

**IMPLEMENTACIÓN DE UN CONTROL DE POSICIÓN PARA UN ACTUADOR
NEUMÁTICO**

**JOSÉ CARLOS CUDRIS CANTILLO
CHRISTIAN JAVIER VERA JAIMES**

**UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA
ESCUELA DE INGENIERÍA
FACULTAD DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA
ESPECIALIZACIÓN EN CONTROL E INSTRUMENTACIÓN INDUSTRIAL
BUCARAMANGA
2014**

**IMPLEMENTACIÓN DE UN CONTROL DE POSICIÓN PARA UN ACTUADOR
NEUMÁTICO**

**JOSÉ CARLOS CUDRIS CANTILLO
CHRISTIAN JAVIER VERA JAIMES**

TRABAJO DE GRADO

**DIRECTOR
Ph.D. LUIS ANGEL SILVA**

**UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA
ESCUELA DE INGENIERÍA
FACULTAD DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA
ESPECIALIZACIÓN EN CONTROL E INSTRUMENTACIÓN INDUSTRIAL
BUCARAMANGA
2014**

TABLA DE CONTENIDO

	pág.
RESUMEN.....	5
ABSTRACT	6
INTRODUCCIÓN.....	7
1 OBJETIVOS	9
1.1 OBJETIVO GENERAL.....	9
1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	9
2 MARCO TEORICO	10
2.1 DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA NEUMÁTICO	10
2.1.1 Unidad de mantenimiento.....	11
2.1.2 Depósito de reserva de aire.....	11
2.1.3 Válvula proporcional de caudal.....	12
2.1.4 Cilindro sin vástago	13
2.1.5 Potenciómetro lineal	14
2.1.6 PLC S7-300.....	14
2.2 MÉTODOS DE DISEÑO Y SINTONIZACIÓN DE CONTROLADORES PID....	15
2.2.1 Método de las oscilaciones de Ziegler-Nichols	15
2.2.2 Método del Relé de Åström	16
2.2.3 Diseño mediante herramientas computacionales.....	17
3 METODOLOGÍA EMPLEADA PARA EL DISEÑO DEL CONTROLADOR	17
3.1 ANÁLISIS DINÁMICO EN LAZO ABIERTO	18
3.2 ANÁLISIS DINÁMICO EN LAZO CERRADO	19
3.3 IDENTIFICACIÓN DEL SISTEMA CON HERRAMIENTA IDENT	20
3.3.1 Procedimiento de Identificación	21
3.4 DISEÑO DEL CONTROLADOR	26
3.5 SIMULACIÓN DE LOS MODELOS.....	29
3.6 IMPLEMENTACIÓN EN UN PLC.....	32
3.7 DESARROLLO DE LA INTERFAZ.....	34
3.8 RESULTADOS OBTENIDOS.....	36
4 CONCLUSIONES.....	38
BIBLIOGRAFÍA.....	39
ANEXOS.....	39

TABLA DE FIGURAS

	pág.
<i>Figura 1: Circuito neumático a controlar.</i> -----	10
<i>Figura 2: Unidad LFR-1/8-D-5M-O-MINI y símbolo según Norma ISO-1219.</i> -----	11
<i>Figura 3: Deposito de aire comprimido y símbolo según Norma ISO-1219.</i> -----	11
<i>Figura 4: Válvula MPYE-5-1/8LF-010-B y símbolo según Norma ISO-1219.</i> -----	12
<i>Figura 5: Caudal de salida vs Voltaje aplicado.</i> -----	13
<i>Figura 6: Cilindro neumático sin vástago y símbolo según Norma ISO-1219.</i> -----	13
<i>Figura 7: Potenciómetro lineal MLO-POT-225-TLF y símbolo según Norma ISO-1219.</i> --	14
<i>Figura 8: PLC S7-300 con CPU 314C-2DP.</i> -----	14
<i>Figura 9: Respuesta oscilatoria con $K_p=1.5$.</i> -----	15
<i>Figura 10: Herramienta SISOTOOL de MATLAB.</i> -----	17
<i>Figura 11: Sistema en lazo abierto.</i> -----	18
<i>Figura 12: Respuesta al escalón del sistema en lazo abierto.</i> -----	18
<i>Figura 13: Sistema en lazo cerrado.</i> -----	19
<i>Figura 14: Señal 1, respuesta al escalón en lazo cerrado.</i> -----	19
<i>Figura 15: Sistema en lazo cerrado con controlador y tarjeta de adquisición.</i> -----	20
<i>Figura 16: Señal 2, respuesta en lazo cerrado.</i> -----	21
<i>Figura 17: Creación de señales en el Workspace.</i> -----	21
<i>Figura 18: Importación de los datos a la IDENT.</i> -----	22
<i>Figura 19: Señales para identificación y validación.</i> -----	22
<i>Figura 20: Proceso de identificación.</i> -----	23
<i>Figura 21: Validación del modelo estimado.</i> -----	23
<i>Figura 22: Análisis en lazo cerrado. Lugar geométrico de las raíces (arriba). Respuesta al escalón (Abajo).</i> -----	25
<i>Figura 23: Análisis en lazo abierto. Lugar geométrico de las raíces (arriba). Respuesta al escalón (Abajo).</i> -----	26
<i>Figura 24: Herramienta de diseño sisotool.</i> -----	27
<i>Figura 25: Herramienta de diseño sisotool, requerimientos de diseño.</i> -----	27
<i>Figura 26: Compensador en adelanto y respuesta del sistema.</i> -----	28
<i>Figura 27: Modelo obtenido para el compensador en atraso.</i> -----	28
<i>Figura 28: Circuito neumático de potencia y de control.</i> -----	29
<i>Figura 29: Ventana de configuración de componentes.</i> -----	30
<i>Figura 30: Respuesta del sistema con controlador PI.</i> -----	30
<i>Figura 31: Respuesta del sistema con controlador PID.</i> -----	31
<i>Figura 32: Montaje control PID con PLC S7-300.</i> -----	32
<i>Figura 33: Estructura regulador PID 'COUNT_C'.</i> -----	33
<i>Figura 34: Ajuste del periodo de interrupción del bloque OB35.</i> -----	34
<i>Figura 35: Conexión PLC-HMI.</i> -----	355
<i>Figura 36: HMI del regulador PID.</i> -----	35
<i>Figura 37: Respuesta del sistema real sin perturbación.</i> -----	36
<i>Figura 38: Respuesta del sistema real con perturbación del 10%.</i> -----	377

RESUMEN GENERAL DE TRABAJO DE GRADO

TITULO: IMPLEMENTACIÓN DE UN CONTROL DE POSICIÓN PARA UN ACTUADOR NEUMÁTICO.

AUTOR(ES): JOSE CARLOS CUDRIS CANTILLO.
CHRISTIAN JAVIER VERA JAIMES.

FACULTAD: ESP. EN CONTROL E INSTRUMENTACIÓN INDUSTRIAL

DIRECTOR: Ph.D. LUIS ANGEL SILVA

RESUMEN

En esta monografía de trabajo de grado se presenta el diseño e implementación de un control de posición de un cilindro neumático. La planta a controlar corresponde a un sistema neumático conformado por una unidad de mantenimiento, una válvula proporcional de caudal, y un cilindro neumático sin vástago con potenciómetro lineal. La estrategia de control implementada es un PID con estructura paralela, diseñado a través de la metodología de herramientas computacionales. Los resultados obtenidos en el desarrollo, muestran que el sistema es robusto ante perturbaciones externas, con la capacidad de eliminar el error de estado estable, y posicionar el vástago del cilindro con sobrepasos menores al 3%.

PALABRAS CLAVE:

Neumática, Control Proporcional, PID, Cilindro Neumático.

V° B° DIRECTOR DE TRABAJO DE GRADO

GENERAL SUMMARY OF WORK OF GRADE

TITLE: IMPLEMENTATION OF A POSITION CONTROL FOR A PNEUMATIC ACTUATOR.

