

# "SISTEMA DIDACTICO PARA CONTROL DE MOTORES D.C."

BANDA HUGO, ING.  
LEDESMA BOLIVAR, ING.  
E.P.N.

## RESUMEN

En este trabajo se presentan los resultados del diseño y construcción de un equipo didáctico modular que permite realizar el estudio teórico - experimental de las técnicas de control clásico aplicadas al control de Máquinas de Corriente Contínua.

Para el efecto se ha utilizado un sistema de control en cascada con realimentación de velocidad y corriente de armadura como configuración básica, y convertidores estáticos AD-DC con conmutación natural y operación en un cuadrante.

Se hace una breve revisión de los métodos de modelación de la máquina y de los convertidores estáticos para luego pasar al diseño del Sistema de Control. Finalmente se exponen los resultados de las pruebas realizadas para la evaluación del funcionamiento del equipo y se analizan sus aspectos más relevantes para posteriormente obtener las conclusiones sobre el trabajo desarrollado.

## INTRODUCCION

Los convertidores AC-DC conmutados por línea son los actuadores ideales para el manejo de máquinas eléctricas. Su simplicidad y versatilidad, su capacidad de corriente casi ilimitada y su excelente comportamiento dinámico son las más importantes cualidades que las caracterizan.

La razón de escoger un motor de corriente continua para una aplicación determinada es generalmente la posibilidad de operar en un rango sumamente amplio de velocidad con bajas pérdidas. Para lograr las características de operación deseadas, en presencia de perturbaciones de la carga y otros factores normalmente resulta necesario que el motor trabaje como parte de un sistema de control realimentado.

En un sistema realimentado no sólo se requiere hacer coincidir el valor de la variable primaria, p. ej. la velocidad, con una magnitud de referencia, sino también realizar un cierto número de funciones, necesarias para el buen comportamiento de la

máquina:

- Limitación de las magnitudes críticas, como la corriente de armadura del motor.
- Ajuste y optimización fáciles de un lazo de control, independientemente de los otros.
- Conmutación suave de un modo de control a otro.

En este sentido, el sistema de "regulación lineal con lazos múltiples o en cascada" es el que mejores características ofrece para este tipo de aplicaciones. El sistema en cascada está formado por un regulador individual para cada una de las variables controladas, de acuerdo al diagrama de la figura 1.

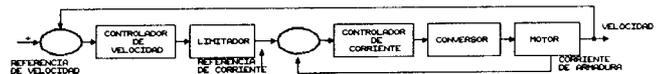


Fig. 1. Esquema de regulador en cascada.

El objetivo básico en el diseño de sistemas de control realimentados es satisfacer las especificaciones del trabajo por ejecutar. Esto requiere un compromiso entre los factores de precisión, rapidez de respuesta y estabilidad. Las técnicas de calibración de los parámetros de un controlador con métodos que se emplean para mejorar el desempeño del sistema. Estas técnicas no intentan sustituir ningún componente del sistema sino que, por el contrario, son herramientas de diseño que los mejoran.

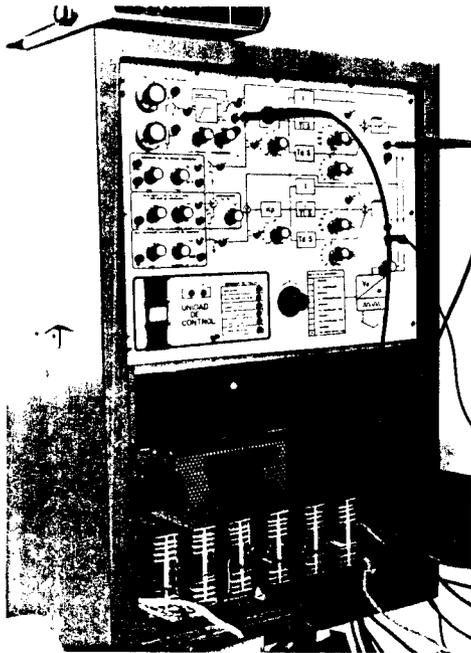
Existen varios métodos para ajustar los controladores al sistema, es decir, para que la ganancia proporcional, el tiempo de acción integral y el tiempo de acción derivativa de un controlador P.I.D., en general, se acoplen adecuadamente con el resto de elementos del lazo de control. Para que este acoplamiento sea posible es necesario un conoci-

miento inicial de las características estáticas y dinámicas del sistema a controlar.

### DESCRIPCIÓN GENERAL Y ESPECIFICACIONES

El equipo es un sistema didáctico para control de motores de corriente continua de hasta 2 KW. Esta compuesto por la Unidad de Control y la Unidad de Potencia.

La Unidad de Control incluye a todos los circuitos electrónicos destinados al procesamiento de las señales y la ejecución de los algoritmos de regulación, de acuerdo al esquema seleccionado para cada aplicación.



La Unidad de Potencia incluye un conjunto de convertidores AC-DC con conmutación natural, alimentados por una red monofásica o trifásica de corriente alterna, según sea su configuración.

#### Especificaciones de entrada

Voltaje nominal	115 VAC +/- 10%
Número de fases	3
Frecuencia	60 Hz
Corriente rms máxima	10 Amperios

Tabla 1

Posición selector	Convertor AC-DC	Voltaje DC de salida:	Corriente de salida:
(1)	Monofásico controlado.	98 V	18 A
(3)	Monofásico semicontrolado.	98 V	18 A
(5)	Trifásico controlado P = 3.	72 V	18 A
(7)	Trifásico controlado P = 6.	145 V	18 A
(9)	Trifásico semicontrolado.	145 V	18 A

Tabla 2

Adicionalmente existe un convertidor AC-DC monofásico controlado en media onda, el cual ha sido incluido para fines puramente didácticos. No es conveniente la utilización de este convertidor para corrientes de carga mayores a 10 A.

Se debe seleccionar el tipo de convertidor AC-DC de acuerdo a las características del motor que se va a utilizar en cada aplicación, en función de las Tablas 1 y 2.

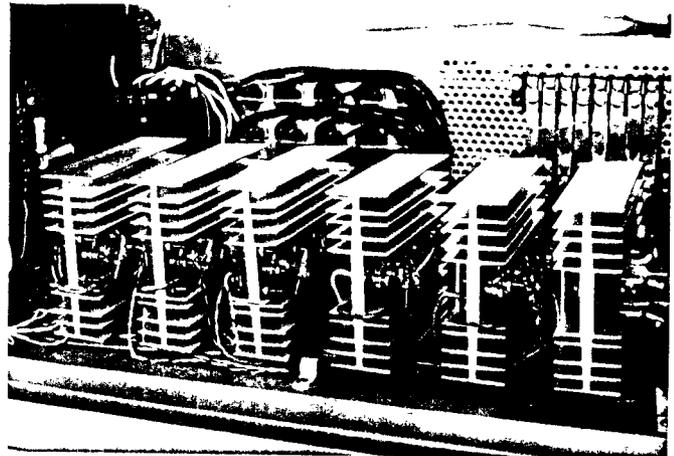


Fig. 2. Vista interior de la Unidad de Potencia

Los circuitos y elementos de protección se pueden resumir en:

- Breakers de tiempo inverso.
- Fusibles en las líneas de alimentación del convertidor.
- Fusibles para cada elemento (diodo o tiristor) de cada convertidor.



te el análisis de su comportamiento dentro de un sistema de control complejo, y que involucre parámetros que puedan ser obtenidos fácilmente mediante pruebas estandarizadas de laboratorio, la descripción de la máquina en un sistema por unidad resulta de enorme utilidad.

