

# CONTROL DE POSICIÓN Y PRESIÓN PARA MANIPULADOR NEUMÁTICO A TRAVÉS DE PC

## RESUMEN

El trabajo se basa en la obtención de un sistema de posicionamiento servoneumático, con control de presión del dispositivo de trabajo en la posición de operación, todo esto, gobernado por computador (PC). Para controlar posición y presión se han diseñado controladores PID discretos. Se utiliza una tarjeta de adquisición de datos Lab PC-1200 de National Instruments, y el software LabVIEW, para implementar programas que sirven para la adquisición de datos a través de los diferentes sensores y que son llevados al PC para su procesamiento. Con este sistema se pueden fijar posiciones intermedias a lo largo de un eje de forma muy precisa. La automatización de procesos como: remachado, perforado, estampado, pueden ser perfectamente desarrollados con este sistema propuesto.

**PALABRAS CLAVES:** Posicionamiento servoneumático, control PID discreto

## ABSTRACT

*The work pretend to obtain a servopneumatic position system, with pressure control of the work device in the operation position, all this, governed by computer (PC). In order to control position and pressure, PID discrete controllers have been designed. A card of data acquisition Lab PC-1200 of National Instruments, and the software LabVIEW is used, to implement programs for data acquisition through the different sensors and carried out to the PC for its processing. With this system is possible fix intermediate positions along an axis in a very precise way. The automation of processes like: riveted, perforated, printing, can be perfectly developed with this proposed system.*

**KEYWORDS:** *Servopneumatic position, PID discrete control.*

## 1. INTRODUCCIÓN

Los sistemas neumáticos se utilizan mucho en la automatización de maquinaria de producción y en el campo de los controladores neumáticos. Procesos como: remachado, perforado, estampado, etc., pueden ser perfectamente automatizados utilizando neumática, siempre y cuando pueda conseguirse un sistema de posicionamiento múltiple.

Adelantos en tecnología electroneumática han dado por resultado una clase de actuadores proporcionales servo neumáticos controlados electrónicamente y que han sido probados en sistemas de automatización ofreciendo una solución económica.

La principal ventaja de un sistema servoneumático moderno es su economía y simplicidad cuando se compara con otras tecnologías de presentación

equivalente. Los componentes neumáticos no incrementan en precio tan rápido como lo hacen los motores eléctricos.

La compañía alemana FESTO, afirma en uno de sus boletines\* que los sistemas servoneumáticos pueden cumplir los requisitos de exactitud exigidos por más del 80% de las aplicaciones que conllevan un control de posición.

La servoneumática es más ventajosa cuando se tienen carreras largas de los vástagos y alta velocidad. La aparición de actuadores lineales sin vástago, controlados mediante válvulas proporcionales de vías, ha ampliado las posibilidades de aplicaciones en la industria.

---

\* Servopneumatic Precision Positioning. FESTO

**JUAN CARLOS BURBANO  
JARAMILLO**

Profesor Asistente, M.Sc., I.M.  
Facultad de Ingeniería Mecánica.  
Universidad Tecnológica de Pereira  
e-mail: [jburbano@utp.edu.co](mailto:jburbano@utp.edu.co)

**GERMÁN A. BACCA BASTIDAS**

M.Sc., I.M.  
Profesor Ingeniería Física  
Universidad del Cauca  
e-mail: [gbacca@unicauca.edu.co](mailto:gbacca@unicauca.edu.co)

**MARIO HOYOS MESA**

Profesor Titular, M.Sc., I.M.  
Facultad de Ingeniería Mecánica.  
Universidad Tecnológica de Pereira  
e-mail: [marhoyos@utp.edu.co](mailto:marhoyos@utp.edu.co)

Entre los recursos tecnológicos existentes actualmente en el mercado para el posicionamiento neumático, cabe mencionar los componentes y sistemas desarrollados, entre otros, por FESTO. Este Fabricante ofrece los controladores de ejes SPC100 y SPC200 que pueden controlar uno o dos ejes y usando un sub-controlador, el control se puede ampliar hasta cuatro ejes.