AUTHOR(S): JOSE CARLOS CUDRIS CANTILLO.
CHRISTIAN JAVIER VERA JAIMES.

FACULTY: ESP. EN CONTROL E INSTRUMENTACIÓN INDUSTRIAL

DIRECTOR: Ph.D. LUIS ANGEL SILVA

ABSTRACT

In this monograph degree work is presented the design and implementation of a position control of a pneumatic cylinder. The plant to control corresponds to a pneumatic system made by a maintenance unit, a proportional flow valve and a pneumatic rodless cylinder with linear potentiometer. The control strategy implemented is a PID with parallel structure, designed by the methodology of computational tools. The results obtained in the development, showing that the system is robust to external disturbances, with the ability to eliminate the steady state error, and the cylinder rod position with overshoots less than 3%

KEYWORDS:

Pneumatics, Proportional Control, PID, Pneumatic Cylinder.

V° B° DIRECTOR OF GRADUATE WORK

INTRODUCCIÓN

Actualmente el control de actuadores neumáticos es ampliamente utilizado en el campo de la robótica y desarrollo de simuladores dinámicos, así como en sectores industriales en los cuales se necesita posicionar, expulsar o mover productos o material de una línea de producción con una alta precisión, en dichas aplicaciones se requiere realizar movimientos rápidamente, desarrollar fuerzas elevadas y realizar posicionamientos precisos.

Nacionalmente se ha desarrollado en la Facultad de Ingeniería Mecánica de la Universidad Tecnológica de Pereira [1], un control de posición y presión para manipulador neumático a través de un pc, el controlador fue implementado en una aplicación desarrollada bajo la plataforma LABVIEW y conectada al sistema neumático a través de una tarjeta de adquisición de datos PC-1200. El controlador se diseñó mediante el método de lazo cerrado de Ziegler-Nichols, obteniéndose resultados de error de posición no mayores a 2mm.

Internacionalmente en la Escuela de Electromecánica de la Universidad Tecnológica de Beijing China [2], se desarrolló un sistema de control de posición basado en un controlador fuzzy utilizando sensores de presión y válvula reguladora de caudal, para lo cual se alcanzan posiciones con una precisión de $\pm 0.25\text{mm}$.

Este proyecto es un punto de referencia para el desarrollo e implementación de prácticas de control de procesos en los ambientes de automatización del SENA, sirviendo como base para el desarrollo de metodologías que permitan un mayor aprovechamiento de los equipos, ya que actualmente se tienen diferentes elementos sueltos que no cumplen ninguna función por si solos, los cuales al ser integrados a otros componentes permiten obtener sistemas y/o aplicaciones que sirven como ejemplos de plantas para el desarrollo de proyectos de control industrial.

En el proyecto se realiza el montaje de un sistema neumático compuesto por un cilindro neumático lineal sin vástago, una válvula proporcional de caudal y un acumulador de aire para minimizar las perturbaciones ocasionadas por los altibajos de presión en las líneas de alimentación de aire. Una vez implementado el sistema neumático se obtuvo un modelo matemático aproximado que define el comportamiento dinámico del sistema bajo condiciones técnicas y ambientales estables. Luego se diseñó una estrategia de control PID capaz de mantener un sistema estable, con un porcentaje de sobrepaso menor al 3% y error de estado estable no mayor a 1mm, con una alta velocidad de respuesta aceptable no mayor a la del sistema en lazo cerrado sin controlador. El diseño del controlador se simuló para afinar los detalles y posteriormente se verificó físicamente implementándolo en un PLC.

El desarrollo del proyecto se realizó siguiendo tres fases descritas a continuación:

- ✓ *Fase de Análisis*: en esta fase se estudiaron proyectos afines realizados en otras instituciones educativas nacionales e internacionales, luego se estudiaron las características y funcionamiento de los elementos y equipos para realizar el montaje del sistema neumático.
- ✓ *Fase de Diseño*: finalizada la etapa de análisis de la información se procede a la caracterización del sistema en lazo abierto y cerrado para seleccionar una arquitectura de compensador adecuado y realizar la simulación para observar su desempeño.
- ✓ *Fase de Implementación*: el siguiente paso es la implementación a través de un PLC, realizando la programación de este y conectarlo al sistema físico para verificar el diseño del controlador obtenido.

El trabajo de grado está estructurado de la siguiente manera, inicialmente se presenta una descripción de los componentes que integran el sistema neumático y su función dentro del mismo. Luego se realiza un análisis del comportamiento del sistema en lazo abierto y cerrado para determinar sus características dinámicas y estáticas, posteriormente se realiza el diseño de un controlador PID que permita obtener un sobrepaso no mayor al 3%, una vez obtenidas las ganancias del controlador se simulan en un software de ingeniería y se realiza cualquier ajuste que sea necesario, por último se implementa el controlador en un PLC el cual es gestionado a través de una HMI en el PC.

1 OBJETIVOS

1.1 OBJETIVO GENERAL

- Diseñar una estrategia de control PID para su implementación en un PLC que permita posicionar un cilindro neumático sin vástago.

1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Obtener un modelo matemático aproximado del sistema neumático.
- Diseñar una estrategia de control PID que cumpla con los criterios de diseño.
- Verificar el diseño obtenido mediante un modelo de simulación de la planta más controlador.
- Implementar físicamente en un PLC el controlador PID diseñado.

2 MARCO TEORICO

2.1 DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA NEUMÁTICO

Un sistema neumático es conjunto de elementos que utilizan el aire comprimido como medio para generar y transmitir fuerza [3], sus principales componentes son:

- Unidad de generación del aire comprimido o Compresor.
- Unidad de mantenimiento y lubricación.
- Válvulas de accionamiento.
- Válvulas direccionales.
- Válvulas de control.
- Pre actuadores.
- Actuadores.

En la Figura 1, se muestra el circuito neumático implementado, el cual está compuesto por, una válvula reguladora de caudal (1), un cilindro lineal sin vástago (2), un potenciómetro lineal (3), una unidad de mantenimiento (4), y un depósito de aire comprimido (5).

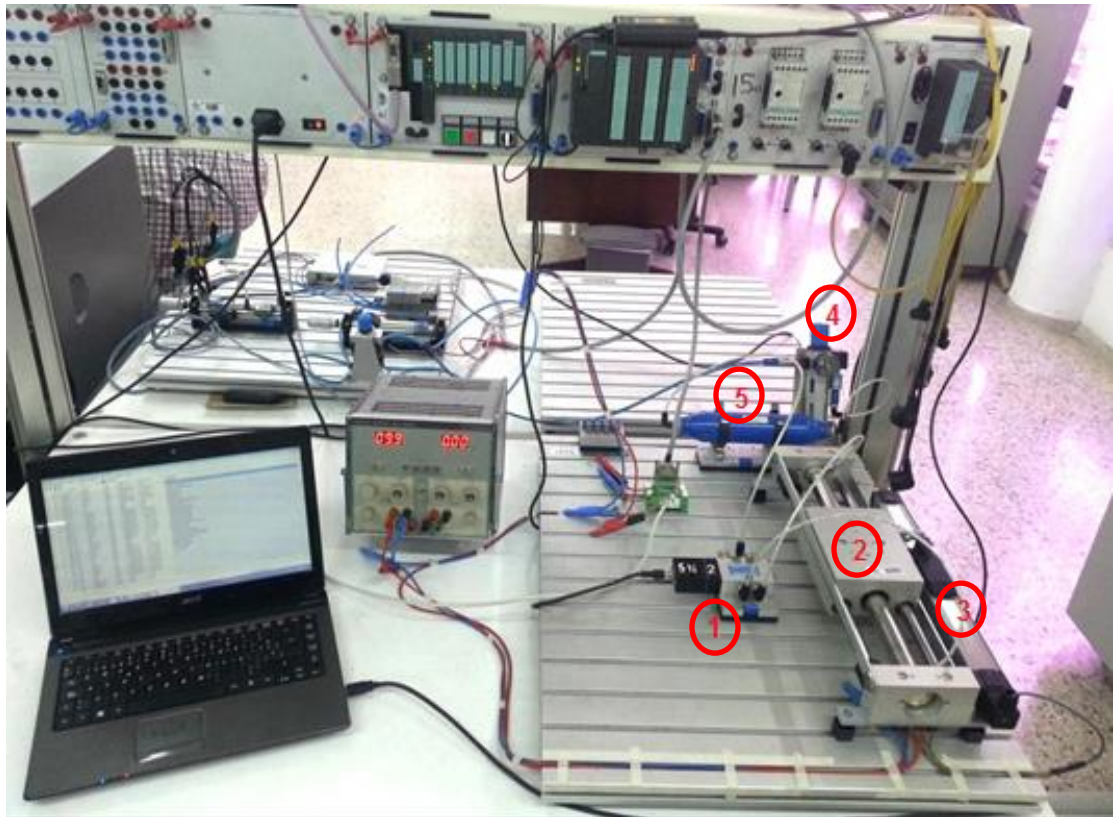


Figura 1: Circuito neumático a controlar.

