

# Desarrollo de un sistema de control de posición de un Servomecanismo

I. I. Siller Alcalá<sup>1</sup>, R. Acántara Ramírez<sup>1</sup>, J. Jaimes Ponce<sup>1</sup>, R. Rodríguez Ruiz<sup>1</sup>,  
J. Cinco Galicia<sup>1</sup> E. Ruiz May<sup>1</sup>

<sup>1</sup> UAM Azcapotzalco, Div. de CBI, Depto. de Electrónica, Grupo de Control de Procesos,  
Av. San Pablo No. 180, Col. Reynosa Tamaulipas, Del. Azcapotzalco,  
C. P. 02200 México, D. F., México

{sai, raar, jjp}@correo.azc.uam.mx

**Abstract.** In this paper the development of a position control system of a servomechanism is presented. The servomechanism consists of a cart which slides on a ground stainless steel shaft. The control system is composed a data acquisition card AD/DA, with resolution of 12 bits and transmission velocity of 3500 samples/second, a power stage composed of two power supply used in order to provide the necessary energy to the data acquisition card, position sensor and the cart motor and a power amplifier and finally graphic interface developed in Microsoft Visual Basic 6.0, which allows the variables visualization and the changes of set point and controller parameters.

**Key words.** Automatic Control, Real Time, Data Acquisition, Virtual Control

**Resumen.** En este trabajo se presenta el desarrollo de un sistema de control de posición de un carrito que se desliza sobre un riel dentado. El sistema de control está compuesto por una tarjeta de adquisición de datos AD/DA con una resolución de 12 bits y velocidad de transmisión de 3500 muestras/ segundo, una etapa de potencia para la alimentación de la tarjeta de adquisición de datos, del sensor de posición y del motor del carrito y un amplificador de potencia y por último una interfaz gráfica desarrollada en Microsoft Visual Basic 6.0, con la cual será posible la visualización de las variables y el cambio de set point y parámetros del controlador.

## 1 Introducción

El control automático tiene como objetivo, construir un sistema, tal que las variables de interés (variables controladas) se comporten en la forma deseada, aún bajo perturbaciones externas e internas. Esto es llevado a cabo, mediante la manipulación de sus variables de entrada (variable de control ó manipulada). El primer requisito de un sistema de control es que tenga un comportamiento estable. Un segundo requisito es que tenga un comportamiento aceptable, es decir, que el error entre la salida y la en

trada de referencia sea aceptablemente pequeño con una velocidad de respuesta adecuada, así como una presencia reducida de oscilaciones. En el laboratorio de control de procesos, el control virtual como Matlab (Simulink, Real Time Workshop y el

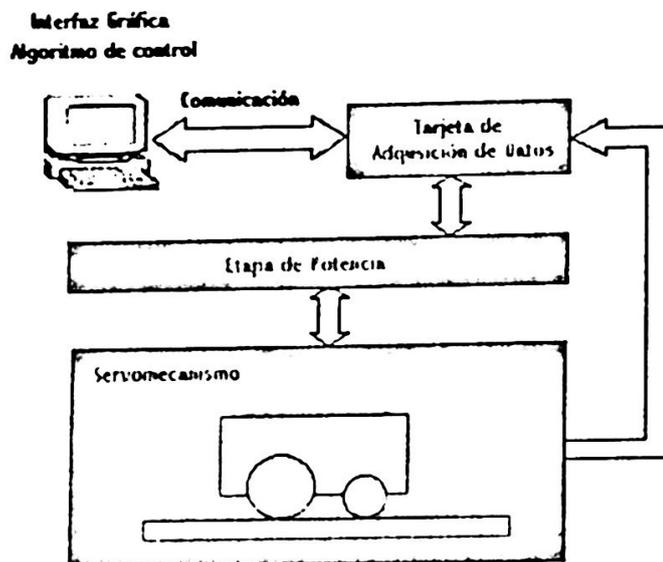


Fig. 1. Sistema de Control de posición para un servomecanismo.

