

## **Control *Fuzzy* de Velocidad para una Transmisión Hidrostática**

### **Fuzzy Control of velocity for a hydrostatic transmission**

*Diego Alexander Tibaduiza Burgos\**, *Carlos Eduardo Daza Orozco*

Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas Universidad Autónoma de Bucaramanga. Calle 48 N.º 39-234 Bucaramanga-Colombia

(Recibido el 14 de agosto de 2007. Aceptado el 29 de enero de 2008)

#### **Resumen**

Este artículo describe el diseño e implementación de un sistema de control fuzzy de velocidad para una transmisión hidrostática, con una bomba de desplazamiento variable y motor hidráulico fijo del laboratorio de Oleoneumática de la Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas de la UNAB. Este control de velocidad, mantiene constante la velocidad de la transmisión ante diferentes condiciones de carga. Su implementación se realizó usando Labview 7.0 y una tarjeta de adquisición de datos NI 6008USB.

----- *Palabras Clave:* Transmisión hidrostática (TH), adquisición de datos (DAQ).

#### **Abstract**

This article describes the design and implementation of a velocity control system for a hydrostatic transmission with a variable displacement pump and fixed motor hydraulic engine of the Oleoneumatic Laboratory at the Faculty of Físico-mecanicas Engineering of the Universidad Autónoma de Bucaramanga. This control system maintains a constant velocity on the transmission with different loading conditions. It was implemented using Labview 7.0 and a NI6008-USB data acquisition device.

----- *Keywords:* Hydrostatic transmission (TH), data acquisition (DAQ).

---

\* Autor de correspondencia: teléfono: + 57 + 7 + 643 61 11 ext 298, correo electrónico: dtibaduiza@unab.edu.co ( D.A. Tibaduiza)

## Introducción

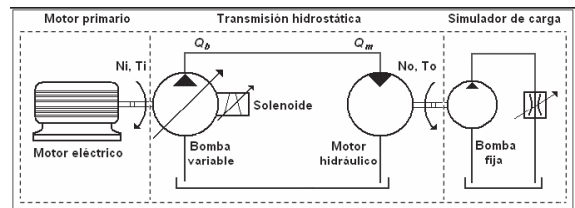
Los procesos a nivel industrial son cada vez más complejos debido al número de variables que se utilizan y la interrelación entre estas, lo cual se constituye en un problema a la hora de diseñar controladores, ya que para disponer de una descripción completa y detallada de cada parte del proceso se requeriría un modelo matemático. Estrategias de control inteligente como la Lógica Fuzzy permiten hoy en día trabajar con procesos de esta magnitud, generando una base de conocimiento (Reglas) basado en un experto y sin necesidad de ecuaciones. En el ámbito universitario estos nuevos métodos son parte de las investigaciones y estudios realizados para encontrar controladores nuevos y mejores, así como para la apropiación de conocimiento.

En este trabajo se hace un estudio para implementar un sistema de control usando lógica FUZZY que permita mantener velocidades de salida constantes en condiciones de operación con carga o sin ella para la transmisión hidrostática. El sistema se encuentra en el laboratorio oleoneumática de la Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas de la Universidad Autónoma de Bucaramanga. Este trabajo se desarrolló para tener una aplicación que permitiera a los estudiantes de las diferentes materias del área visualizar y trabajar con este tipo de control. Se incluye además, la implementación de una interfase para el monitoreo del sistema de control de velocidad de la transmisión hidrostática, a través de Labview 7.0

## Caracterización del sistema

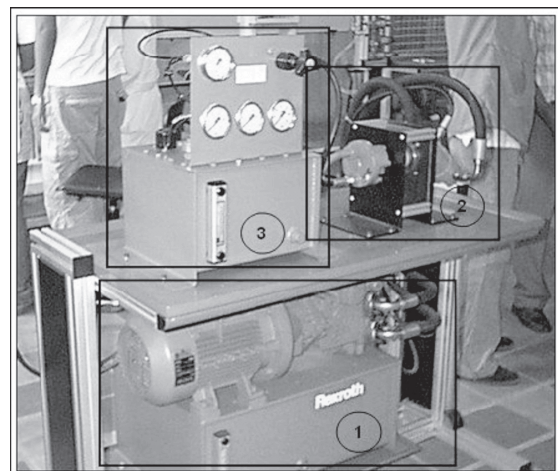
Uno de los pasos claves para diseñar un sistema de control es la caracterización del sistema para encontrar el modelo indicado que describa el comportamiento dinámico de la planta [1]. Para esto se debe conocer primero la función y descripción de la transmisión que se desea para implementar el controlador por métodos tradicionales. En el caso del control fuzzy es necesario construir la base de conocimientos a partir del desempeño y funcionamiento de la planta.