De esta manera, es posible establecer un modelo simplificado de la máquina de corriente continua que puede ser representado por el diagrama de bloques de la Fig. y descrito por las siguientes funciones de transferencia.

$$W(s) = F_1(s) V_a(s) + F_2(s) T_L(s)$$

$$I_a(s) = F_3(s) V_a(s) + F_4(s) T_L(s)$$

donde:

$$F_1(s) = \frac{1}{T_{mn}T_a s^2 + (T_{mn} + K_L T_a)s + K_L + 1}$$

$$F_2(s) = \frac{-(1 + s T_a)}{T_{mn}T_a s^2 + (T_{mn} + K_L T_a)s + K_L + 1}$$

$$F_3(s) = \frac{(K_L + s T_{mn})}{T_{mn}T_a s^2 + (T_{mn} + K_L T_a)s + K_L + 1}$$

$$F_4(s) = F_1(s)$$

$T_{mn}$  = constante de tiempo mecánica del motor =  $(J W_0 / T_0)$ .

$T_a$  = constante de tiempo eléctrica del motor =  $L_a / R_a$

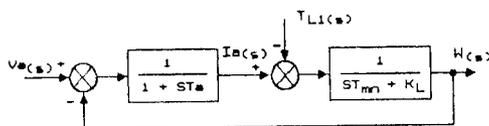


Fig. . Diagrama de bloques simplificado de la máquina de corriente continua.

$V_a(s)$ , se considera la señal de entrada o la variable actuante;  $T_L(s)$  la perturbación que se asume como independiente.  $W(s)$  e  $I_a(s)$  son las variables de salida dependientes, las cuales aparecen en el dominio de la frecuencia como combinaciones

lineales de las variables de entrada.

### CONVERSORES AC-DC CON CONMUTACION NATURAL

Un modelo simple que ha dado resultados excelentes en la práctica, se basa en asumir que el retardo inherente al convertidor puede ser representado por una función de transferencia de primer orden de acuerdo a la siguiente expresión:

$$F_t(s) = A(\alpha) \frac{1}{1 + sT_t}$$

donde:

$F_t(s)$  = función de transferencia del convertidor.

$A(\alpha)$  = ganancia normalizada del convertidor que depende del punto de operación.

$T_t$  = constante de tiempo equivalente del convertidor.

Este modelo heurístico produce resultados útiles para predecir el comportamiento dinámico y la respuesta transitoria del sistema de lazo cerrado. Sin embargo, en la determinación de los límites de estabilidad se pueden encontrar errores apreciables.

La estimación de la constante de tiempo  $T_t$  en la función de transferencia  $F_t(s)$  se puede realizar considerando que el retardo inherente al convertidor puede variar entre cero y  $T/p$  seg. para un convertidor de  $p$  pulsos alimentado por una red de corriente alterna de frecuencia  $f = 1/T$ . De este modo, el tiempo promedio equivalente al retardo resulta ser:

$$T_t = 0.5 T/p \quad (\text{seg.})$$

Para determinar el valor de la ganancia  $A(\alpha)$ , resulta indispensable considerar la naturaleza del convertidor y hacer ciertas restricciones que faciliten la descripción matemática de su operación. Para ello se debe asumir que el convertidor AD-DC conmutado por línea trabaja en régimen de conducción continua, ya que en estas condiciones las características de operación del convertidor son independientes de la naturaleza de la carga.

La Fig. muestra las características voltaje normalizado medio vs. ángulo de activado para las configuraciones más comunes de convertidores:

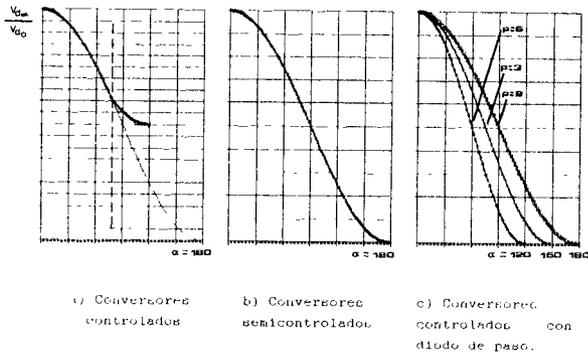
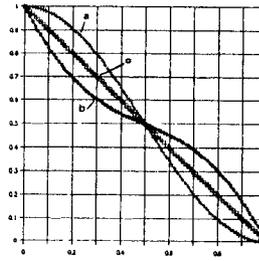


Fig 1.5. Característica voltaje normalizado medio vs. ángulo de activado.

Figura



- a.- Convertor.
- b.- Circuito de disparo.
- c.- Conjunto circuito de disparo-conversor.

Fig. . Característica del circuito de disparo.

De esta manera, el conjunto circuito de disparo - conversor estático tendrá la característica mostrada en la Fig. (curva c), la cual es, evidentemente, lineal.

En estas condiciones, el conjunto se puede representar de la siguiente manera:

CONVERTOR	CONSTANTE DE TIEMPO (T = 60 Hz)	α max.	CONVERTOR	CONSTANTE DE TIEMPO (T = 60 Hz)	α max.
MONOFÁSICO CONTROLADO	$T_t = 4.17 \text{ ms}$	180°	TRIFÁSICO CONTROLADO (PHE) CON DIODO DE CONDUCCIÓN	$T_t = 1.30 \text{ ms}$	120°
MONOFÁSICO CONTROLADO CON DIODO DE CONDUCCIÓN	$T_t = 4.17 \text{ ms}$	180°	TRIFÁSICO CONTROLADO EN MEDIA ONDA (PHE)	$T_t = 2.70 \text{ ms}$	180°
MONOFÁSICO SEMI CONTROLADO	$T_t = 4.17 \text{ ms}$	180°	TRIFÁSICO CONTROLADO (PHE) CON DIODO DE CONDUCCIÓN	$T_t = 2.70 \text{ ms}$	180°
TRIFÁSICO CONTROLADO TIPO PUENTE (PHE)	$T_t = 1.30 \text{ ms}$	180°	TRIFÁSICO SEMI CONTROLADO	$T_t = 2.70 \text{ ms}$	180°



Fig. 1.8. Diagrama de bloques del conjunto circuito de disparo - conversor.

donde:

$V_{\alpha}$  = voltaje de entrada al circuito de disparo.  
 $V_{m\acute{a}x}$  = voltaje de saturación en el circuito electrónicos, tomado como referencia para normalizar las señales de control. Generalmente se escoge  $V_{m\acute{a}x} = 10$  voltios.