En el manipulador neumático, propuesto en este trabajo, también se podría controlar varios ejes haciendo modificaciones muy sencillas al programa (software), aunque teniendo en cuenta la capacidad de la tarjeta de adquisición de datos, por el número de salidas análogas. Esto podría ser una limitante para el número de ejes a controlar.

Cabe mencionar, que la tecnología de las válvulas proporcionales no solo se aplica a los sistemas de posicionamiento sino también a la regulación de fuerzas a través de las válvulas proporcionales de presión. La compañía FESTO, también ha desarrollado este tipo de válvulas, entre las que sobresalen las referenciadas a través de la sigla MPP\* con la cual identifican el modelo correspondiente y a través de las cuales se logra un ajuste del nivel de presión proporcional al valor de consigna (señal de tensión analógica de 0 – 10 V) e independiente del caudal.

El manipulador neumático propuesto en este trabajo, utiliza una válvula proporcional de presión para controlar la fuerza de un dispositivo de trabajo en una posición de operación.

Las afirmaciones y desarrollos antes mencionados permiten considerar la servoneumática como una tecnología creciente y en continuo desarrollo. Por esta razón, en el departamento de sistemas dinámicos y control de la Facultad de Ingeniería Mecánica de la Universidad Tecnológica de Pereira, se consideró el diseño de una Unidad Neumática Lineal (UNL) que consistiría de dos actuadores lineales, uno de ellos sin vástago y controlado por una válvula proporcional de vías para posicionar una herramienta y otro al que se le regularía la fuerza mediante una válvula proporcional de presión con el fin de aplicarla a una pieza de trabajo. Por tanto, esta unidad Neumática Lineal (UNL) tendría control de fuerza en el dispositivo de trabajo o herramienta, en una posición de operación.

## 2. UNIDAD NEUMÁTICA LINEAL.

El sistema que se propone para este proyecto ha sido llamado Unidad Neumática Lineal (UNL) por estar constituido básicamente por actuadores lineales

neumáticos entre otros componentes. Este sistema, tiene la tarea de ejercer una fuerza en un punto determinado a lo largo de un eje, tarea que se gobierna desde un computador PC.

Para cumplir con su objetivo, la Unidad Neumática Lineal (UNL) está constituida por los siguientes dispositivos:

- 1 Actuador neumático lineal compacto sin vástago tipo DGPL-25-PPVA de FESTO®
- 1 Cilindro de doble efecto tipo DSN – 25 – 100 de FESTO®
- 1 Válvula distribuidora proporcional 5/3 vías tipo MPYE – 5 – 1/8 de FESTO®
- 1 Válvula reguladora de Presión tipo MPP – 3 – 1/8 de FESTO®
- 1 Sensor de Presión ICSensors modelo 105-100G
- 1 Sensor de posición tipo MLO – POT de FESTO®
- 1 Filtro tipo LFM –1/4- S-B de FESTO®

En el anterior listado no se incluye la parte correspondiente a la adquisición de datos y control de la unidad neumática lineal, que serán descritos mas adelante.

Todos los componentes detallados anteriormente, se acoplan para formar lo que se denominará la Unidad Neumática Lineal (UNL).

Una representación isométrica de la Unidad Neumática Lineal se presenta a continuación en la figura 1.