La transmisión se describe de la siguiente manera: El sistema cuenta con un motor eléctrico primario el cual provee de energía rotativa a la bomba desplazamiento variable, esta bomba cuenta con una placa en su interior que puede cambiar su ángulo de inclinación mediante una señal de control (en corriente) a un solenoide, esto hace que los pistones tengan más o menos recorrido y aumentando o disminuyendo el flujo de salida de la bomba [2]. La figura 1 describe el funcionamiento de este tipo de bombas.



**Figura 1** Diagrama de funcionamiento de la transmisión hidrostática

La transmisión hidrostática con la que se trabajó consiste de una bomba hidráulica de pistones axiales Rexroth A4VG TN-28 de desplazamiento variable con mando eléctrico EP-2, y de un motor hidráulico de pistones axiales con eje quebrado Rexroth A2TM TN-10 de desplazamiento fijo. En la figura 2 se muestra una fotografía de la TH con todos sus componentes.



**Figura 2** Transmisión hidrostática del laboratorio de oleoneumática

La transmisión hidrostática está dividida en tres grupos principalmente que se describen en la tabla 1.

**Tabla 1** Componentes de la transmisión hidrostática del laboratorio

Sector	Componentes
1	Motor eléctrico primario + bomba pistones axiales y desplazamiento variable + deposito de aceite del sistema.
2	Motor hidráulico de pistones axiales y desplazamiento fijo + bomba de pistones radiales y desplazamiento fijo (Carga).
3	Panel de manómetros + válvula limitadora de presión para el ajuste de la carga + deposito de aceite de la carga.

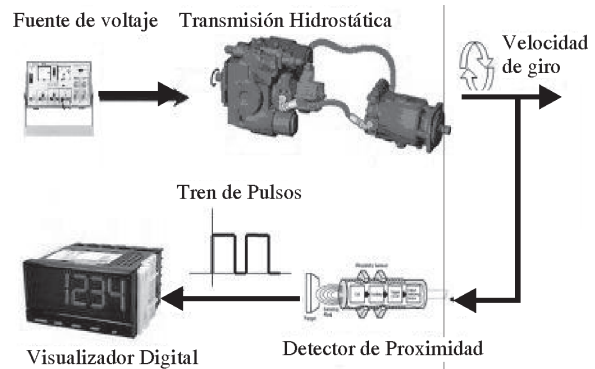
### Caracterización Velocidad-Tensión

Conocido el funcionamiento y la descripción de la transmisión, se realizan varias pruebas a la Transmisión Hidrostática con el fin de revisar el tipo de acondicionamiento que se debe hacer a las variables para trabajar en Labview. Una de estas pruebas es la caracterización velocidad-tensión de la transmisión [3]. Por medio de una fuente de voltaje se varió la tensión a la entrada del sistema para conocer la velocidad de salida de la transmisión hidrostática. En la medición de la velocidad de giro del motor hidráulico, se utilizó un detector de proximidad inductivo de referencia OMRON E2E2-X5MB1. Este detector genera un pulso por cada giro del motor. Para capturar los pulsos emitidos del sensor y poder observar el valor de velocidad en RPM, se empleó un visualizador digital de referencia OMRON K3MA-F.

En la figura 3 se presenta un esquema del sistema para las pruebas anteriormente descritas. Con la caracterización de velocidad-tensión, se determinan los límites máximos y mínimos de voltaje con el que trabaja la transmisión.

Después de esto se realiza la caracterización del sistema por medio de respuesta en frecuencia,

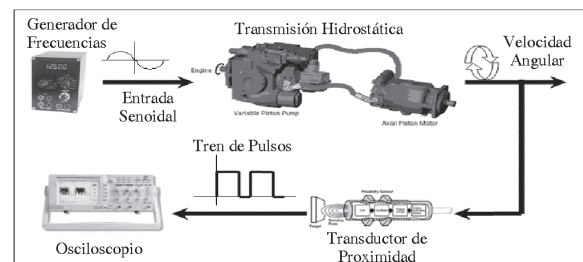
para determinar la función de transferencia del sistema. Esta función de transferencia sirve para simular el comportamiento del sistema y para futuros diseños de controladores.