Windows Tarjet) [1] y el Genie, han facilitado la implantación del control moderno y clásico [2], [3], [4] y [5], la amigable interacción entre el usuario y el proceso, permiten, la concentración del usuario en el análisis y diseño del control. El Grupo de Control de Procesos, se ha caracterizado por el desarrollo de prototipos de gran utilidad para el enlace de la teoría de control y la práctica. Este proyecto, es la primera etapa para la construcción de un sistema péndulo invertido, en esta etapa se ha logrado desarrollar la parte de adquisición de datos, la etapa de potencia, la implantación del algoritmo de control de posición y la interfaz gráfica para el carrito. El servomecanismo usado en este trabajo es de la marca Quanser Consulting [6], este consiste de un carrito, el cual se desliza sobre una barra guía lisa, por medio de un motor. El objetivo es desplazarlo a la posición especificada, cumpliendo con los requisitos mencionados arriba. Para lograr este objetivo es necesario lo siguiente: desarrollar una Etapa de Potencia que alimentará el motor, adquirir los datos como la posición y transferirlos a la PC, para que esta los procese a través del algoritmo de control y la señal de control (voltaje) sea recibida por el motor (ver Fig. 1), este artículo presenta el desarrollo de las partes del sistema de control de posición para el servomecanismo.

## 2 Descripción del Servomecanismo

El servomecanismo consiste en un carro deslizable sobre un riel dentado el cual esta equipado con un motor de corriente directa y un potenciómetro, acoplados al riel mediante engranajes tal como lo muestra la figura 2. El motor proporciona la fuerza necesaria para el movimiento del carro, mientras que el potenciómetro proporciona la coordenada de posición del carro sobre el riel. La posición del carro sobre el riel es la única variable que se necesita medir para la implementación del algoritmo de control.

El eje del motor está acoplado a un engrane de 0.5" de diámetro, mientras que el eje del potenciómetro se encuentra acoplado a un engrane de 1.25" de diámetro. Cuando el motor gira, el par creado en el eje de salida se transforma en una fuerza lineal, la cual origina un desplazamiento del carrito. Cuando el carrito se mueve, el eje del potenciómetro gira y el voltaje medido en sus terminales puede ser calibrado para obtener la posición del carrito dentro del riel dentado. El voltaje aplicado del motor está determinado por el control programado en la PC.

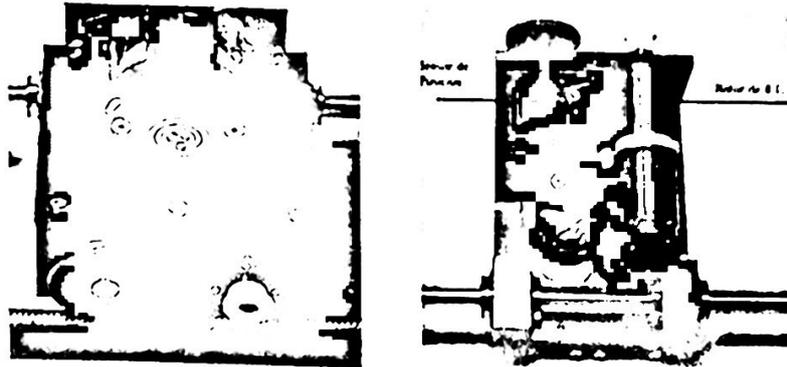


Fig. 2. Vista superior e inferior del servomecanismo.

### 3 Modelo Matemático

La función de transferencia del servomecanismo está dada por [7]:

$$\frac{x}{V} = \frac{1}{s(0.26s + 4.47)} \quad (1)$$

Siendo  $V$  el voltaje de alimentación del motor y la ecuación que describe el control de posición es la siguiente:

$$V = K_p(x_d - x) - K_d \dot{x} \quad (2)$$

resultando así una función de transferencia de lazo cerrado de la siguiente forma:

$$\frac{x}{x_d} = \frac{K_p}{0.26s^2 + (4.47 + K_d)s + K_p} \quad (3)$$

La respuesta deseada tiene un tiempo pico de 0.5 segundos con  $\zeta = 0.707$  de tal manera que:  $K_p = 0.83$  V/cm y  $K_d = 0.02$  V seg/cm. Para llevar a cabo la derivada de la posición, se utilizó una aproximación