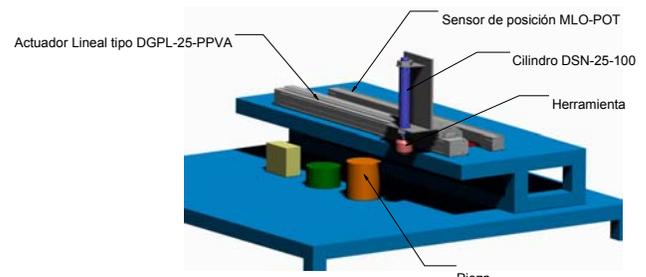


Figura 1 Representación Isométrica de la UNL

## 3. SISTEMA DE ADQUISICIÓN DE DATOS

Para lograr la comunicación entre la Unidad Neumática Lineal (UNL), descrita en la sección anterior, y el computador (PC), es indispensable un sistema de adquisición de datos, representado principalmente por una tarjeta de adquisición Lab PC-1200 de National Instruments™ y de un circuito de adecuación de señales con el fin de lograr los rangos de corriente y voltaje adecuados para que los dispositivos de control operen adecuadamente.

\* Válvulas proporcionales neumáticas. FESTO AG & Co. Info 159.2001

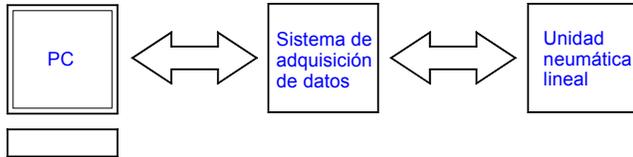


Figura 2 Esquema del sistema de adquisición de datos.

La tarjeta labPC 1200 de National Instruments se utiliza en este proyecto para la interacción de datos entre el computador y la Unidad Neumática Lineal haciendo las veces de circuito de muestreo y retención, convertidor analógico-digital (A/D) y convertidor digital-analógico (D/A) y permite trabajar con un tiempo de muestreo que satisface las condiciones de la teoría de muestreo de Nyquist\*. Una importante ventaja de esta tarjeta es su bajo costo, con una rata de adquisición de datos considerable.

Un diagrama funcional que ilustra la forma como las variables son procesadas a través del sistema de adquisición de datos, así como los diferentes dispositivos que lo componen, se presenta en la figura 3.

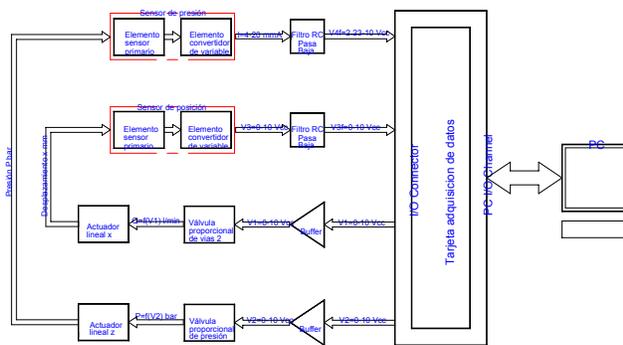


Figura 3 Diagrama Funcional del Sistema de Adquisición de Datos

#### 4. IMPLEMENTACIÓN DE LOS CONTROLADORES

La implementación de los controladores que gobernarán la posición y la presión de trabajo de la Unidad Neumática Lineal (UNL), está basada en el diseño de controladores PID.

En el controlador PID (tanto para presión como para posición), la variable de referencia  $R$  o *setpoint* se compara con la variable controlada  $C$  para obtener el error

$$e = R - C \tag{1}$$

Para minimizar el efecto del ruido se hace un filtrado a la variable controlada. La variable controlada filtrada se calcula de la siguiente manera:

$$C_f = 0.5C - 0.25C(k-1) - 0.175C(k-2) - 0.075C(k-3) \tag{3}$$

El modelo práctico del controlador PID es:

$$m(t) = K_p \left[ (\beta R - C) + \frac{1}{T_i} \int_0^t (R - C) dt - T_d \frac{dC_f}{dt} \right] \tag{4}$$

$T_i$  es el tiempo de integración en minutos (también llamado *reset time*), y  $T_d$  es el tiempo derivativo en minutos (también llamado *rate*)\*.