2.1.1 Unidad de mantenimiento. Se trabajó con una unidad de mantenimiento LFR (Filtro y Regulador) con filtro de 5um (Figura 2), recomendada para sistemas servo-neumáticos debido a que permite una eficaz eliminación de la suciedad y condensado de la humedad bloqueando el paso de agua hacia los componentes del circuito neumático. La presión se ajustó a 5bar, al aumentar esta presión la fuerza y velocidad de respuesta del sistema aumenta y si la disminuimos la fuerza y la velocidad disminuyen. La presión y el caudal de funcionamiento siempre deben mantenerse fijos ya que el comportamiento dinámico del sistema depende de estas variables.



Figura 2: Unidad LFR-1/8-D-5M-O-MINI y símbolo según Norma ISO-1219.

2.1.2 Depósito de reserva de aire. Este dispositivo equipado con un sistema de sujeción rápido (Figura 3), adecuado para montaje sobre placa perfilada, está provisto de racores de conexión en ambos extremos. Se utiliza con el propósito de compensar las fluctuaciones de presión debidas a la gran demanda de aire producidas por los movimientos rápidos del cilindro.



Figura 3: Deposito de aire comprimido y símbolo según Norma ISO-1219.

El depósito además puede utilizarse para las siguientes funciones:

- Generación de presiones estáticas con ayuda de una válvula reguladora de caudal unidireccional.
- Generación de tiempos de retraso más largos en uniones de temporizadores y válvulas reguladoras de caudal.
- Compensación de fluctuaciones de presión.
- Creación de un sistema regulado con un atraso de 1er orden.

2.1.3 Válvula proporcional de caudal. La válvula proporcional de caudal (Figura 4) convierte una señal eléctrica analógica de entrada en una determinada posición de la corredera, que corresponde con una concreta apertura de la sección transversal del paso de aire a través de las vías de salida [4].

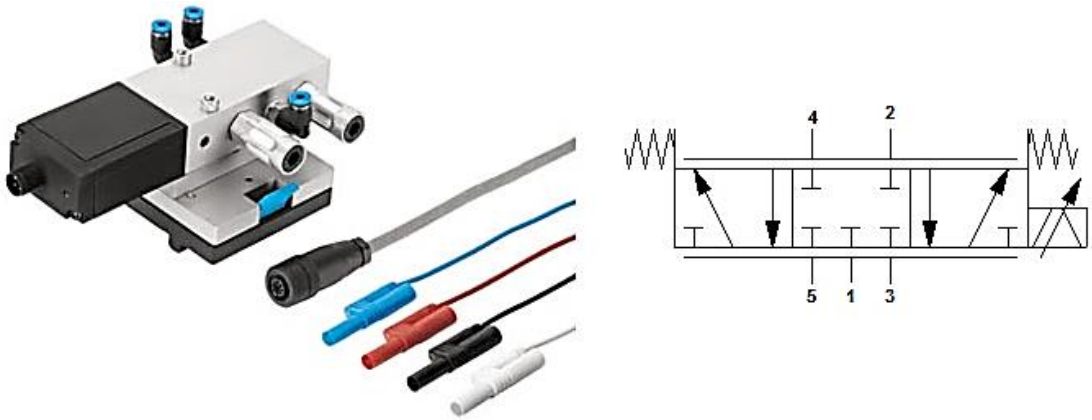


Figura 4: Válvula MPYE-5-1/8LF-010-B y símbolo según Norma ISO-1219.

Con una tensión de entrada de 5V la corredera de la válvula se coloca en la posición intermedia cerrando las vías de salida, no hay paso de aire más que la mínima fuga natural hacia las vías de escape debido a la forma constructiva de la válvula. A 10V y a 0V la corredera de la válvula se coloca en sus posiciones finales, bien hacia un extremo, dejando pasar el máximo caudal desde la vía 1 a la 2, o bien en el otro extremo, dejando pasar el máximo caudal de 1 a 4. Existen pequeñas fugas de 1 a 3 y de 1 a 5 en todo caso (vías de escape).

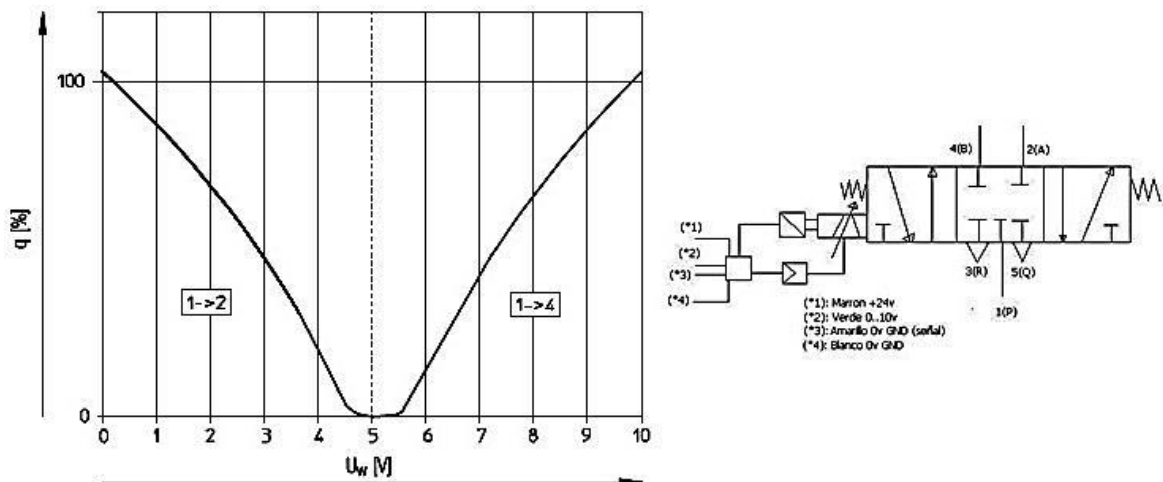


Figura 5: Caudal de salida vs Voltaje aplicado.

Un solenoide actúa directamente sobre la corredera de la válvula como un transductor electromecánico de posición. Un control electrónico de la posición de la corredera (realimentación del control de posición) permite obtener buenas respuestas estáticas y dinámicas, que quedan reflejadas en la baja histéresis (por debajo del 0,3%), bajo tiempo de respuesta (5ms) y alta frecuencia máxima (100Hz). La válvula es particularmente apropiada para el uso como un elemento final de control, y por lo tanto como un controlador de posición de un cilindro neumático.

2.1.4 Cilindro sin vástago. Este es un actuador neumático el cual posee un carro externo que se desliza a lo largo de la camisa del cilindro a medida que entra aire en una de sus cámaras (Figura 6), por lo que recibe el nombre de cilindro lineal sin vástago, la carrera máxima de este cilindro es de 27cm, pero debido a los topes de amortiguamiento de 3.5cm cada uno solo se alcanza un recorrido desde 3.5cm a 20cm.