### COMPENSACION DE LA CARACTERISTICA ESTATICA DEL CONVERTOR

El método más efectivo para compensar la característica estática no lineal del convertor, cuando trabaja en régimen de conducción continua, es la implementación de un circuito de disparo cuya característica, también no lineal, sea inversa a la del convertor.

Por lo tanto, la característica del circuito de disparo deberá ser como la que se muestra en la

La utilización de esta técnica garantiza que la ganancia estática del conjunto sea igual a la unidad, independientemente del tipo de convertor, siempre y cuando la representación del sistema se realice con las correspondientes variables normalizadas, es decir, trabajando en un sistema por unidad.

IDENTIFICACION EXPERIMENTAL DEL MODELO

El conocimiento experimental del sistema puede llevarse a cabo considerando al conjunto conversor-máquina DC como un recinto cerrado o "caja negra" en el que se introducen señales adecuadas y se analizan las respuestas obtenidas en la salida. Supondremos que el sistema es lineal; de este modo es fácil predecir la respuesta de un sistema a cualquier perturbación.

Cuando se quiere determinar las características de un conversor estático alimentado a un motor de corriente continua, éste método resulta de enorme interés en vista de que permite estimar los parámetros del conjunto conversor - máquina aún en caso de que el conversor trabaje en régimen de conducción discontinua.

La Tabla muestra las posibles respuestas del sistema y las funciones de transferencia que definen el modelo correspondiente. Los valores de las constantes involucradas pueden ser obtenidos de la curva de respuesta del sistema ante la aplicación de una señal escalón en su entrada.

Respuesta del sistema	Función de Transferencia
	<p>Elemento de primer orden y retardo:</p> $F(s) = G \frac{e^{-sD}}{1 + sT}$ <p><math>G = ab/aa</math></p>
	<p>Primera aproximación:</p> $F(s) = G \frac{e^{-sD}}{1 + sT}$ <p><math>G = ab/aa</math></p>
	<p>Dos elementos de primer orden y un retardo:</p> $F(s) = G \frac{e^{-sD}}{(1 + sT_1)(1 + sT_2)}$ <p><math>G = ab/aa</math></p> <p><math>T_1 = T \frac{3ae-1}{1+ae} ; T_2 = T \frac{1+ae}{1+ae}</math></p> <p><math>D = td - \frac{T_1T_2}{T_1+3T_2} ; e = 2.72</math></p>

Tabla . Identificación experimental del sistema

IMPLEMENTACION DE LOS CONVERSORES AC - DC

El diseño e implementación de todos los circuitos de disparo se realizó a la técnica de compensación de la característica del conversor. Con el propósito de ilustrar en el modo de implementar esta técnica, a continuación se presenta el diseño del conversor trifásico controlado de seis pulsos.

IMPLEMENTACION DE LOS CONVERSORES AC - DC

El diseño e implementación de todos los circuitos de disparo se realizó en base a la técnica de compensación de la característica del conversor. Con el propósito de ilustrar el modo de implementar esta técnica, a continuación se presenta el diseño del conversor trifásico controlado de seis pulsos.

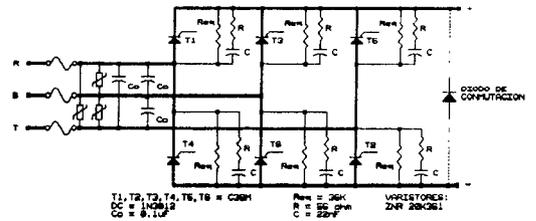


Fig. 2.20. Conversor AC-DC trifásico controlado tipo puente.