**Figura 3** Montaje para obtención de datos de las pruebas de lazo abierto

### Respuesta en frecuencia

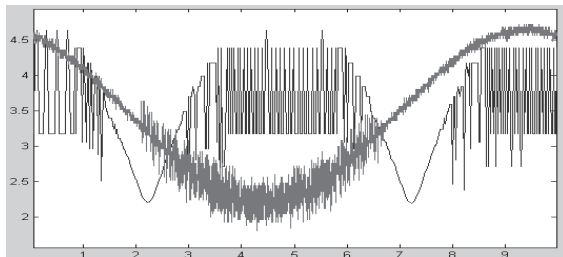
Este procedimiento consiste en ingresar a la planta una señal senoidal de amplitud constante a la cual se le varía la frecuencia [4, 5]. La señal de entrada y la señal de salida se registran en un osciloscopio a través del cual se guardan los datos para ser analizados posteriormente en Matlab. El montaje realizado se puede observar en la figura 4.



**Figura 4** Montaje para la identificación del sistema en frecuencia

Para analizar estas pruebas se diseñó un programa en Matlab para graficar la señal de entrada y de salida del sistema a partir de los datos obtenidos en el osciloscopio, con esto se obtienen los datos de fase y magnitud necesarios para la función de transferencia.

En la figura 5 se muestra una grafica de la señal de entrada y salida vista en el osciloscopio cuando se le ingresa una señal senoidal de frecuencia de entrada de 0,1 Hz.



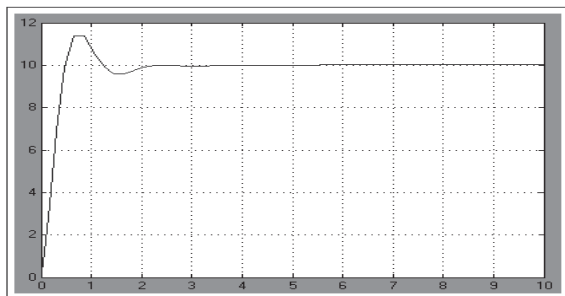
**Figura 5** Señal de entrada y de salida del sistema Fin=0,1 Hz

La función de transferencia obtenida del sistema utilizando el método de respuestas frecuencia es:

$$G = \frac{1.2s^2 + 20s + 13.04}{s^3 + 4.972s^2 + 22.68s + 13.01}$$

Donde G corresponde a la función de transferencia de la velocidad de salida con respecto a la tensión de entrada.

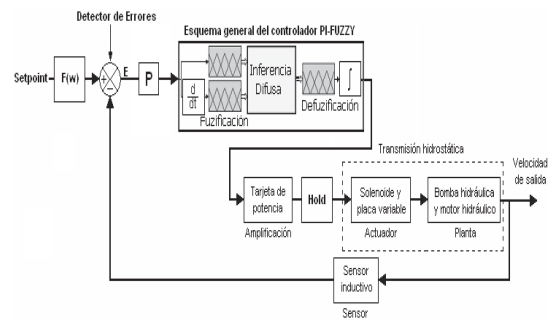
La respuesta transitoria de esta función de transferencia ante una entrada escalón se muestra en la figura 6.



**Figura 6** Respuesta transitoria de la planta ante una entrada escalón

### Diseño del sistema de control

En la figura 7, se muestra el diagrama de bloques del sistema de control a implementar.



**Figura 7** Diagrama de bloques del sistema

### Diseño del controlador PI

Como criterio de partida para el diseño del controlador Fuzzy [6], se seleccionaron los parámetros de controlador PI utilizando el criterio de Chien, Hrones y Reswick [7]. Los resultados se pueden apreciar en la tabla 2.

**Tabla 2** Resultados del controlador PI

Parámetros		
CONTROL	Kp	Ti
PI	1,281	0,09134 S

Posteriormente, se estructura el controlador Fuzzy definiendo sus variables de entrada, de salida, y las reglas que forman parte de la base de conocimiento del controlador.

### Diseño del controlador Fuzzy en Labview

El controlador se diseñó con dos entradas llamada ERROR y CAMBIO DEL ERROR, y una salida denominada VELOCIDAD, para esto se utilizó un VI de LabView llamado Fuzzy Logic Controller Design.