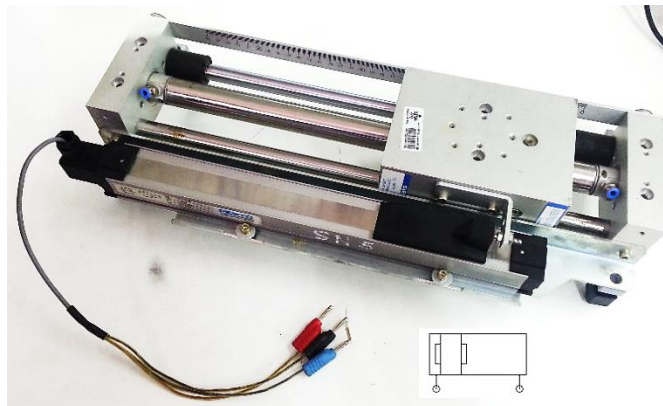


Figura 6: Cilindro neumático sin vástago y símbolo según Norma ISO-1219.

2.1.5 Potenciómetro lineal. Es una resistencia variable de tres pines (Figura 7), la cual se acopla a un lado del cilindro y mediante una paleta deslizante se logra medir la posición del carro. El potenciómetro se alimenta con una fuente regulada a 10VDC y a medida que varía la posición del carro varía a su vez la resistencia y por tanto el voltaje de salida en un rango de 0-10VDC para un recorrido de 0cm a 22.5cm.



Figura 7: Potenciómetro lineal MLO-POT-225-TLF y símbolo según Norma ISO-1219.

2.1.6 PLC S7-300. El PLC S7-300 (Figura 8) sirve de controlador y está compuesto por una CPU SIMATIC 314C-2DP [11], lo cual nos indica que posee dos puestos para conexión PROFIBUS DP, también tiene integrado un módulo de E/S digitales y uno de E/S analógicas, además permite la programación de controladores PID con periodo de ciclo de 5ms.



Figura 8: PLC S7-300 con CPU 314C-2DP.

Las entradas y las salidas analógicas se configuran mediante software para realizar lecturas y escrituras de 0-10V con pre-filtrado de 60Hz.

2.2 MÉTODOS DE DISEÑO Y SINTONIZACIÓN DE CONTROLADORES PID.

Existen varias técnicas de diseño y sintonización de controladores PID para sistemas en lazo abierto y cerrado [5], primeramente se debe saber qué clase de controlador se requiere implementar, ya que este puede ser solo proporcional (P), proporcional-integral (PI), proporcional-derivativo (PD), o proporcional-integral-derivativo (PID), según los requerimientos de diseño, para este caso se requiere eliminar el error de estado estable y disminuir el sobrepaso, por lo que se necesita una acción integral y una derivativa junto con la ganancia proporcional.

A continuación se exponen algunos métodos de diseño y sintonización de controladores PID.

2.2.1 Método de las oscilaciones de Ziegler-Nichols (ZN). El objetivo que se persigue al sintonizar un controlador PID mediante el método de ZN en lazo cerrado, conocido también como el método de las oscilaciones (Figura 9), es ajustar mediante el uso de tablas los parámetros del regulador para conseguir que el sistema en lazo cerrado responda con una razón de amortiguamiento de $\frac{1}{4}$.

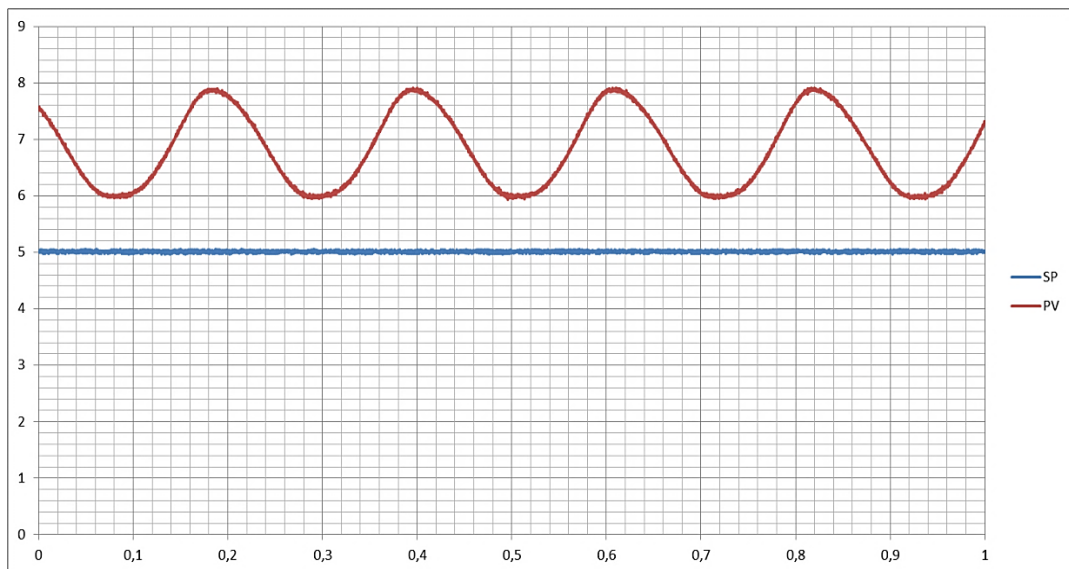


Figura 9: Respuesta oscilatoria con $K_p=1.5$.

Mediante este método se determinan dos parámetros denominados ganancia última K_u y periodo último T_u , a partir de los cuales se obtienen los valores de K_p , T_i y T_d .

La sintonía de un PID mediante este método consiste en:

1. Ajustar, con el lazo cerrado, la ganancia proporcional K_p a un valor inicial pequeño y anular las ganancias integral ($T_i=\infty$) y derivativa ($T_d=0$).

2. Incrementar gradualmente la ganancia proporcional K_p hasta que el sistema presente una oscilación permanente de amplitud constante. Puede ser necesario realizar cambios en el SetPoint para obtener la oscilación.
3. Asignar a K_u el valor de K_p que origina la oscilación.
4. Medir el periodo de la oscilación para esta ganancia K_u . Este periodo es el periodo último T_u .
5. Ajustar los parámetros del regulador de acuerdo con la Tabla 1.

Regulador	K_p	T_i	T_d
P	$0,5K_u$		
PI	$0,4K_u$	$0,8T_u$	
PID	$0,6K_u$	$0,5T_u$	$0,125T_u$

Tabla 1: Ajuste de parámetros en lazo cerrado para un PID propuesta por ZN.

La aplicación de este método implica que siempre tendremos sobrepasos en la respuesta del sistema, y el objetivo es disminuirlo al máximo posible, no superior al 3% según criterios de diseño establecidos.

2.2.2 Método del Relé de Åström. Åström y Hägglund propusieron en 1984 una variante en la que se consigue una oscilación mantenida de pequeña amplitud mediante un relé y a partir de ella, se deducen los valores de K_u y T_u [6].

Posteriormente se aplica la misma tabla de sintonía que en el método de ZN en bucle cerrado (Tabla 1) La salida del sistema es una oscilación de periodo T_u y de amplitud α . La ganancia última se obtiene mediante la siguiente ecuación.

$$K_u = \frac{4\lambda}{\pi\alpha}$$

Donde λ es la amplitud de la señal del relé.

$$CV = \begin{cases} \lambda, & e(t) \geq 0 \\ -\lambda, & e(t) < 0 \end{cases}$$

Este método es un poco más elaborado y es el utilizado como método de auto sintonización en algunos controladores industriales.

2.2.3 Diseño mediante herramientas computacionales. Este método consiste en utilizar software especializado para diseñar el controlador de forma interactiva, como es el caso de la herramienta SISOTOOL de MATLAB (Figura 10). La herramienta IDENT permite ingresar un modelo de la planta en lazo abierto, seleccionar la arquitectura de control y de manera interactiva se puede ajustar la ganancia de lazo cerrado, añadir criterios de diseño y mover los polos y ceros del controlador hasta obtener una respuesta adecuada. El diseño del controlador se puede realizar tanto en el dominio del tiempo como en el dominio de la frecuencia mediante los parámetros, margen de ganancia, margen de fase y ancho de banda.