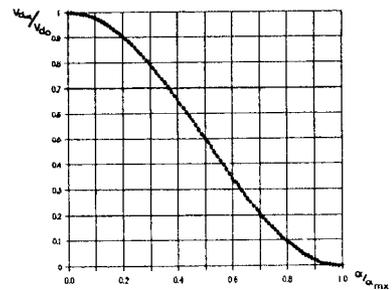
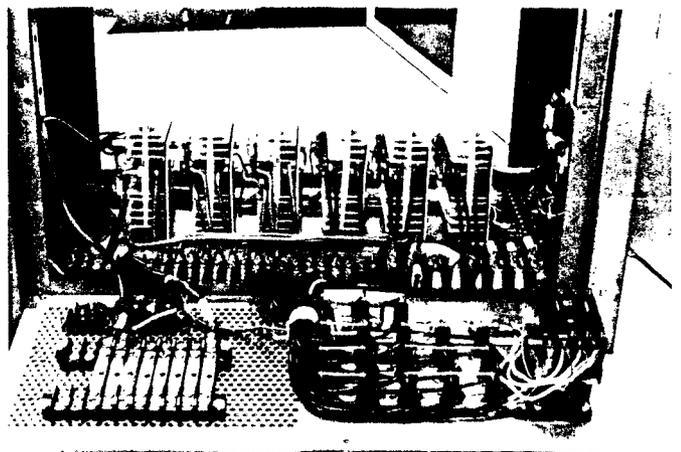
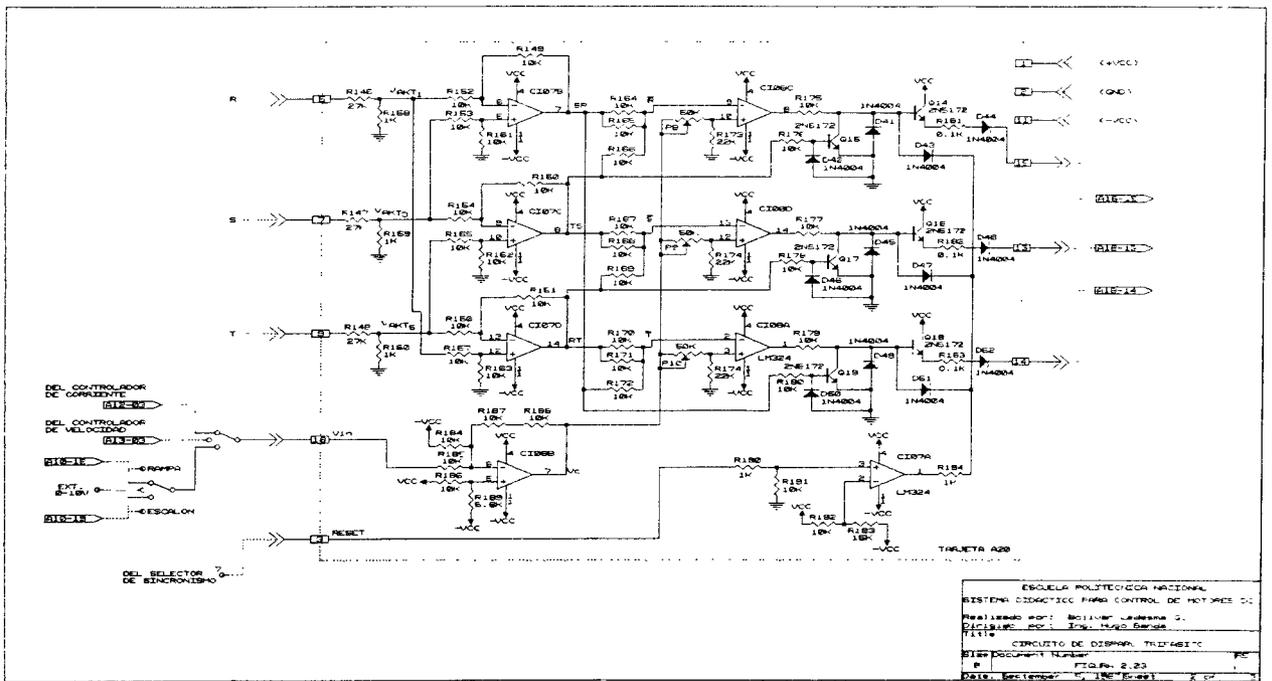
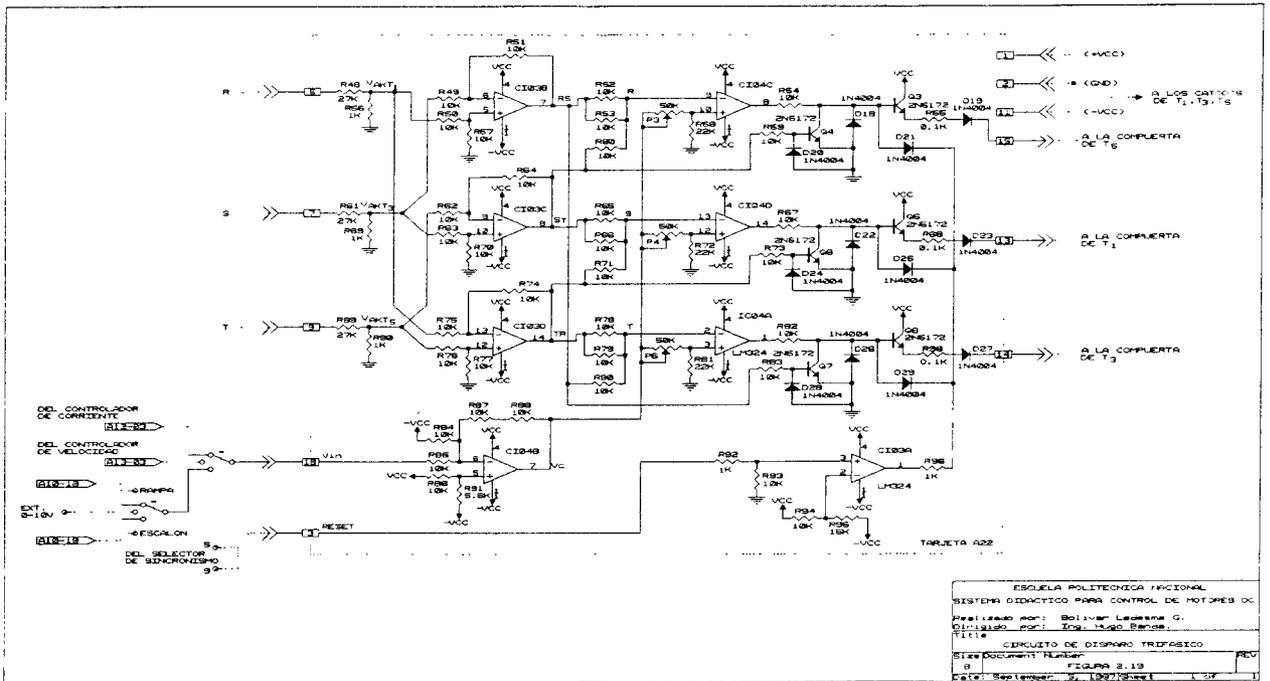
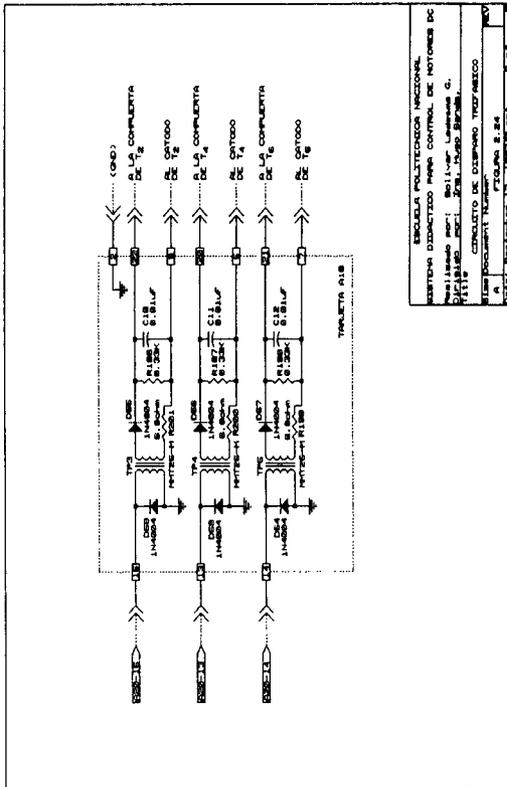


Fig. 1.6. Característica normalizada de un conversor AC-DC.









La Fig. muestra el diagrama general de la Unidad de Potencia, en la que se pueden distinguir los convertidores estáticos AC - DC con sus respectivas redes de protección, fusibles, variadores, etc. Se observa además, el convertidor AC-DC monofásico no controlado utilizado para la alimentación del devanado de excitación del motor y el circuito de mando para el contactor principal.

#### IMPLEMENTACION DE LOS CONTROLADORES ANALOGICOS

La selección del controlador es usualmente un compromiso entre la calidad del control que se desea y la complejidad del controlador propiamente dicho. Sin embargo, la utilización de amplificadores operacionales en la implementación de controladores permite realizar esquemas muy sofisticados con enorme facilidad. De esta manera en el caso de estudiar un sistema y sus perturbaciones que no son bien conocidos es conveniente disponer de un controlador P.I.D. para tener así un potencial de mayor flexibilidad y versatilidad en el control.

En el equipo existen disponibles dos controladores del tipo P.I.D. (Proporcional, Integral y Derivativo), uno para cada lazo de realimentación.

Mediante la manipulación de los interruptores es posible elegir entre los tipos de controlador que

a continuación se detalla:

- Controlador Proporcional (P)
- Controlador Integral (I)
- Controlador Derivativo (D)
- Controlador Proporcional-Integral (P.I.)
- Controlador Proporcional-Derivativo (P.D.)
- Controlador Integral-Derivativo (I.D.)
- Controlador Proporcional-Integral -Derivativo (P.I.D)

Las ganancias de cada acción pueden ser ajustadas en forma independiente mediante potenciómetros apropiadamente calibrados.

El rango de variación de los parámetros de cada controlador es suficientemente amplio como para permitir un análisis completo de su influencia en el sistema.