$$\frac{d}{dt} x(t) \approx \frac{x(kT) - x(kT - T)}{T} \quad (5)$$

#### 4 Tarjeta de Adquisición de Datos

El bloque de adquisición de datos consta de un microcontrolador, dos convertidores analógico-digital y un convertidor digital-analógico. Este bloque recibe la señal analógica (posición del carro) del sensor, para calcular la señal de control en la PC y enviarla al servomecanismo. La digitalización de las señales analógicas (posición y ángulo, esta última para un futuro) se realiza mediante los convertidores A/D y la conversión de la palabra digital de control a voltaje se realiza por medio del convertidor D/A. El microcontrolador se encarga de transmitir a la PC los datos obtenidos de los convertidores A/D y escribir la palabra de control al convertidor D/A. En la figura 3 se muestra un diagrama a bloques del sistema de adquisición de datos. Debido a que la señal analógica entregada por el sensor de posición varía en un rango de  $\pm 12V$  y para lograr una mayor precisión en las mediciones se optó por convertidores analógico/digital con entrada bipolar AD674B del fabricante Analog Devices [10], el cual tiene un tiempo de conversión de  $15 \mu s$ , es compatible con el procesador y una resolución de 122 bits. Obteniéndose para una longitud de 89 cm. una resolución de 217.28

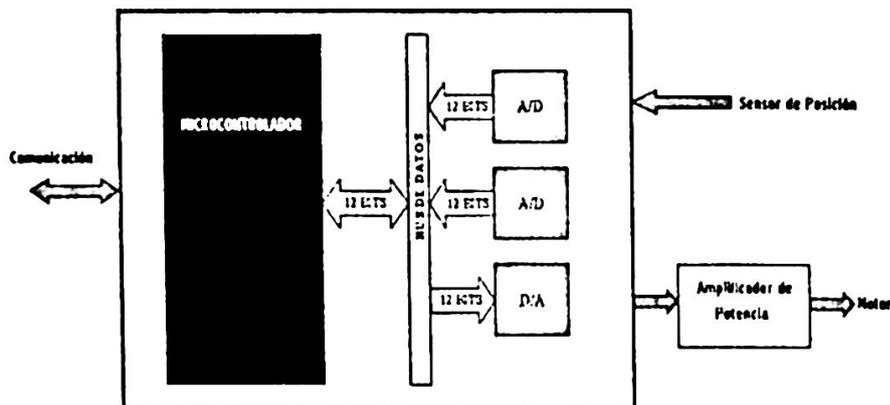


Fig. 3. Tarjeta de adquisición de datos

$\mu m/bit$ . De igual manera, para lograr el movimiento del servomecanismo en ambas direcciones, la tarjeta desarrollada contiene un convertidor digital/análogo AD667 fabricado también por Analog Devices [10] con voltaje de salida bipolar de  $\pm 5V$  que garantiza el movimiento en ambas direcciones del motor DC cuyo voltaje máximo es de  $\pm 6V$ . El convertidor tiene una resolución de 12 bits, un tiempo de conversión de  $\mu s$  y es compatible con el procesador. Como cerebro, la tarjeta contiene el microcontrolador AVR AT90S8535 fabricado por ATMEL [9] cuyas características más importantes son: 32 líneas de Entrada/Salida programables divididas en 4 puertos (A,B,C y D) de 8 bits, 8KB de memoria Flash programable y una arquitectura RISC capaz de ejecutar hasta 8 millones de instrucciones por segundo con un reloj de 8MHz. Este microcontrolador se eligió, tomando en cuenta el número de puertos necesarios para poder manejar los dos convertidores A/D, el convertidor D/A, las líneas de control para cada uno de ellos, el bus de datos de la computadora y las líneas de protocolo en la comunicación con la PC. Para optimizar el uso de los puertos del microcontrolador, se maneja un bus de datos de 12 bits común para los dos convertidores A/D y el convertidor D/A. El manejo de los tres convertidores se realiza por medio de un multi-

plexaje en tiempo del bus, es decir, únicamente se habilita un convertidor a la vez, evitando así colisiones de datos en el bus y daños en los dispositivos. La figura 4 muestra un ejemplo del manejo del bus de datos con respecto al tiempo.

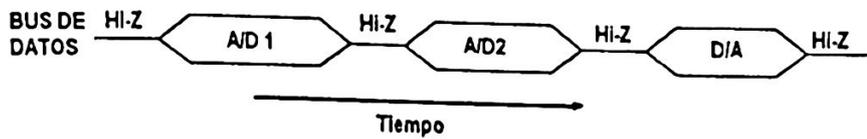


Fig. 4. Distribución de tiempo en el manejo del bus de datos.