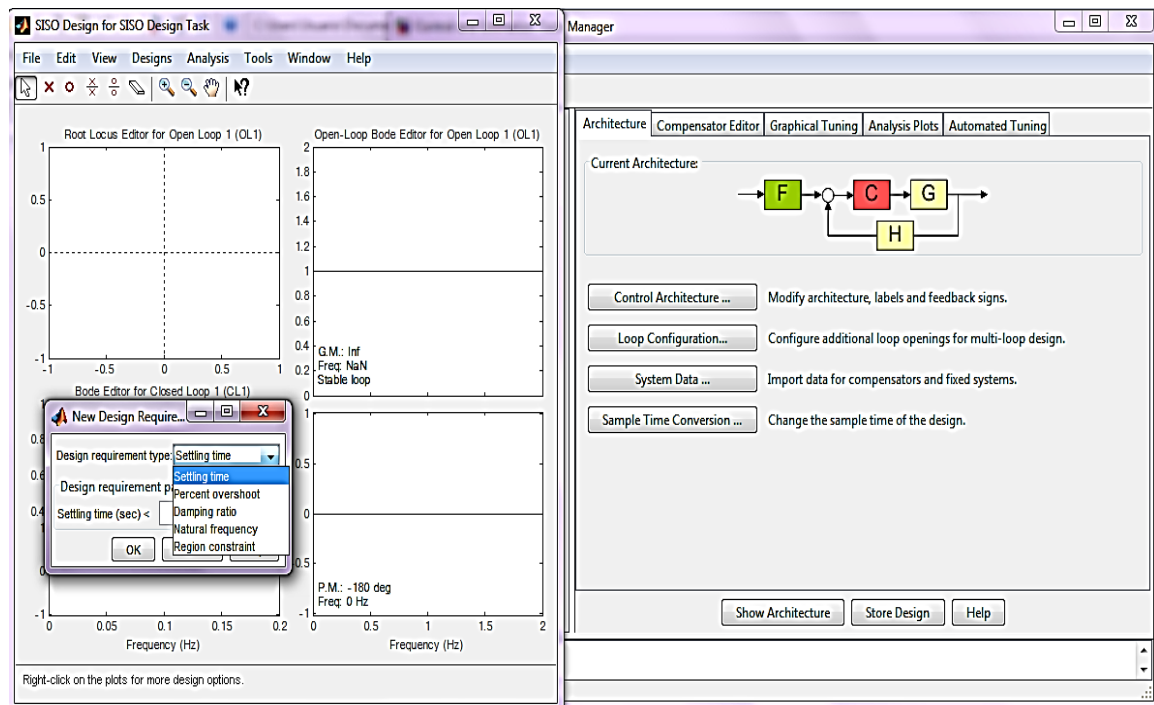


Figura 10: Herramienta SISOTOOL de MATLAB.

3 METODOLOGÍA EMPLEADA PARA EL DISEÑO DEL CONTROLADOR

Es importante resaltar que no se tiene un conocimiento previo del comportamiento del sistema, por lo que resulta apropiado realizar un análisis dinámico tanto en lazo abierto como cerrado, con el objetivo de observar el comportamiento transitorio y estático del mismo. Una vez se ha analizado el sistema, se obtiene un modelo aproximado mediante identificación [7], y se diseña una técnica de control PID adecuada para cumplir con los requisitos de diseño establecidos, para este caso se tiene que el error de estado estable sea menor a 1mm y el sobrepaso máximo no supere el 3%.

3.1 ANÁLISIS DINÁMICO EN LAZO ABIERTO

En este caso se monta el sistema neumático en lazo abierto (Figura 11) y se conecta al controlador cuya única función en este análisis es adecuar la señal que le llega a la válvula proporcional.

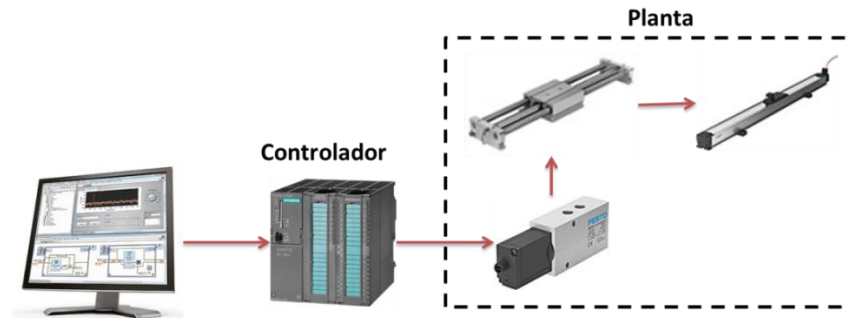


Figura 11: Sistema en lazo abierto.

Inicialmente en el controlador no se tiene programado ninguna acción de control, por lo que podría decirse que su función de transferencia es 1. Para observar el comportamiento dinámico del sistema en lazo abierto, se le aplica una señal tipo escalón del 60% a la válvula proporcional, obteniéndose una clara respuesta que se puede observar en la Figura 12; la señal del potenciómetro empieza a aumentar rápidamente, indicando que la posición del cilindro se va hacia a uno de los extremos del cilindro hasta colisionar con el mismo, esto es una clara evidencia de que el sistema es inestable ya que nunca alcanza una posición estable, lo que significa que si el eje fuera más largo el vástago seguiría moviéndose indefinidamente hasta encontrar un tope.

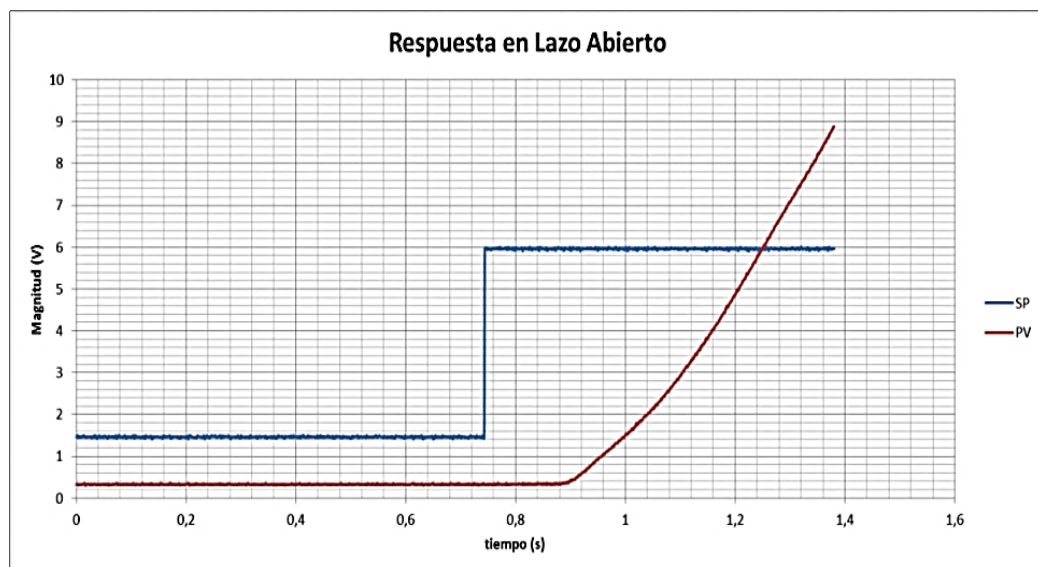


Figura 12: Respuesta al escalón del sistema en lazo abierto.

3.2 ANÁLISIS DINÁMICO EN LAZO CERRADO

Para este caso se conecta la realimentación al PLC (Figura 13), al cual se le ha programado una acción de control proporcional $K_p=1$, las acciones integral T_i y derivativa T_d se mantienen desactivadas.