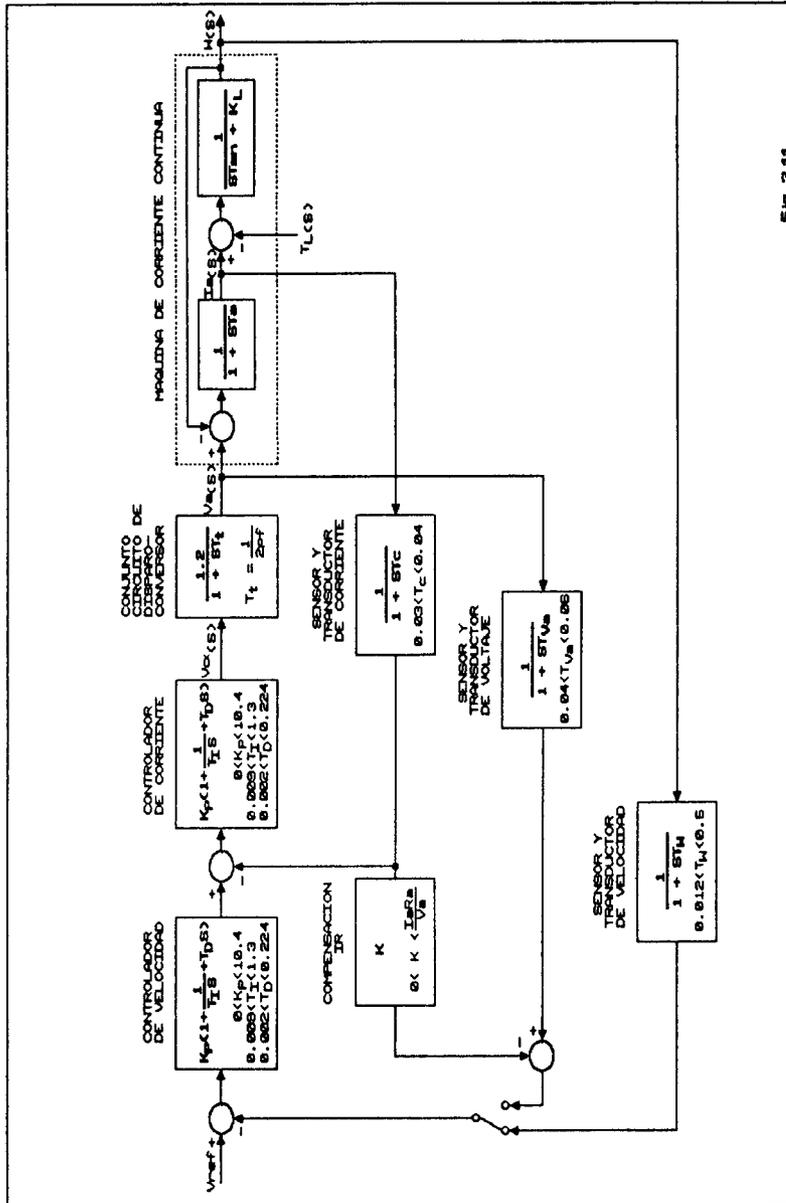
Se ha impuesto como parámetros de diseño, los siguientes rangos de variación en las diferentes ganancias de los controladores:

Ganancia Proporcional ( $K_p$ )	0.0 - 1.0; 6 0.0 - 10.0
Tiempo Integral ( $T_I$ )	0.1 - 1.1 s.; 6 10.0 - 110 ms.
Tiempo Derivativo ( $T_D$ )	2 - 22 ms; 6 20 - 220 ms.

#### RESULTADOS EXPERIMENTALES

El equipo ha sido construido con la intención de que pueda formar parte del conjunto de módulos didácticos implementados en el Laboratorio de Electrónica de Potencia de la Escuela Politécnica Nacional

En la Fig. se presenta el diagrama general de bloques del equipo construido con las respectivas funciones de transferencia, experimentalmente determinadas, de cada etapa del sistema de control.

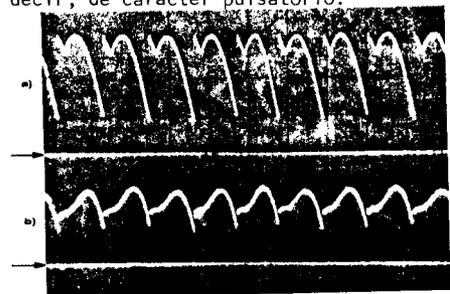


COMPORTAMIENTO EN ESTADO ESTABLE

Las fotografías N. x, y, y xx muestran las formas de onda del voltaje y corriente de armadura para tres configuraciones distintas de convertidor AC-DC, operando sobre una máquina de 2 KW.

Se puede apreciar la característica eminentemente continua de la corriente de armadura en las configuraciones trifásicas, a diferencia de la monofásica en que la corriente tiende a ser discontinua,

es decir, de carácter pulsatorio.



Fotografía N. 16. Convertidor trifásico semicontrolado.

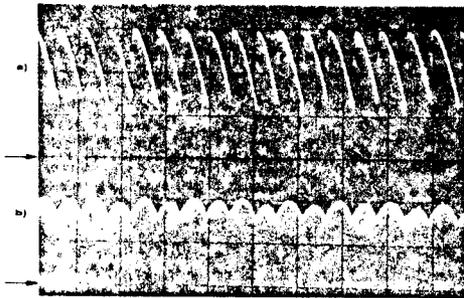
- a) Voltaje terminal
- b) Corriente de armadura



Fotografía N. 13. Conversor trifásico controlado P = 3.

- a) Voltaje terminal
- b) Corriente de armadura

Escalas verticales:  
 Voltaje: 50 V/div.  
 Corriente: 10 A/div.  
 Escala horizontal: 5 msec./div.



Fotografía N. 14. Conversor trifásico controlado P = 6.

- a) Voltaje terminal
- b) Corriente de armadura

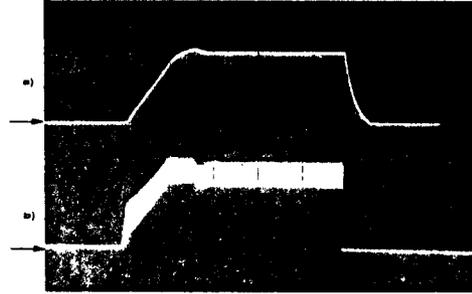
Escalas verticales:  
 Voltaje: 50 V/div.  
 Corriente: 10 A/div.  
 Escala horizontal: 5 msec./div.

#### COMPORTAMIENTO DINAMICO DEL SISTEMA

A continuación se presentan los resultados de las pruebas más importantes realizadas sobre un motor de 2 KW, en las que se puede apreciar la capacidad del equipo para lograr diferentes tipos de respuesta en función de los requisitos de diseño impuestos por cada aplicación particular.

Arranque y parada.- La fotografía muestra la secuencia de arranque y parada del motor utilizando el control de aceleración - desaceleración y limitando la corriente al valor de 19.5 A. (la corriente nominal del motor es de 18.0 A).