El momento de habilitación de cada convertidor esta definido por el flujo del programa del microcontrolador al adquirir los datos. El programa del microcontrolador se encarga de controlar los ciclos de lectura y conversión tanto de los convertidores A/D como del convertidor D/A y las rutinas de comunicación con la PC por medio de ciclos de adquisición. La figura 5 muestra el diagrama de flujo de la estructura de un ciclo de adquisición programado en el microcontrolador. El primer paso que la tarjeta realiza es un ciclo de conversión y lectura del convertidor A/D para obtener la posición del carro, seguido por la transmisión de los datos adquiridos a la PC. La PC realiza el cálculo del control con los datos recibidos y lo envía a la tarjeta. El microcontrolador recibe el control y lo aplica al motor por medio de un ciclo de escritura al convertidor D/A.

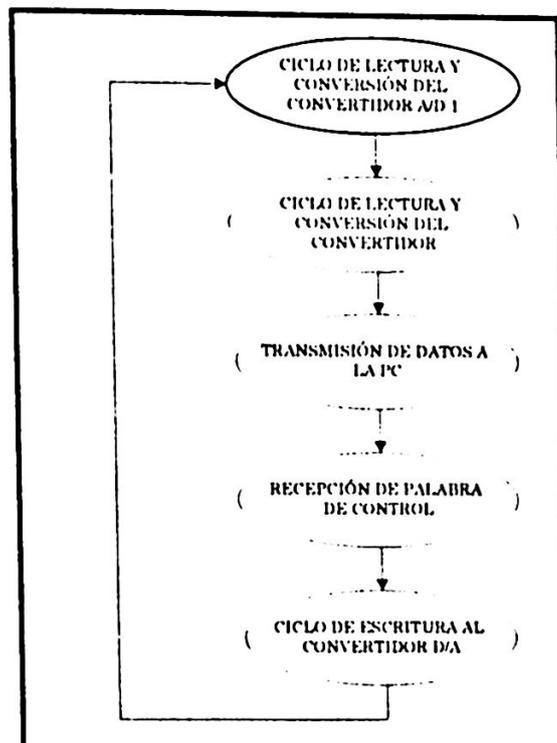


Fig. 5. Ciclo de adquisición del microcontrolador.

La comunicación con la PC del sistema de adquisición de datos se realizó por medio del puerto paralelo en modo bidireccional. La ejecución de un programa en la PC es mucho más rápida que en el microcontrolador. El protocolo de comunicación que el

sistema tiene, está estructurado de tal manera que se puedan asegurar tanto la coherencia de los datos como la dirección correcta del bus de datos.

#### 4.1 La Interfaz Gráfica

Para la implementación del control el sistema cuenta con una interfaz gráfica en donde el usuario puede cambiar el valor de los parámetros de control y visualizar el comportamiento del sistema en forma gráfica, esta se desarrolló en *Microsoft Visual Basic 6.0* [8]. La interfaz gráfica permite visualizar la posición del carrito, la magnitud del voltaje de la señal de control, el error en la posición y las gráficas de posición y velocidad; también hace posible que el usuario pueda establecer la referencia a alcanzar, las constantes de la ecuación de control  $K_p$  y  $K_d$  y el intervalo de tiempo en que se quiere visualizar la gráfica. La figura 6 muestra la interfaz gráfica.