A continuación se presentan descripciones de: la Variable Lingüística de la entrada (ERROR), el (CAMBIO DEL ERROR), y de la salida (VELOCIDAD CONTROLADA) con sus respectivos Términos Lingüísticos y las Reglas del controlador Fuzzy por medio del VI Fuzzy Logic Controller Design.[8]

### Variable lingüística (Entrada-ERROR)

Esta variable corresponde a la señal de error en velocidad entre el *set point* y la señal sensada. Para esto se generaron 9 términos lingüísticos en el intervalo de -500 a 500 el cual corresponde a los errores máximo y mínimo de velocidad de acuerdo a pruebas realizadas preliminarmente, esto se puede observar en la figura 8.

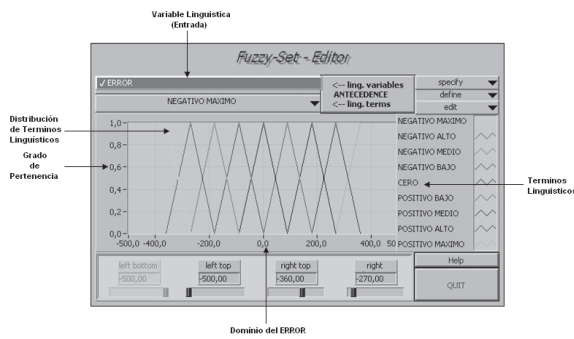


Figura 8 Variable Lingüística ERROR

### Variable lingüística (Entrada-cambio del error)

Esta variable contiene tres términos lingüísticos llamados negativo, cero y positivo, tal como se aprecia en la figura 9.

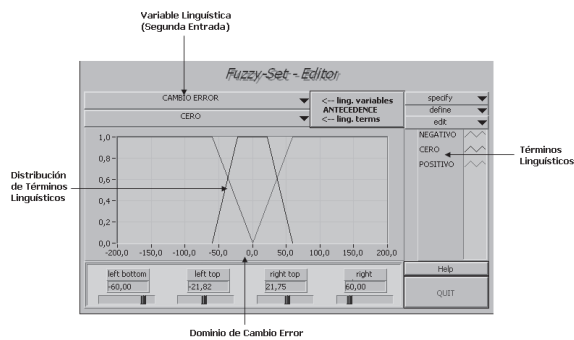


Figura 9 Variable Lingüística cambio del error

### Variable Lingüística (Salida-velocidad)

La variable de salida que corresponde a la señal de control esta definida por términos lingüísticos

en el intervalo de -500 a 500 para poder dar una señal de cambio alrededor del *set point* y ayudar a converger al sistema. La definición de estos términos se puede apreciar en la figura 10.

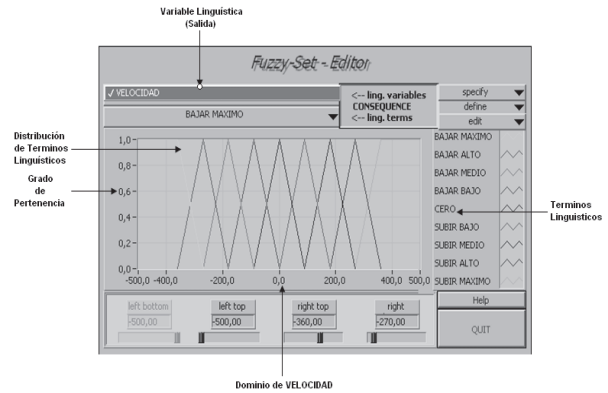


Figura 10 Variable Lingüística velocidad

### Reglas

Las reglas generadas para este controlador se pueden observar en la figura 11 en la cual se presenta una vista del panel frontal del *Rulebase-Editor* [8].

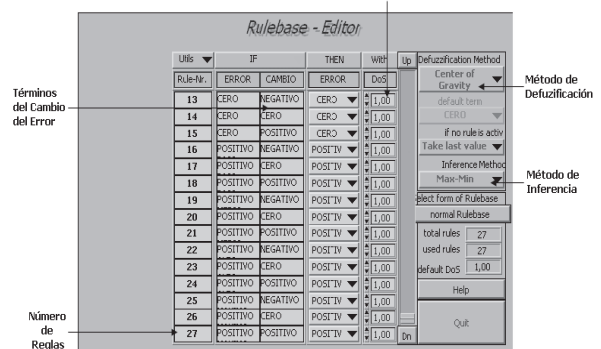
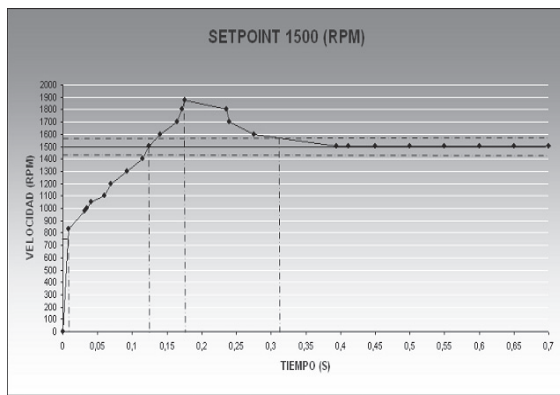