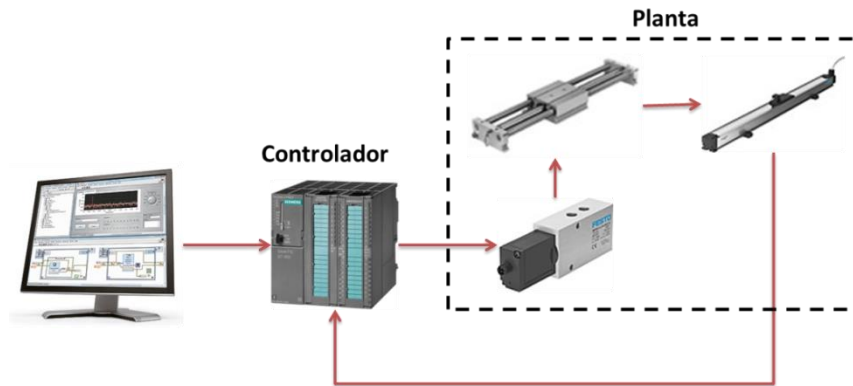


Figura 13: Sistema en lazo cerrado.

Desde el PC se le envía la orden al PLC para aplicar una señal tipo escalón del 50%. En la Figura 14 se observa una respuesta rápida del sistema con un comportamiento sub-amortiguado y estable. Debido a este comportamiento dinámico se procede a realizar la identificación en lazo cerrado, y a partir de este modelo se determina de forma indirecta la función de transferencia de lazo abierto.

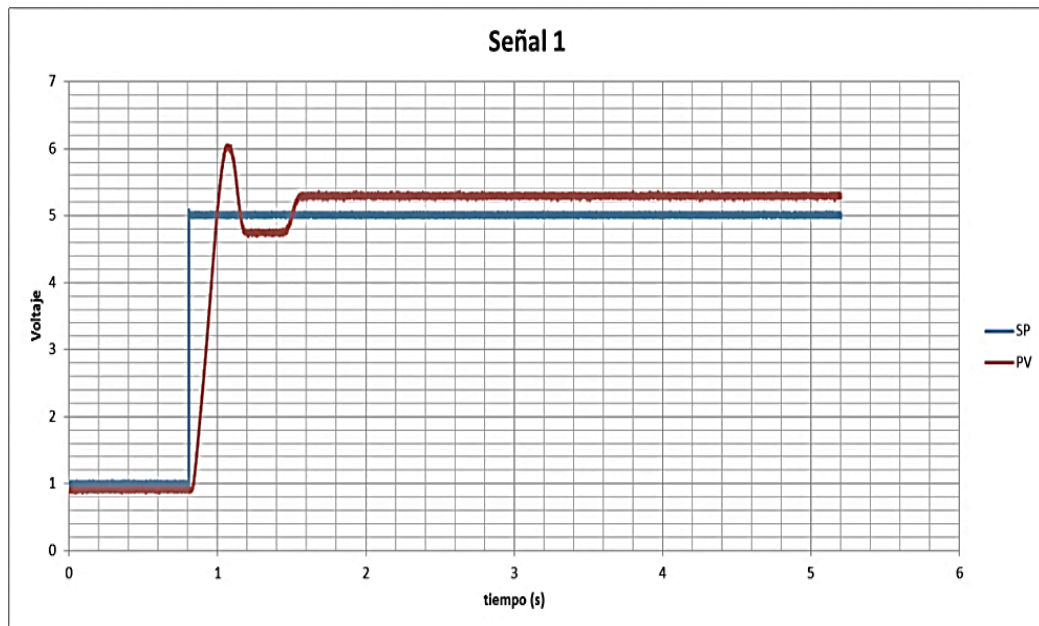


Figura 14: Señal 1, respuesta al escalón en lazo cerrado.

3.3 IDENTIFICACIÓN DEL SISTEMA CON HERRAMIENTA IDENT

Para la identificación del sistema neumático se realiza el montaje de la Figura 15, este montaje está compuesto por una válvula proporcional de caudal conectada a un cilindro lineal sin vástago mediante mangueras de 3mm de diámetro, especiales para aplicaciones neumáticas, el cilindro está provisto de un potenciómetro lineal resistivo de 5k Ω alimentado con una tensión de 10VDC.

La señal del potenciómetro se realimenta al PLC el cual la procesa junto con la señal de consigna para poder enviar una acción de control a la válvula [8]. Tanto la señal de consigna como la señal proveniente del potenciómetro se adquieren mediante una tarjeta USB NI-DAQ 6008 de National Instruments a una frecuencia de muestreo de 5kHz. El valor del punto de consigna se ingresa en una interfaz gráfica en el PC, y se envía al PLC mediante una conexión MPI, desde la interfaz se pueden modificar y monitorear los parámetros y variables del controlador.

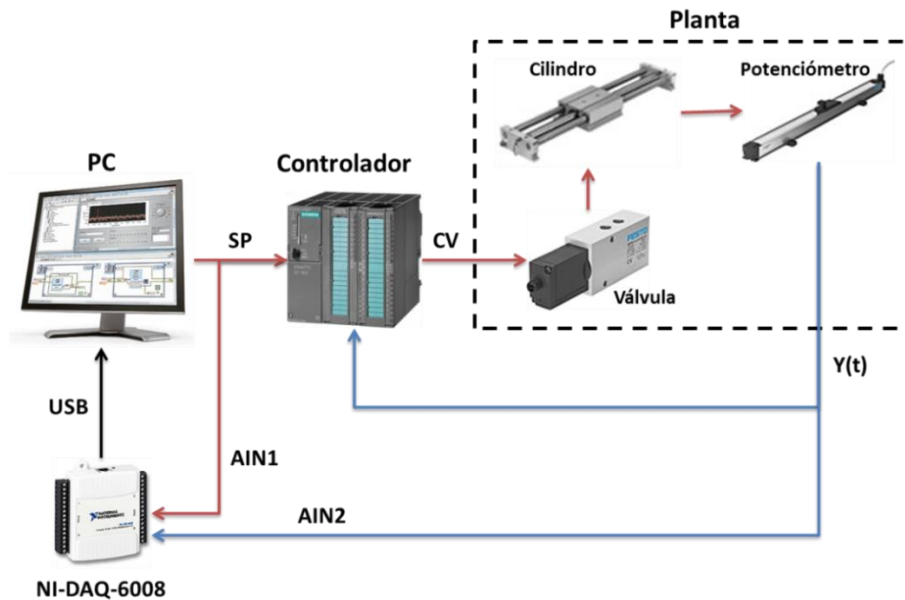


Figura 15: Sistema en lazo cerrado con controlador y tarjeta de adquisición.

Antes de empezar con la identificación es importante aclarar que el sistema posee un comportamiento no lineal, ya que el modelo matemático cambia sus características estáticas y dinámicas a medida que cambia la presión de entrada, carga a movilizar, posición del vástago, humedad o temperatura del aire de alimentación, por tanto se toma un punto de operación del 50% alrededor del cual se realiza la identificación del sistema, esto incide en que el controlador responderá de manera adecuada conforme a los criterios de diseño solo para este punto de consigna.

3.3.1 Procedimiento de Identificación. Para la identificación del sistema se utiliza la herramienta IDENT de MATLAB R2010 para lo cual se adquiere una nueva respuesta para el proceso de identificación (Figura 16), y se toma la primera respuesta (Figura 14), como señal de validación.