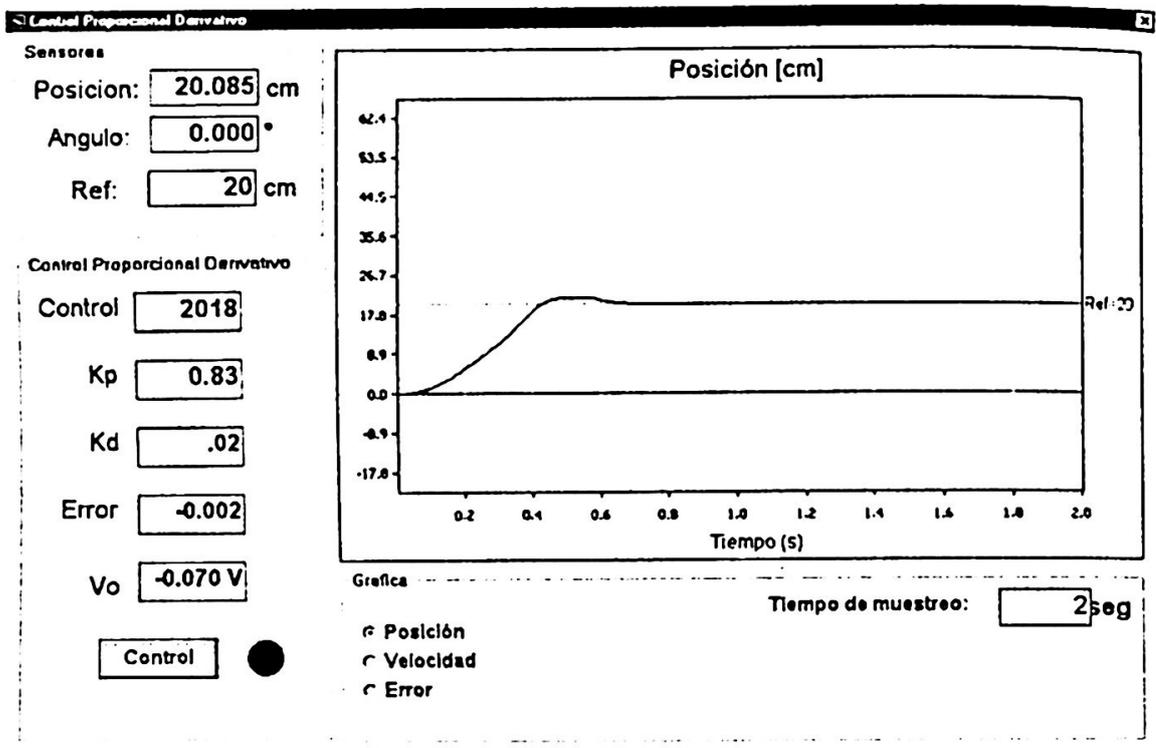


Fig. 6. Interfaz gráfica y gráfica de la posición del carrito siendo la referencia 20 cm.

Elementos de la Interfaz Gráfica:

**Posición.** Indica la posición del carrito.

**Ángulo.** Indica el ángulo de la barra del péndulo (En esta primera etapa de control este campo no se considera).

**Referencia.** Posición deseada.

**Señal de Control.** Indica la magnitud de la señal de control en código binario.

**Constante de proporcionalidad.** Campo para establecer el valor de la constante de proporcionalidad (0.83 por defecto)  $K_p$ .

**Constante derivativa.** Campo para establecer el valor de la constante derivativa  $K_d$ .

**Error.** Muestra el error de la posición respecto a la referencia.

**Voltaje de salida.** Indica la magnitud del voltaje de la señal de control.

**Inicio/Paro del control.** Activa o detiene el algoritmo de control.

*Indicador de actividad.* Este indicador cambia a color verde intermitente cuando es sistema está activo y a rojo cuando está detenido

*Selección de gráfica.* Selecciona la variable que se desea visualizar: posición, velocidad o error.

*Tiempo de muestreo.* Establece el tiempo que será mostrada la variable indicada en el campo 'Selección de gráfica'.

*Área de gráfica.* Al término del proceso, muestra la gráfica de la variable seleccionada.

## 4.2 Implementación del control

El diagrama de flujo del control de posición del servomecanismo se muestra en la figura 7. Este sensor de posición devuelve una palabra digital proporcional a la posición del carro y el bloque de polarización BIAS establece la posición 0 (origen) del sistema al momento de que este se enciende. Cuando el sistema se enciende, las lecturas del sensor se almacenan en memoria por un lapso de tiempo mayor a 10 ms mientras se estabiliza la lectura, transcurrido dicho intervalo, la última lectura queda guardada en memoria y se restará a las siguientes lecturas del sensor dando como resultado que todas las mediciones estén referenciadas al valor guardado en memoria. Podemos ver de la figura 6 que la respuesta es buena y que coincide con lo que se esperaba según la teoría de control, tiene un tiempo pico de .5 seg., como se mencionó en la sección 3. También es posible analizar la acción de la parte proporcional y derivativa.

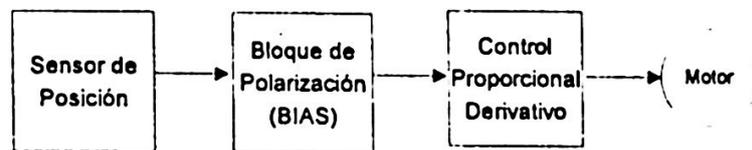


Fig. 7. Diagrama a bloques del control de posición del carrito.