Figura 11 Reglas del controlador

Con los valores de los coeficientes del controlador PI y el diseño del controlador Fuzzy, se desarrolló la aplicación en Labview para observar el comportamiento la transmisión hidrostática bajo la acción del controlador PI-FUZZY. El resultado se puede apreciar en la figura 12.



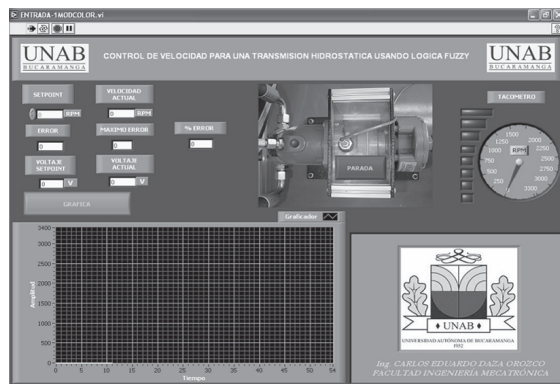


**Figura 12** Gráfica para respuesta transitoria del sistema con controlador PI-Fuzzy

## Implementación del sistema

### Interfase grafica del sistema de monitoreo

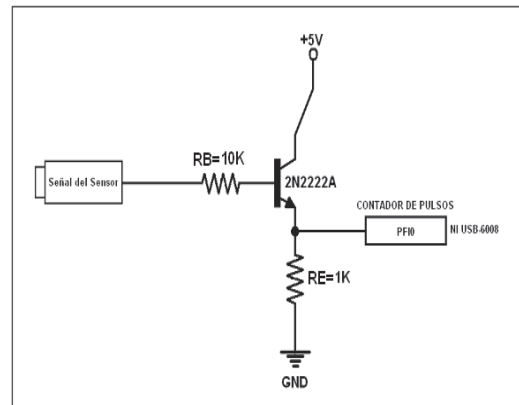
Luego de probar el control desde Labview se procedió a elaborar la interfaz grafica, con el objeto de permitir a un usuario cualquiera la manipulación de la transmisión hidrostática. El resultado se puede observar en la figura 13.



**Figura 13** Presentación panel frontal del sistema de monitoreo

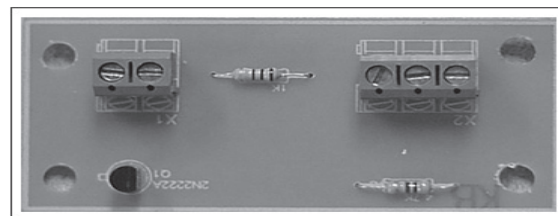
### Implementación del Hardware al sistema

En la siguiente figura se muestra el circuito eléctrico de acondicionamiento de señal, el cual se usa como interfaz entre la tarjeta DAQ y el sensor de velocidad.