Perturbación en la carga.- En las fotografías y se registró la respuesta del sistema ante variaciones bruscas, tipo escalón, en la carga aplicada. El paso de carga va desde vacío hasta condiciones nominales y viceversa. Cada prueba se realizó para distintos parámetros en el controlador P.I.D. de velocidad, pudiéndose apre

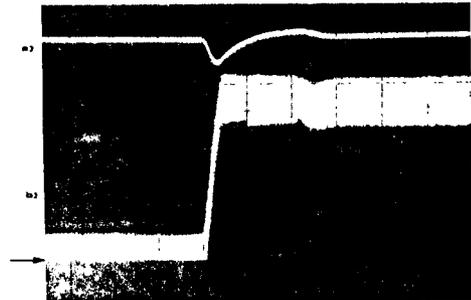


Fotografía N. 24. Arranque y parada de la máquina con control de aceleración - deceleración y limitación de corriente.

- a) Velocidad
- b) Corriente de armadura

Escalas verticales:  
 Velocidad: 5 V/div; 1 V = 150 RPM  
 Corriente: 1 V/div; 1 V = 10 A  
 Escala horizontal: 5 s/div.

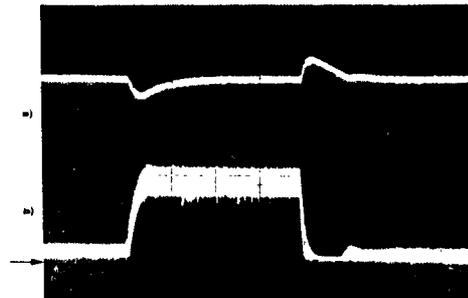
ciar claramente los efectos que el controlador produce en la respuesta del sistema. Adicionalmente, cabe resaltar el hecho de que el valor final de la velocidad se mantiene en el valor referencial independientemente del estado de carga. Si se produce una sobrecarga en el motor, el sistema abandona la regulación de velocidad y se dedica a limitar la corriente de modo que el motor pasa a operar a torque constante. (Foto ).



Fotografía N. 30. Respuesta del sistema a un escalón en la carga, con limitación de la corriente.

- a) Velocidad
- b) Corriente de armadura

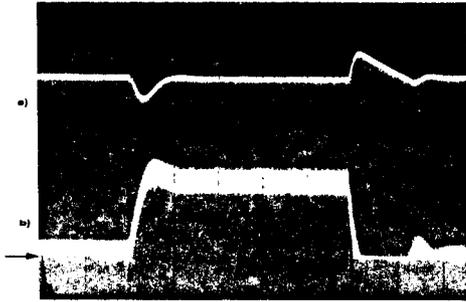
Escalas verticales:  
 Velocidad: 2 V/div; 1 V = 150 RPM  
 Corriente: 0.5 V/div; 1 V = 10 A  
 Escala horizontal: 2 s/div.



Fotografía N. 28. Respuesta del sistema a un escalón en la carga.  
 ( $K_p = 5.00$  y  $T_i = 0.10$  s.)

- a) Velocidad
- b) Corriente de armadura

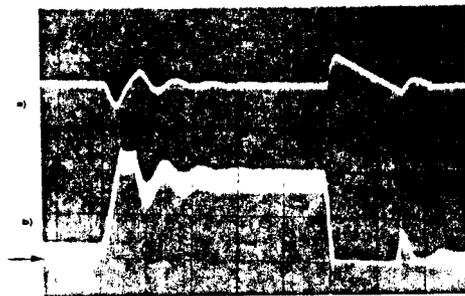
Escalas verticales:  
 Velocidad: 2 V/div; 1 V = 150 RPM  
 Corriente: 1 V/div; 1 V = 10 A  
 Escala horizontal: 2 s/div.



Fotografía N. 27. Respuesta del sistema a un escalón en la carga.

- a) Velocidad
- b) Corriente de armadura

Escalas verticales:  
 Velocidad: 2 V/div; 1 V = 150 RPM  
 Corriente: 1 V/div; 1 V = 10 A  
 Escala horizontal: 2 s/div.

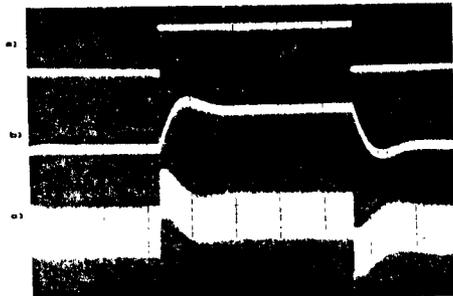


Fotografía N. 29. Respuesta del sistema a un escalón en la carga.  
 ( $K_p = 1.50$  y  $T = 0.01$  s.)

- a) Velocidad
- b) Corriente de armadura

Escalas verticales:  
 Velocidad: 2 V/div; 1 V = 150 RPM  
 Corriente: 1 V/div; 1 V = 10 A  
 Escala horizontal: 2 s/div.

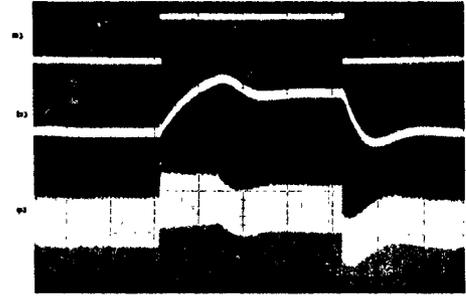
Variaciones de la Referencia.- Las Fotografías y muestran una variación tipo escalón en la señal de referencia de velocidad. La primera fotografía corresponde a la prueba realizada sin alcanzar el valor límite de corriente mientras que la segunda fotografía muestra como el sistema limita la corriente cuando ésta alcanza el máximo fijado por el lazo interno.



Fotografía N. 32. Respuesta del sistema a un escalón en la referencia, sin alcanzar el límite de corriente.

- a) Referencia
- b) Velocidad
- c) Corriente de armadura

Escalas verticales:  
 Referencia: 1 V/div  
 Velocidad: 1 V/div; 1 V = 150 RPM  
 Corriente: 0.5 V/div; 1 V = 10 A  
 Escala horizontal: 2 s/div.

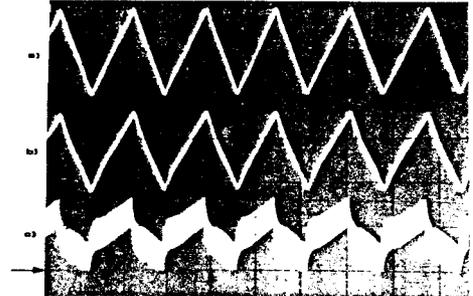


Fotografía N. 33. Respuesta del sistema a un escalón en la referencia, con limitación de corriente.

- a) Referencia
- b) Velocidad
- c) Corriente de armadura

Escalas verticales:  
 Referencia: 1 V/div  
 Velocidad: 1 V/div; 1 V = 150 RPM  
 Corriente: 0.5 V/div; 1 V = 10 A  
 Escala horizontal: 2 s/div.