## 5 Etapa de Potencia

El sistema cuenta además con una etapa de potencia, la cual consta de dos etapas distintas: dos fuentes de alimentación y un amplificador de potencia. La primera es una fuente de 5V a 1A, cuya función es la de alimentar todos los circuitos integrados contenidos dentro de la tarjeta de adquisición de datos. La segunda es una fuente bipolar de  $\pm 12V$  a 3A que proporciona, el voltaje necesario al sensor de posición y al motor del carro. Otra función de esta fuente es alimentar a los convertidores A/D y D/A. La segunda etapa consiste en un amplificador de voltaje con ganancia unitaria y con una salida de corriente de hasta 2A suficiente para garantizar el funcionamiento adecuado del motor de DC. El motor necesita una alimentación bipolar para ir de un sentido a otro; por este motivo la tarjeta cuenta con un controlador de motor implementado con una configuración de transistores, como lo muestra la siguiente figura.

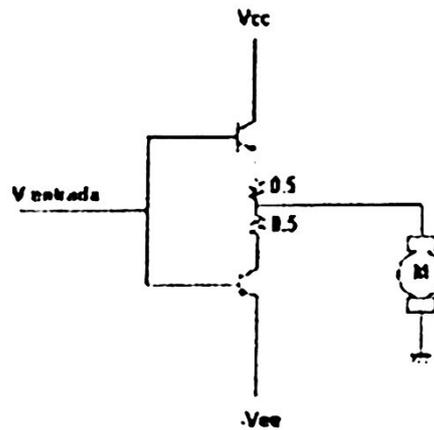


Fig. 8. Controlador del sentido del motor.

## 6 Conclusiones

En este trabajo se presenta el desarrollo de un sistema de control de posición de un carrito, el cual consiste una tarjeta de adquisición de datos, la etapa de potencia que alimentará el motor del carrito, la implantación del algoritmo de control de posición la interfaz gráfica con el usuario, la cual es muy amigable, ya que permite cambiar los valores de los parámetros del controlador y la referencia en una forma muy sencilla. Además de permitir la visualización del error entre la posición del carrito y la referencia, así como también la posición y la velocidad del carrito. Este trabajo, es la primera etapa para la construcción de un sistema de control de posición de un péndulo invertido, el objetivo de este control es llevar al carrito, a una posición deseada, manteniendo en posición vertical la varilla (péndulo invertido) montada en el cochecito. péndulo invertido es un sistema no lineal muy interesante, ya que presenta las características de inestabilidad y ser de fase no mínima. Pero esta primera etapa podrá servir de apoyo a los estudiantes, para encontrar un equilibrio entre la teoría y la práctica, así también encontrar acceso a la tecnología actual, como es el control virtual. Consideramos que desde el punto de vista pedagógico, será mas estimulante y valioso para estudiante, controlar un proceso en tiempo real, el cual brindará valiosas experiencias, como conocer el efecto del ruido, efectos no lineales, visualizar la retroalimentación, etc., en cambio llevar a cabo simulaciones, su aportación será limitada, ya que solo reforzará los conceptos teóricos.

## Referencias

1. The MathWorks Inc, <http://www.mathworks.com>.
2. Siller-Alcalá I. I., Jaimes Ponce J., Alcántara R., Fajardo V. Bernal G.: Sistema de adquisición de datos y software de control de sistemas, en simulación y tiempo real. SOMI XVII Congreso de Instrumentación, Mérida, Yucatán Octubre 2002.
3. Siller-Alcalá I. I., Jaimes Ponce J., Alcántara R., Fajardo Pérez O. : Control y estudio de un módulo de transferencia de calor usando el Real Time Worksho de Matlab., XIV Reunión de Verano de Potencia, Aplicaciones Industriales y Exposiciones Industriales IEEE Sección México, Acapulco Guerrero 2001.

4. Siller-Alcalá I. I., Jaimes Ponce J., Ocampo A., Sánchez E.: Control de Posición en Tiempo Real de un Péndulo Invertido, SOMI XVI Congreso de Instrumentación, Querétaro, Octubre 2001.
5. Siller-Alcalá I. I., Jaimes Ponce J., Alcántara R., Fajardo V. Bernal G.: Controles Predictivos de temperatura en simulación y tiempo real. SOMI XVIII Congreso de Instrumentación, México, D. F. Octubre 2003.
6. Quanser Consulting Inc. <http://www.quanser.com>
7. A comprehensive and modular laboratory for Control System Design and Implementation, Experimental Workstations for Feedback Control Education, Quanser Consulting Inc.
8. Microsoft Visual Studio 6.0 Professional Edition <http://msdn.microsoft.com/>.
9. Atmel Company . <http://www.atmel.com>
10. Analog Devices <http://www.analog.com>

## Anexo

Se presentan los diagramas electrónicos de las etapas que conforman este trabajo.