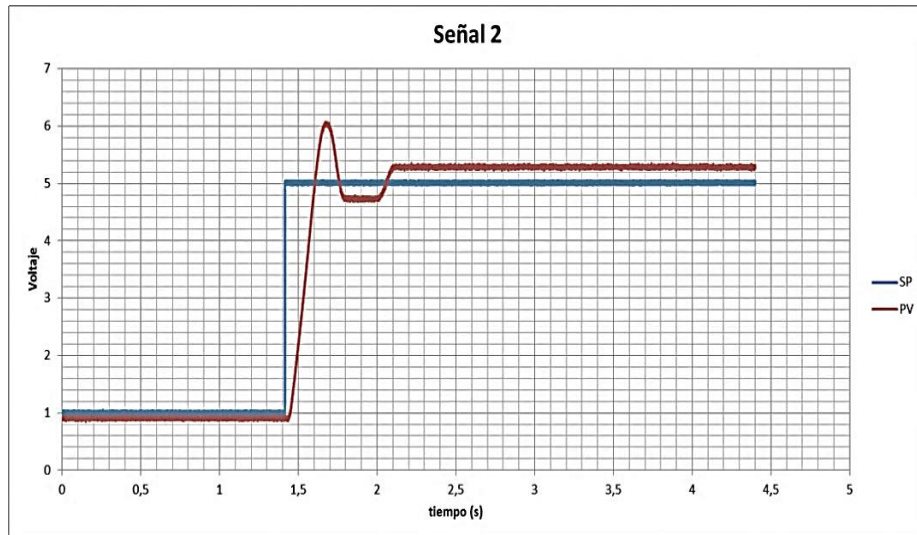


Figura 16: Señal 2, respuesta en lazo cerrado.

Antes de empezar con la identificación, se deben cargar los datos de la variable de proceso, punto de consigna y periodo de muestreo en MATLAB, como se muestra a continuación:

Paso 1: Se crean dos variables en el Workspace (Figura 17), se copian los datos de las dos señales desde Excel a una variable para el SP y otra para la PV.

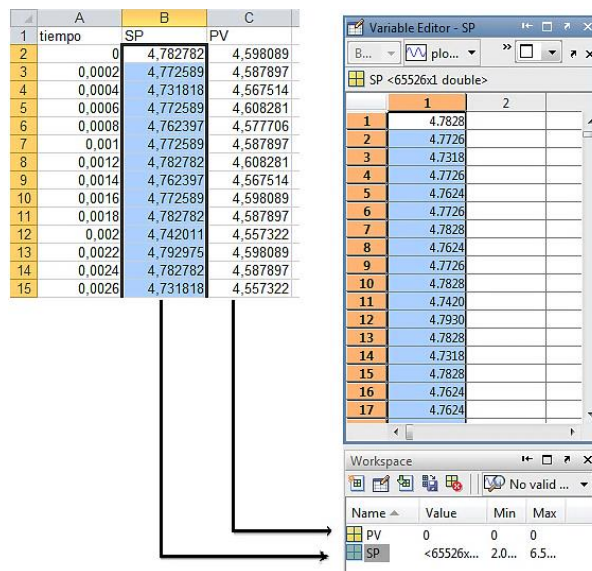


Figura 17: Creación de señales en el Workspace.

Paso 2: Las variables SP y PV se importan a la IDENT como datos en el dominio del tiempo (Figura 18), con periodo de muestreo de 0.0002s ya que la frecuencia de muestreo es de 5kHz.

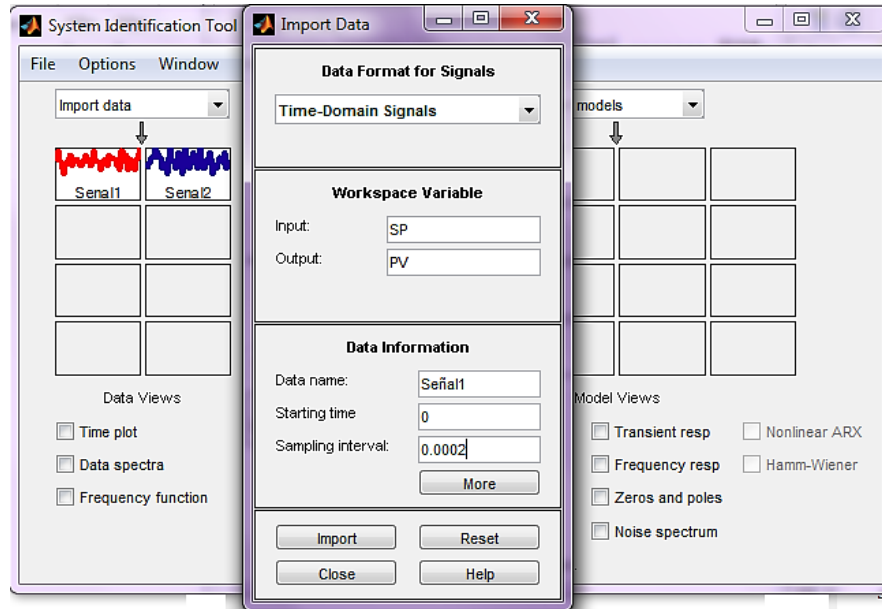


Figura 18: Importación de los datos a la IDENT.

Paso 3: Se ingresan los datos de trabajo y los de validación, arrastrando con clic sostenido cada una de las señales hasta la posición correspondiente (Figura 19).

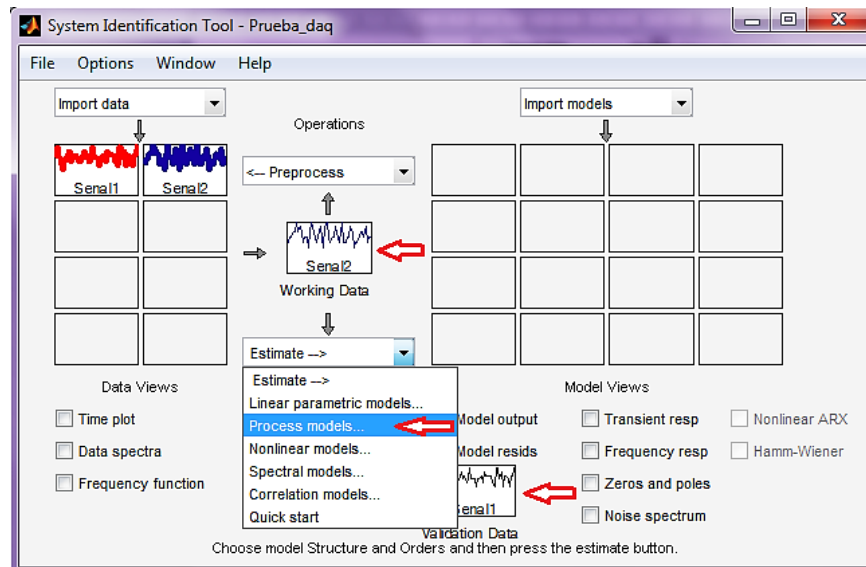


Figura 19: Señales para identificación y validación.

Paso 4: Se estima el modelo del proceso (Figura 20), ingresando el número de polos del sistema (2 polos) y el tipo de sistema (sub amortiguado).

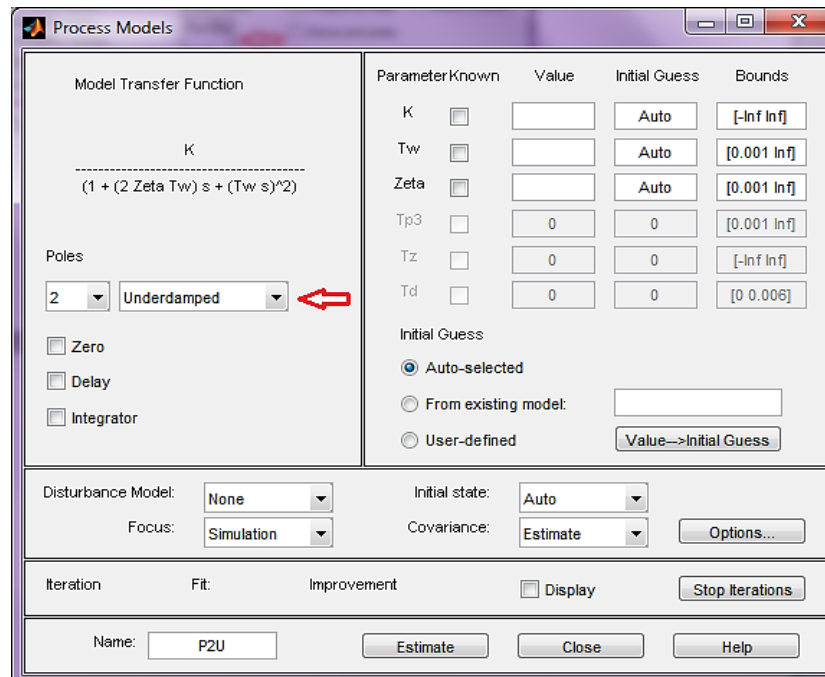


Figura 20: Proceso de identificación.