La fotografía muestra la respuesta del sistema ante una señal triangular introducida a través de la entrada externa a modo de referencia de velocidad.



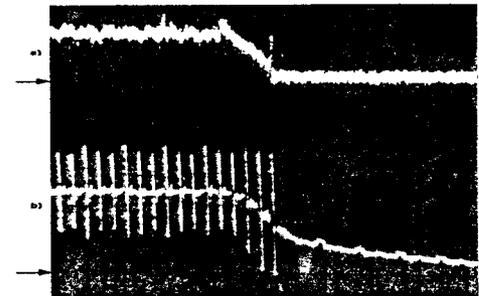
Fotografía N. 35. Respuesta del sistema a una señal triangular en la referencia.

- a) Referencia
- b) Velocidad
- c) Corriente de armadura

Escalas verticales:  
 Referencia: 2 V/div  
 Velocidad: 2 V/div; 1 V = 150 RPM  
 Corriente: 1 V/div; 1 V = 10 A  
 Escala horizontal: 5 s/div.

Operación de las protecciones.-

Falla en la excitación:

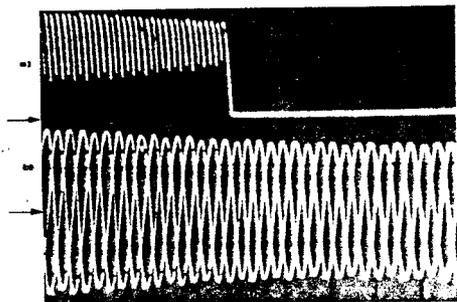


Fotografía N. 37. Operación del detector de falla en la excitación.

- a) Corriente de excitación
- b) Voltaje de armadura

Escalas verticales:  
 Corriente de excitación: 0.5 A/div.  
 Voltaje de armadura: 50 V/div.  
 Escala horizontal: 20 ms/div.

Bajo voltaje AC:

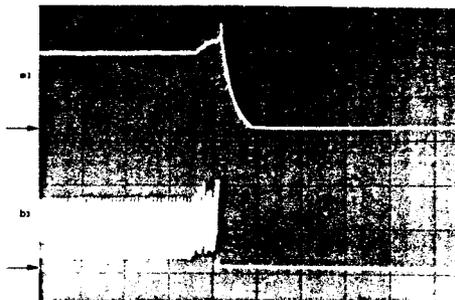


Fotografía N. 38. Operación del detector de bajo voltaje.

- a) Voltaje de armadura
- b) Voltajes de fase de la red

Escalas verticales:  
 Voltaje de armadura: 50 V/div.  
 Voltajes AC de fase: 50 V/div.  
 Escala horizontal : 20 ms./div.

Sobrecorriente DC:

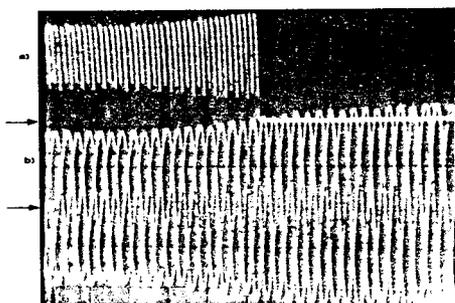


Fotografía N. 41. Operación del detector de sobrecorriente.

- a) Salida del transductor de corriente
- b) Corriente de armadura

Escalas verticales:  
 Transductor de corriente : 5 V/div.  
 Corriente : 0.5 V/div.; 1 V = 10 A.  
 Escala horizontal : 0.2 s/div.

Sobre voltaje AC:

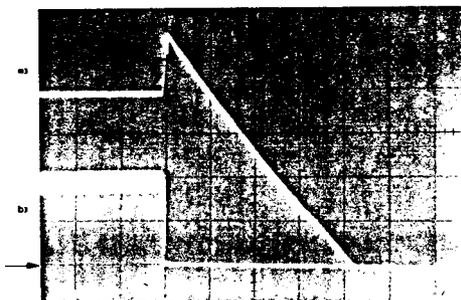


Fotografía N. 39. Operación del detector de sobre voltaje.

- a) Voltaje de armadura
- b) Voltajes de fase de la red

Escalas verticales:  
 Voltaje de armadura: 50 V/div.  
 Voltajes AC de fase: 50 V/div.  
 Escala horizontal : 20 ms/div.

Sobrevelocidad:

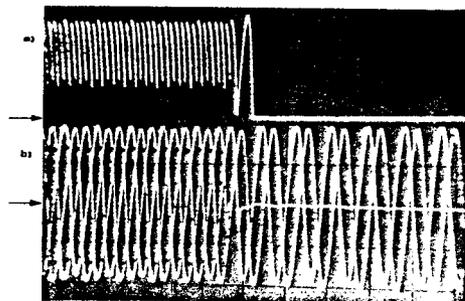


Fotografía N. 42. Operación del detector de sobrevelocidad.

- a) Velocidad
- b) Corriente de armadura

Escalas verticales:  
 Velocidad : 2 V/div.; 1 V = 150 RPM  
 Corriente : 1 V/div.; 1 V = 10 A.  
 Escala horizontal : 5 s/div.

Falta de fase AC:



Fotografía N. 40. Operación del detector de falta de fase.

- a) Voltaje de armadura
- b) Voltajes de fase de la red

Escalas verticales:  
 Voltaje de armadura: 50 V/div.  
 Voltaje AC de fase : 50 V/div.  
 Escala horizontal : 20 ms/div.

RENDIMIENTO DEL SISTEMA

Las mediciones fueron realizadas con el equipo operando sobre la máquina de 2 KW a sus condiciones nominales, obteniéndose los siguientes resultados:

$$\begin{aligned} \text{Rendimiento} &= \frac{\text{Potencia salida (w)}}{\text{Potencia entrada (w)}} \\ &= \frac{1890 \text{ w}}{2300 \text{ w}} = 0.82 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Factor de utilización} &= \frac{\text{Potencia salida (w)}}{\text{Pot. aparente entrada (VA)}} \\ &= \frac{1890 \text{ w}}{2692 \text{ VA}} = 0.702 \text{ w/VA} \end{aligned}$$

## CONCLUSIONES

El sistema construido cumple satisfactoriamente - los requisitos planteados por las normas NEMA/NFPA 70-1981 para los sistemas de conversión estática de energía. Esto lo han demostrado los resultados obtenidos en las pruebas realizadas.

El sistema opera con total inmunidad a las interferencias y el ruido eléctrico presente en las líneas de alimentación AC, provocadas por la conmutación de los tiristores. Esto se ha logrado gracias a que los voltajes de línea y los voltajes fase neutro reproducidos en los circuitos de disparo presentan formas de onda libres de interferencia ya que son el resultado de una resta analógica entre los voltajes ánodo - cátodo de cada tiristor. De este modo los transitorios de cada fase se cancelan entre sí y no se reflejan en el circuito de control.

