, Alemania. Pertenece a la cátedra de Accionamientos Eléctricos y Electrónica de Potencia.

vasquez@eiee.univalle.edu.co



Jorge Eliécer Quintero Calvache

Ingeniero Electricista, Magíster en Generación de Energía Eléctrica, Universidad del Valle. Pertenece a la Cátedra de Accionamientos Eléctricos y Electrónica de Potencia.

jquinter@eiee.univalle.edu.co