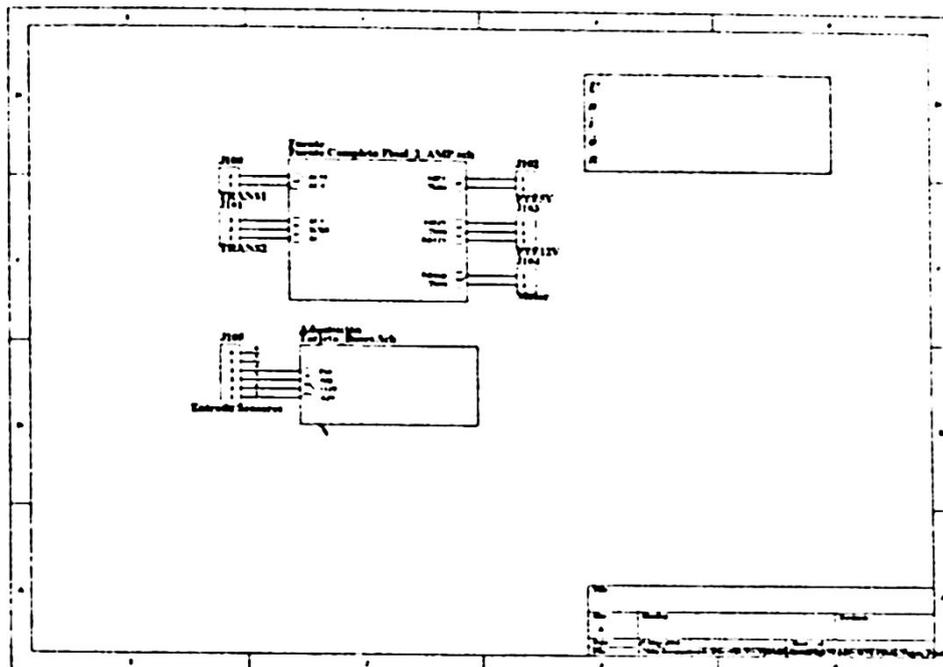


Fig. 9. Unión de la tarjeta de adquisición de datos y etapa de potencia