La salida del controlador en tiempo discreto, es la suma de las acciones proporcional, integral y derivativa\*:

$$m(k) = m_p(k) + m_i(k) + m_d(k)$$

donde:

$$m_p(k) = [K_p e_b(k)]$$

$$m_i(k) = \frac{K_p}{T_i} \sum_{i=1}^k \left( \frac{e(i) + e(i-1)}{2} \right) \Delta t \left[ \frac{1}{1 + \frac{10e(i)^2}{R_{mg}^2}} \right]$$

$R_{mg}$  es el rango de la variable de referencia

$$m_d(k) = -K_p \frac{T_d}{\Delta t} [C_f(k) - C_f(k-1)]$$

De tal manera que la acción correctora queda dada por:

$$m(kT) = k_p \left\{ \begin{aligned} & e_b(kT) + \frac{T}{T_i} \sum_{h=1}^k \left( \frac{e(h) + e(h-1)}{2} \right) T \left[ \frac{1}{1 + \frac{10e^2(kT)}{R_{mg}^2}} \right] - \\ & T_d [C_f(kT) - C_f(k-1)T] \end{aligned} \right\} \tag{5}$$

Tomando transformada  $Z$  y adecuando la anterior ecuación, se tiene que:

\* Ogata, Katsuhiko. Sistemas de Control en Tiempo Discreto. Segunda Edición. Prentice-Hall. 1996.

\* PID Control Toolkit for G. Reference Manual. Bridge VIEW and LabVIEW. National Instruments Corporation. 1998.

$$M(z) = M_o + k_p \left\{ \begin{aligned} & E_b(z) + \frac{T}{T_i} \frac{1+z^{-1}}{2(1-z^{-1})} E(z) \left[ \frac{1}{1 + \frac{10E(z)^2}{R_{mg}^2}} \right] \\ & \frac{T_d}{T} [1-z^{-1}] C_f \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

Organizando la ecuación (6), se tiene:

$$M(z) = M_o + \left\{ \begin{aligned} & k_p E_b(z) + k_i T \frac{1+z^{-1}}{2(1-z^{-1})} E(z) \left[ \frac{1}{1 + \frac{10E(z)^2}{R_{mg}^2}} \right] \\ & \frac{k_d}{T} [1-z^{-1}] C_f \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

Hay que anotar que, para la implementación del controlador de presión no se necesita hacer ningún tipo de ajuste a la salida, ya que la señal correctora se encuentra en el rango de funcionamiento de la señal de voltaje de la válvula reguladora de presión.

Para la implementación del controlador de posición es necesario tener en cuenta el funcionamiento de la válvula distribidora proporcional que opera con voltajes que varían entre 0 y 10 V, pero teniendo en cuenta que para voltajes entre 0 y 5V la válvula permite el paso de aire por uno de sus pórtilos, pero entre 5 y 10 V el paso de aire se hace por el otro pórtilo de trabajo. Para un valor de 5 V la válvula se cierra no permitiendo el paso de aire por ninguno de sus pórtilos.

Teniendo en cuenta lo anterior, se define a  $\Delta m(k)$  como:

$$\Delta m(k) = m(k) - m(k-1) \quad (8)$$

Como la válvula distribidora posee un voltaje  $V_{po}$ , según su curva de comportamiento, para el cual se cierra, entonces la señal correctora para el controlador de posición quedaría definida por:

$$m_I(k) = V_{po} - \Delta m(k) \quad (9)$$

Los controladores se implementan mediante programación en LabVIEW.

### 5. IMPLEMENTACIÓN DEL PROGRAMA FINAL DE CONTROL

Con el fin de estudiar el comportamiento de cada uno de los

controladores descritos anteriormente, se implementa un programa final de control para la Unidad Neumática Lineal (UNL). Este programa se encarga de integrar los controladores de posición y de presión (PID) para lograr una tarea específica en la Unidad Neumática Lineal. El panel frontal del programa final de control se muestra en la figura 4.

Este programa se encarga de administrar las subrutinas de adquisición de datos y de control tales como el programa para el control PID de presión y los programas para el control de posición, los cuales están constituidos como subinstrumentos virtuales (subVI).