En cuanto a la técnica de compensación de la característica de los convertidores, implementada en los circuitos de disparo, se debe destacar que se ha conseguido una linealización de la característica estática del conjunto en forma razonablemente buena. Esto ha provocado que las condiciones de operación del sistema realimentado se mantengan prácticamente invariables en todo el rango de operación, mientras el convertidor trabaje en régimen de conducción continua.

En las pruebas realizadas con el equipo se pudo comprobar que los parámetros que más afectan a la estabilidad del sistema de control son los retardos de tiempo de los sensores y transductores de las diferentes variables. Por lo tanto, resulta de enorme importancia la implementación de transductores que sean capaces de responder en forma - suficientemente rápida y que garanticen un nivel de rizado pequeño de acuerdo a las necesidades del esquema de control. Para ello, los circuitos realizados en el presente trabajo han dado resultados excelentes, desechando totalmente los filtros pasivos (R-C) tradicionalmente utilizados para el efecto, que introducen al sistema retardos que pueden afectar seriamente sus condiciones de estabilidad.

Los resultados permiten verificar las bondades del esquema de control con lazos múltiples o en cascada el cual garantiza una efectiva y rápida limita

ción de la corriente, realizando la transferencia de un lazo al otro en forma rápida y muy suave.

El equipo ha sido diseñado como un sistema didáctico que puede ser manipulado por cualquier estudiante, que ofrece seguridad y una operación confiable. Para el efecto se ha incluido todas las protecciones básicas requeridas de acuerdo a las Normas NEMA/NFPA para la operación de máquinas DC y convertidores estáticos y todas las protecciones opcionales sugeridas por las mismas normas. De acuerdo a las pruebas realizadas, se puede asegurar que el tiempo de actuación de los sistemas de protección no supera en ningún caso un ciclo de línea lo cual garantiza una efectiva protección de la máquina y del convertidor.

Para finalizar es necesario destacar los siguientes aspectos:

- Se ha construido un equipo electrónico modular con carácter didáctico que permite comprender la operación de las diferentes configuraciones de convertidores AC-DC con conmutación natural, aplicado al Sistema de Control de una Máquina de Corriente Continua.
- El equipo didáctico facilita el estudio teórico experimental de las técnicas de control clásico, utilizando básicamente un sistema de control en cascada y en forma opcional cualquiera de los esquemas tradicionales utilizados para realizar el control de una máquina DC.
- Las características de operación conseguidas y los sistemas de protección implementados permiten afirmar que el equipo está al mismo nivel técnico de cualquier sistema de carácter industrial para manejo de máquinas eléctricas.
- Se ha podido comprobar que el costo total de los materiales utilizado en el equipo es considerablemente más bajo (15 - 20%) que los costos de equipos didácticos con características técnicas similares y menor número de opciones, de fabricación extranjera que han sido ofertados a la Escuela Politécnica Nacional.

## TERMINOLOGIA

- $\alpha$  Angulo de activado de los tiristores.
- $\alpha_{max}$  Máximo valor de  $\alpha$ .
- $A(\alpha)$  Ganancia dinámica de los convertidores AC-DC.

- B Coeficiente de rozamiento viscoso.
- $c_1$  Constante de f.c.e.m.
- $c_2$  Constante de torque.
- e Fuerza contra electromotriz.
- $e_0$  Voltaje nominal generado en vacfo.
- $e(t)$  Error en función del tiempo.
- f Frecuencia de la red.
- $i_a$  Corriente de armadura.
- $i_{a0}$  Corriente a rotor bloqueado.
- $i_e$  Corriente de campo.
- $i_{e0}$  Corriente nominal de campo.
- J Momento de inercia.
- $K_L$  Coeficiente para torque proporcional a la velocidad.
- $K_0$  Torque de fricción de Coulomb o de roce seco.
- $K_p$  Ganancia proporcional.
- $L_a$  Inductancia de armadura.
- p Número de pulsos del conversor.
- $\Phi_e$  Flujo de excitación.
- $\Phi_{e0}$  Flujo nominal de excitación.
- $R_a$  Resistencia de armadura.
- $R_e$  Resistencia del devanado de excitación.
- T Período.
- $T_a$  Constante de tiempo eléctrica del motor.
- $T_D$  Tiempo de acción derivativa.
- $t_D$  Tiempo de retardo.
- $t_e$  Torque eléctrico.
- $T_{e0}$  Constante de tiempo del circuito de excitación.
- $\theta$  Posición angular del rotor.  
Angulo referencial.
- $T_1$  Tiempo de acción integral.
- $t_L$  Torque de carga.
- $T_{mn}$  Constante de tiempo mecánica del motor.
- $T_0$  Torque a rotor bloqueado.
- $T_t$  Constante de tiempo del conversor estático AC-DC.
- $T_{Va}$  Constante de tiempo del sensor y transductor de velocidad.
- $V_a$  Voltaje de armadura
- $T_w$  Constante de tiempo del sensor y transductor de velocidad.
- $V_{a0}$  Voltaje nominal generado de armadura (en vacfo).
- $V_{d\alpha}$  Voltaje medio de salida de un conversor AC-DC para un ángulo de activado igual a  $\alpha$ .
- $V_{d0}$  Voltaje medio máximo de salida de un conversor AC-DC ( $\alpha = 0^\circ$ ).
- $v_e$  Voltaje aplicado al devanado de excitación.
- $V_{e0}$  Voltaje nominal de excitación.
- w Velocidad angular del motor.
- $W_0$  Velocidad angular nominal en vacfo.

BIBLIOGRAFIA

- Pelly, B., "Thyristor Phase-Controlled Converters and Cycloconverters", Wile Interscience, New York, U.S.A., 1971.
- BIRD, B. M. y KING K.G., "An Introduction to Power Electronics", John Wiley and Sons, Pitman Press LTDA., England, 1984.
- SEN P., "Thyristor D.C. Drives", John Wiley and Sons, Toronto Canadá, 1980.

BIOGRAFIA



LEDESMA, BOLIVAR. Nació en Quito, el 5 de Diciembre de 1962. Obtuvo su título de Bachiller en Humanidades Modernas en el Colegio San Gabriel de Quito (1980). Sus estudios superiores los realizó en la Escuela Politécnica Nacional, obteniendo el título de Ingeniero en Electrónica y Control en 1987. Actualmente presta sus servicios en calidad de Profesor Asistente en el Area de Control Electrónico de Potencia de la Facultad de Ingeniería Eléctrica de la Escuela Politécnica Nacional.

BANDA GAMBOA, HUGO A., nació en Quito el 7 de Julio de 1950. Obtuvo el título de Bachiller Técnico en Radiotécnia en el Colegio Central Técnico en 1968. Sus estudios superiores los realizó en la Escuela Politécnica Nacional, obteniendo el título de Ingeniero en Electrónica y Telecomunicaciones en 1975. En la Universidad de Bradford, Inglaterra luego de realizar sus estudios de Post-Grado obtuvo el título de Masted of Science in Power Electronics, en 1978. Actualmente presta sus servicios en calidad de Profesor Principal en el Departamento de Electrónica y Control de la Facultad de Ingeniería Eléctrica de la Escuela Politécnica Nacional.