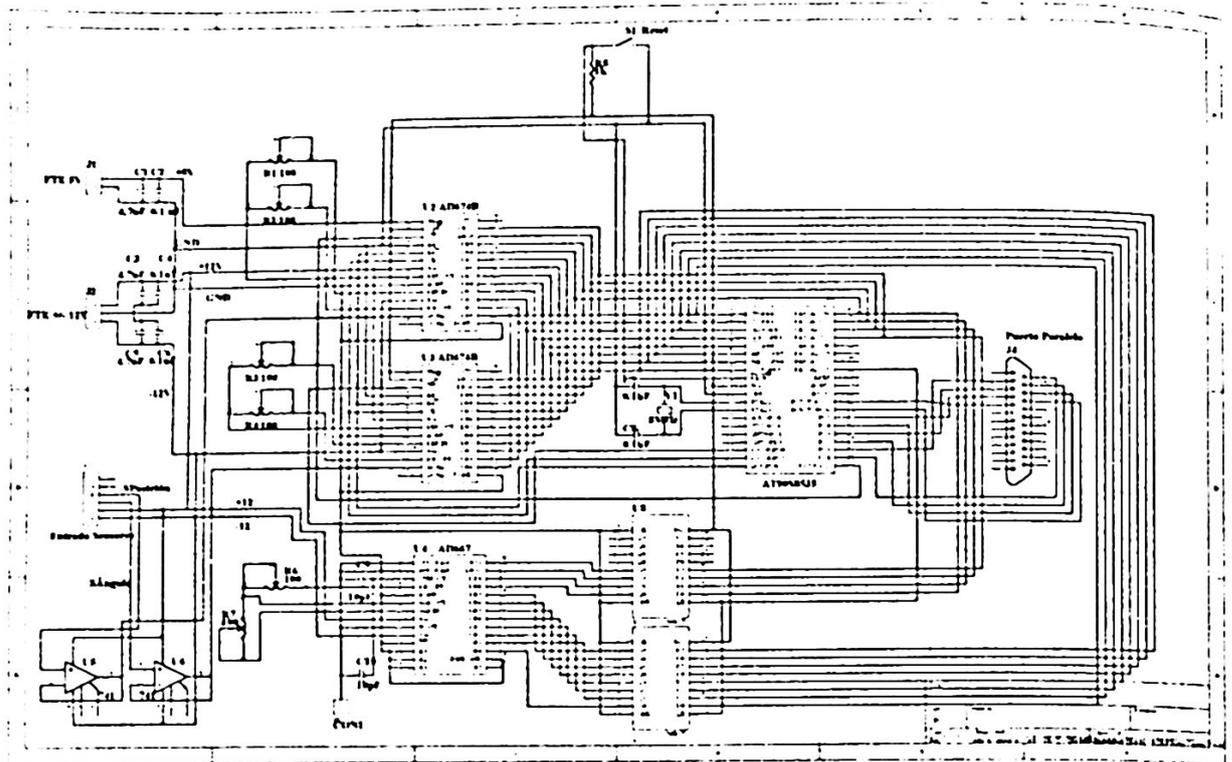


Fig. 10. Tarjeta de adquisición de datos.

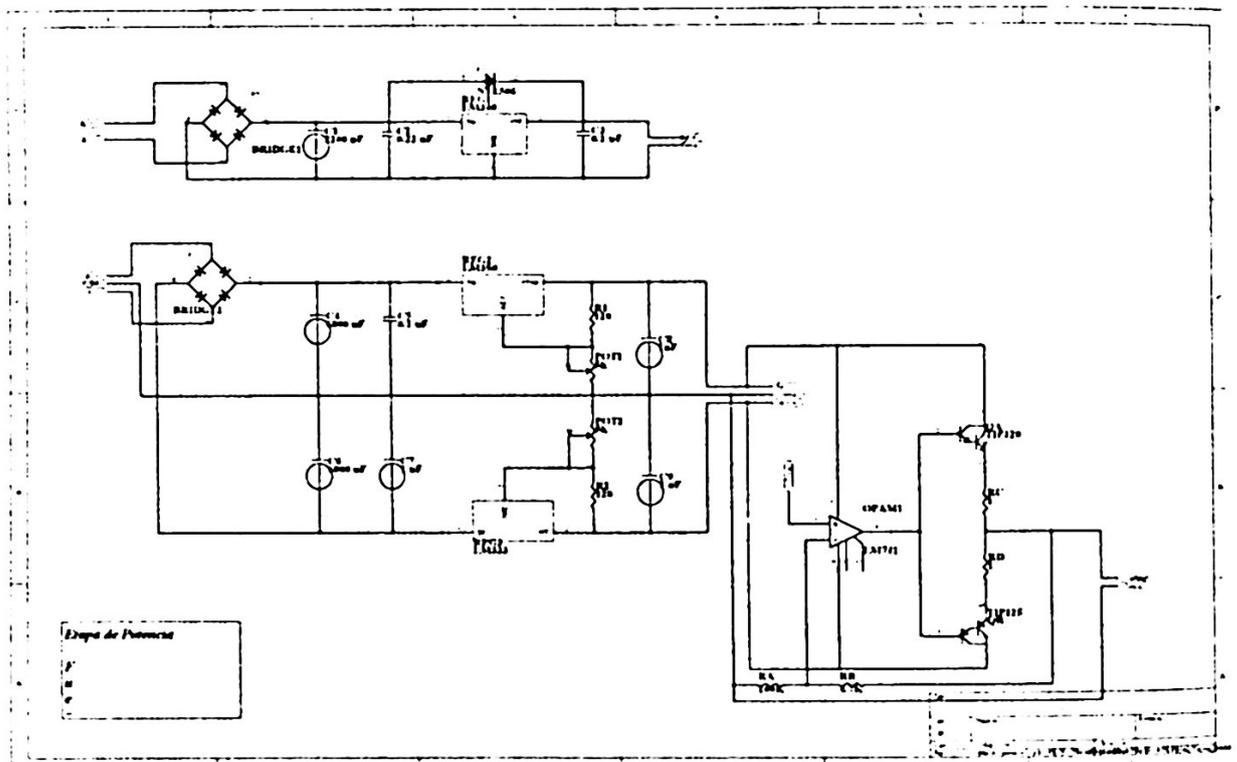


Fig. 11. Etapa de potencia.