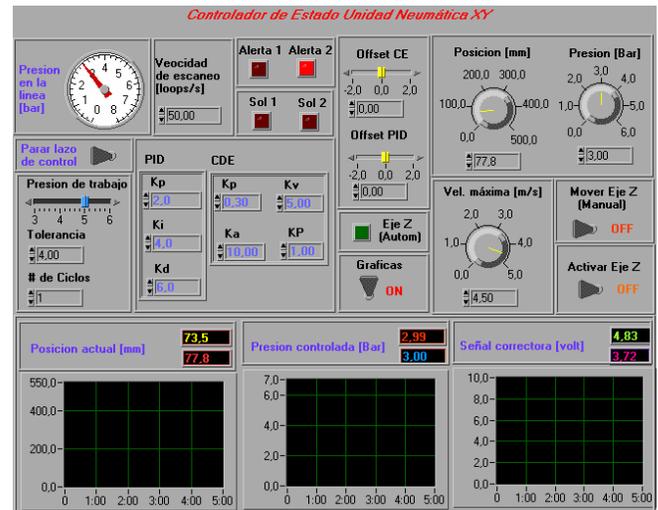


Figura 4 Panel frontal en LabVIEW del programa de control.

### 6. RESULTADOS

La figura 5 muestra la Unidad Neumática Lineal, resultado de este trabajo.

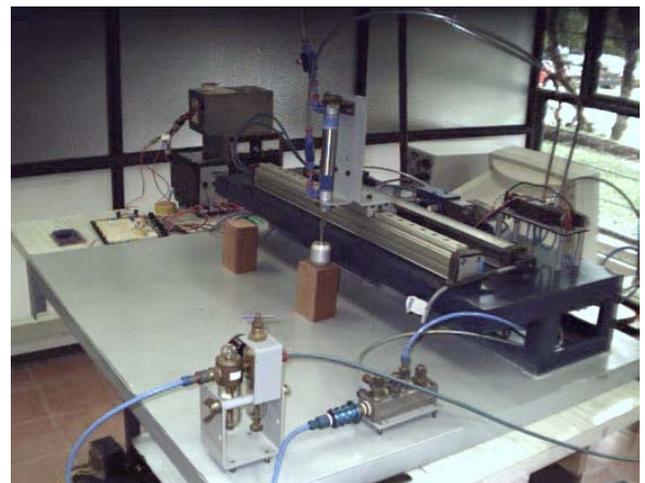


Figura 5 Unidad Neumática Lineal

Las pruebas realizadas se basan en análisis de respuesta transitoria y obtención de parámetros para cada una de

las variables controladas de acuerdo a los criterios expresados en la Teoría de Señales y Control.

*Controlador PID para Presión*

Teniendo en cuenta los parámetros del controlador PID determinados mediante el método de Ziegler-Nichols, y frente a una entrada escalón, el sistema se comporta como lo muestra la figura 6.

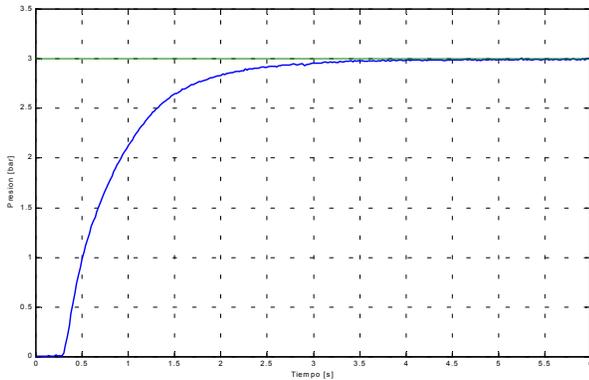


Figura 6 Comportamiento del sistema con parámetros de Ziegler-Nichols

Las características de respuesta transitoria se obtienen a partir de la figura 6 y para ello se utiliza el Toolbox de Control de Matlab, tomando en cuenta como especificaciones de respuesta transitoria el tiempo de asentamiento  $t_s$  con una tolerancia de 2% y el error de estado estable  $Ess$ . Los parámetros calculados son:

$$t_s = 2.92 [s]$$

$$Ess = 0.0114 [bar]$$

La figura 7 muestra el comportamiento del sistema frente a varias entradas escalón de presión con los parámetros de Ziegler-Nichols.