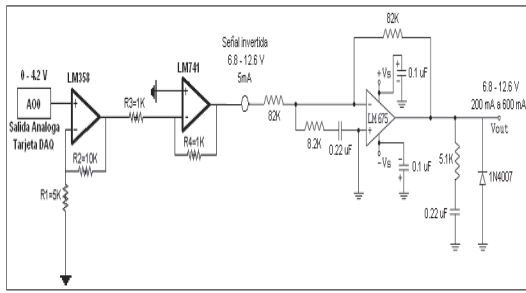


**Figura 14** Circuito acondicionador de señal del sensor inductivo

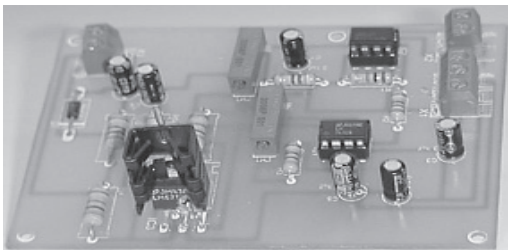
El circuito anterior acondiciona la señal del sensor inductivo utilizado para la lectura de la velocidad, ya que este genera pulsos de 12V y la máxima amplitud de voltaje que puede recibir en pulsos la tarjeta DAQ es de 5V. Se utiliza una etapa de transistor conectado como interruptor en la cual se activa o desactiva el transistor dependiendo de la polarización de la base, de esta manera se logra obtener 5 o 0 V. La figura 15, muestra la foto del circuito de acondicionamiento de señal del sensor final. En la figura 16 se muestra el circuito de la tarjeta de potencia para la conexión entre la tarjeta DAQ NI 6008-USB y la transmisión hidrostática. Se diseñó además un circuito electrónico para suministrar la corriente que requiere el solenoide de la bomba hidráulica para trabajar, ya que la tarjeta DAQ en su salida análoga suministra una corriente máxima 5 mA y voltaje máximo de 5 V, y la bomba trabaja entre 200 a 500 mA, y de 6.8 a 12,6 V. Esta parte del circuito es para el manejo de la transmisión hidrostática desde el PC con la tarjeta NI USB-6008 [9]. En la figura 17 se muestra la tarjeta de potencia.



**Figura 15** Circuito de acondicionador de señal del sensor en circuito impreso



**Figura 16** Esquema completo tarjeta de potencia



**Figura 17** Tarjeta de potencia en circuito impreso

## Conclusiones

- El control de velocidad para la transmisión hidrostática por medio de un controlador PI-FUZZY, alcanzó los resultados deseados como un sobrepaso de 19%, y un tiempo de asentamiento de 327 mS para la respuesta transitoria del sistema.
- Los parámetros del controlador se encontraron tomando como referencia el método de Chien, el cual permitió definir que el mejor controlador en este caso era un sistema PI, para lo cual se diseñó el sistema fuzzy y se incluyó la variable integral para mantener el error en estado estable dentro de una tolerancia del 3%.
- Fue necesario realizar la caracterización velocidad-tensión de la transmisión debido a que la señal proveniente del sensor se encuentra en forma de pulsos y el sistema de control esta definido en función de la velocidad y la tensión de alimentación de la TH.
- Se pudo verificar que la herramienta Fuzzy de Labview es una herramienta muy útil para el control de un proceso, pero es limita-

do ya que no puede interactuar con sistemas MIMO debido a que solo se trabajó con un número limitado de entradas y solo una salida. Adicionalmente la toolbox de Labview solo permite definir 9 términos lingüísticos.

- Se pudo identificar que las transmisiones hidrostáticas juegan un papel muy importante en el diseño y construcción de maquinaria para trabajo pesado y mediano a nivel industrial, ya que la transmisión a la cual se le implementó el controlador de velocidad presentaba la característica respuesta rápida en el momento de actuar, cuando se producían cambios de velocidad de entrada.
- El controlador PI-FUZZY mejora aun más, el comportamiento de la respuesta del sistema que bajo la acción del controlador PI, esto en sí, es muy positivo, demostrando que el controlador FUZZY diseñado, cumple con lo esperado, arrojando resultados satisfactorios.

## Referencias

1. C. Smith. *Control Automático de Procesos Teoría y Práctica*. Ed. Limusa, S.A. México, D.F. 1991, pp.91-170.
2. J. A. Pinzón, J. M. Vega. *Diseño E Implementación de Un Sistema de Control en Lazo Cerrado Para Una Transmisión Hidrostática*. Tesis de grado. Universidad Autónoma de Bucaramanga. 2005. pp. 30-60.
3. J. E. Meneses. "Control Fuzzy Basado en PLC's Simatic S5". *Inteligencia Artificial En El Control de Procesos*. Seminario-Taller. Universidad Industrial de Santander. 1997. pp 10-35.
4. O. Katsui. *Ingeniería de Control Moderna*. 4ª Edición. Prentice Hall Hispanoamericana. Ribeira de Liora, Madrid. 2003. pp. 492-594
5. T. Martinez, J. Montañez, L. Mujica. *Manual de Practicas*. Universidad Industrial de Santander. Laboratorios de Sistemas de control. 2000. pp.25-30.
6. A. Delgado. *Inteligencia Artificial y Minirobots*. Ecoe Ediciones. Bogotá. 1998. pp.169-190.
7. U. Eronini *Dinámica de sistemas y control*. Thomson Learning. New York. 1993 pp.30-50.
8. D. A. Tibaduiza, C. E. Daza. Control de velocidad para una transmisión hidrostática usando lógica fuzzy. Tesis de grado. Universidad Autónoma de Bucaramanga. 2007. pp. 10-100.
9. <http://www.ni.com/pdf/manuals/322192a.pdf>. Consultada en noviembre 30 de 2006.