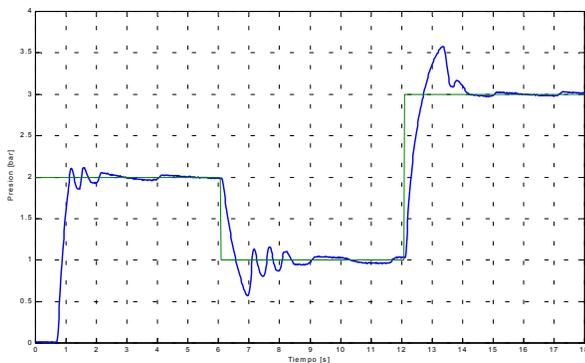


Figura 7 Comportamiento para varias entradas escalón

*Controlador PID para Posición*

Teniendo en cuenta los parámetros del controlador PID determinados mediante el método de Ziegler-Nichols, y frente a una entrada escalón, el sistema se comporta como lo muestra la figura 8.

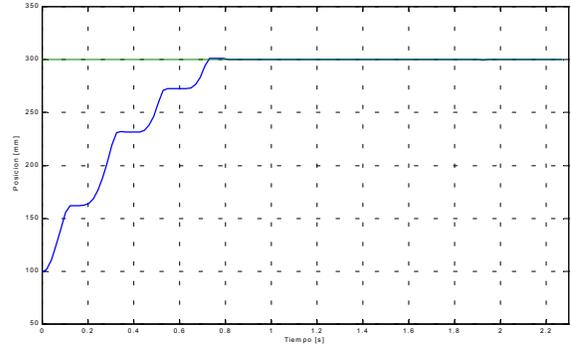


Figura 8 Comportamiento del sistema con parámetros de Ziegler-Nichols

Las características de respuesta transitoria obtenidas a partir de la figura 8 son:

$$M_p = 0.0046$$

$$t_p = 0.7634 [s]$$

$$t_s = 0.7031 [s]$$

$$t_d = 0.1004 [s]$$

$$Ess = 0.0120 [mm]$$

Así mismo, para varias entradas escalón, el comportamiento del sistema se presenta en la figura 9.

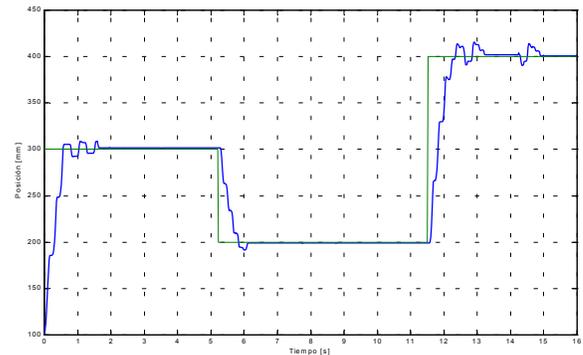


Figura 9 Respuesta para varias entradas escalón

*Características Estáticas de los controladores*

Con base en la teoría del error, se puede cuantificar la exactitud del sistema en cuanto a las dos variables controladas, es decir, posición y presión. Para ello se recurre al método de la repetibilidad que consiste en tomar varias medidas para un mismo valor de referencia y posteriormente realizar el análisis estadístico del caso.

Para los controladores de posición, la prueba se realizó tomando dos posiciones de referencia, llevando la

herramienta de la Unidad Neumática Lineal a estas dos posiciones y repitiendo el experimento al menos 15 veces para efectos del análisis estadístico.

Para el controlador de presión el procedimiento se basó en medir la desviación que presenta el indicador de la presión controlada con respecto al valor de presión deseado. Esto debido a que en el controlador de presión la variable controlada no se estabiliza en un valor constante, si no que queda oscilando alrededor de un valor de tolerancia.

Por tanto, el porcentaje error para la posición deseada de 100 mm es de 1.8%

Para la posición deseada de 300 mm, el error absoluto es de 1.3 mm y el porcentaje de error es de 0.4%

El promedio de error absoluto con base a una carrera del actuador de 200 mm es de 1.5 mm, con un promedio de porcentaje de error de 1.1%.

Para este controlador sintonizado mediante la regla de Ziegler-Nichols, se procedió de la siguiente manera: se incrementó la presión deseada desde un valor de 1.0 bar hasta 4.0 bar, presentando una desviación que oscila entre 3.96 y 4.02 bar, obteniendo un error absoluto de 0.04 bar, lo que representa un comportamiento óptimo del controlador teniendo en cuenta la compresibilidad del fluido de trabajo. La presión deseada se llevó posteriormente de 4.0 bar hasta 1.0 bar, se observó que la desviación oscila entre 0.95 y 1.04 bar, obteniéndose un error absoluto de 0.05 bar.

## 7. CONCLUSIONES

Se ha diseñado una Unidad Neumática Lineal con componentes de FESTO, la cual tiene un control de posición a lo largo de un eje y control de presión en el dispositivo de trabajo. La Unidad Neumática Lineal (UNL) se basó en una unidad de control de señales o mando y una unidad de trabajo. La unidad de control de señales está representada por el controlador del eje, que en este caso se efectuó a través de PC.

Para gobernar la Unidad Neumática Lineal (UNL) desde el PC se utilizó una tarjeta de adquisición de datos tipo LabPC-1200 de National Instruments y demás dispositivos de adecuación de señales.

Según lo planteado en los objetivos del trabajo, los cuales se centraban en el diseño de controladores PID de posición y de presión, estos fueron diseñados e implementados y acorde con las pruebas y experimentación, tales controladores se comportan con gran fidelidad de acuerdo a los resultados y análisis presentados.

Se logró realizar un sistema de posicionamiento neumático a un relativo bajo costo sin necesidad de recurrir a controladores de ejes comerciales o a Automatas Programables.

Con la Unidad Neumática Lineal diseñada se podría ampliar el numero de ejes, modificando únicamente el software.

Los controladores fueron diseñados a partir de su función de transferencia en tiempo discreto, la cual se obtuvo aplicando la teoría de filtros digitales, para posteriormente ser codificados en cualquier lenguaje de programación (p.ej. Turbo Pascal, lenguaje C, ensamblador, etc.), en este caso se realizó LabVIEW por la comodidad en la interfaz con el usuario que ofrece dicho programa.

Nuevas formas de control se podrían implementar en esta Unidad Neumática Lineal en aras de mejorar su comportamiento en cuanto a su precisión y respuesta transitoria y de estado estable.

## 8. BIBLIOGRAFÍA

- [1] Servopneumatic Precision Positioning. FESTO.2002.
- [2] Válvulas proporcionales neumáticas. FESTO AG & Co. Info 159. 2001.
- [3] OGATA, Katsuhiko. Sistemas de Control en Tiempo Discreto. Segunda Edición. Prentice-Hall. 1996.
- [4] PID Control Toolkit for G. Reference Manual. Bridge VIEW and LabVIEW. National Instruments Corporation. 1998.
- [5] Neumática en Bucle Cerrado. Festo Didactic. 1995.
- [6] LabVIEW Advanced Course Manual. 1997.
- [7] Automatizar con Neumática. Catálogo básico. Festo KG. 1993.
- [8] B.W. SURGENOR and N. Brook, "On the Tuning of an Industrial Motion Controller for a Pneumatic Positioning System". Proc 3rd Int. Conf. Industrial Automation, pp. 4.17-4.20, 1999