Paso 5: Después de estimar el modelo se procede a visualizar la validación y determinar el porcentaje de aproximación (Figura 21), para este caso se obtiene un 88.95%.

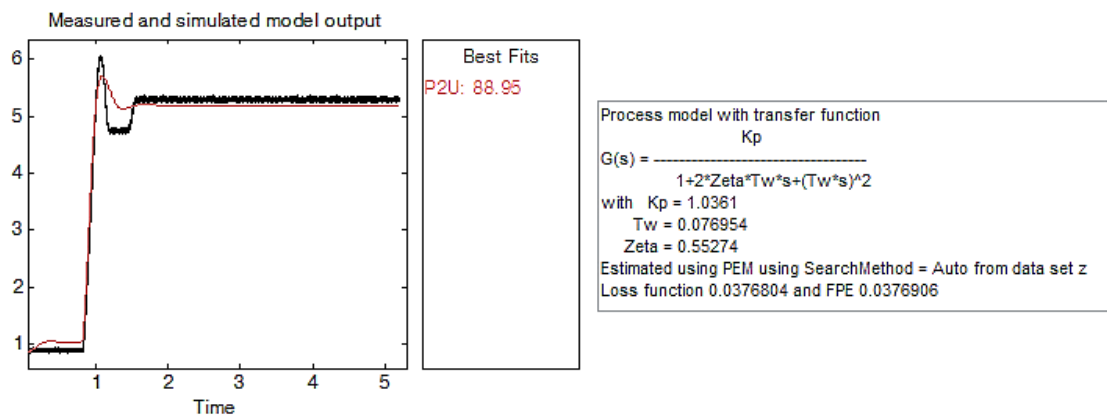


Figura 21: Validación del modelo estimado.

Paso 6: Se exporta el modelo estimado al Workspace y utilizando el siguiente código se obtienen las funciones de transferencia de lazo cerrado, lazo abierto, y sus respectivos lugares de las raíces junto con la respuesta al escalón (Figura 22).

```

%% Parametros del sistema
clc
sys_est = P2U;           % Modelo identificado.
Kp = sys_est.Kp.value;   % Ganacia.
Tw = sys_est.Tw.value;   % Periodo natural.
Zeta = sys_est.Zeta.value; % Factor de amortiguamiento zita.



---


%% Analisis Lazo Cerrado
Gsys_LC = minreal(tf(Kp,[Tw^2 2*Zeta*Tw 1])) % Función de transferencia LC
p = pole(Gsys_LC) % Polos del sistema.
K = dcgain(Gsys_LC) % Ganacia en lazo cerrado.
figure('NumberTitle','off','Name','Analisis en Lazo Cerrado')
subplot(2,1,1),rlocus(Gsys_LC)
title('Lugar geometrico de las raices')
subplot(2,1,2),step(Gsys_LC), grid on
title('Respuesta al Escalon')



---


%% Analisis Lazo Abierto
Gsys_OL = minreal(Gsys_LC/(1-Gsys_LC)) % Función de transferencia LA.
p = pole(Gsys_OL) % Polos del sistema.
K = dcgain(Gsys_OL) % Ganacia en lazo abierto.
figure('NumberTitle','off','Name','Analisis en Lazo Abierto')
subplot(2,1,1),rlocus(Gsys_OL)
title('Lugar geometrico de las raices')
subplot(2,1,2),step(Gsys_OL), grid on
title('Respuesta al Escalon')

```

Función de transferencia en lazo cerrado:

$$G_{sys_{LC}} = \frac{175}{s^2 + 14.37s + 168.9}$$

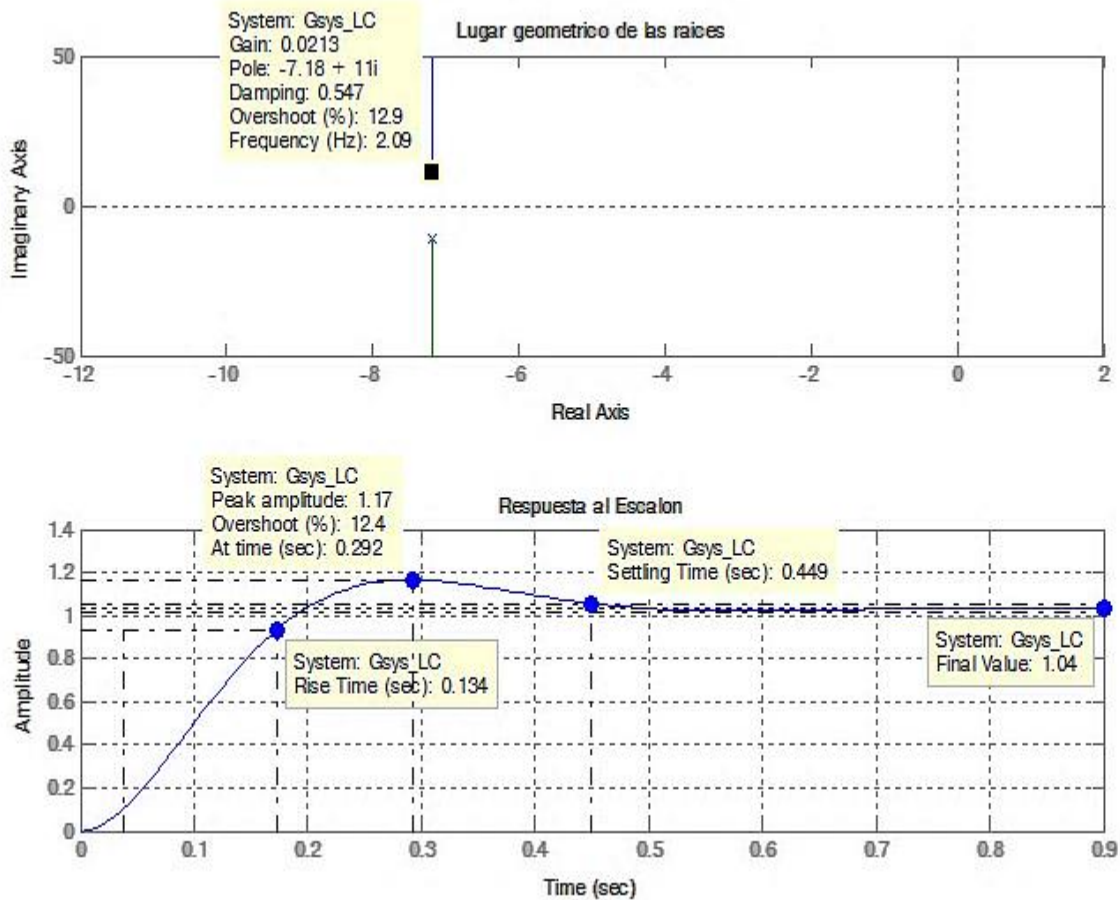


Figura 22: Análisis en lazo cerrado. Lugar geométrico de las raíces (arriba). Respuesta al escalón (Abajo).

Función de transferencia en lazo abierto:

$$G_{sys_{LC}} = \frac{Kp * G_{sys_{LA}}}{1 + Kp * G_{sys_{LA}}}$$

$$G_{sys_{LA}} = \frac{G_{sys_{LC}}}{1 - G_{sys_{LC}}}$$

$$G_{sys_{LA}} = \frac{175}{s^2 + 14.37s - 6.102}$$

Si observamos el comportamiento y el lugar geométrico de las raíces (Figura 23), podremos observar que el modelo estimado es inestable tal como sucede con el sistema real.

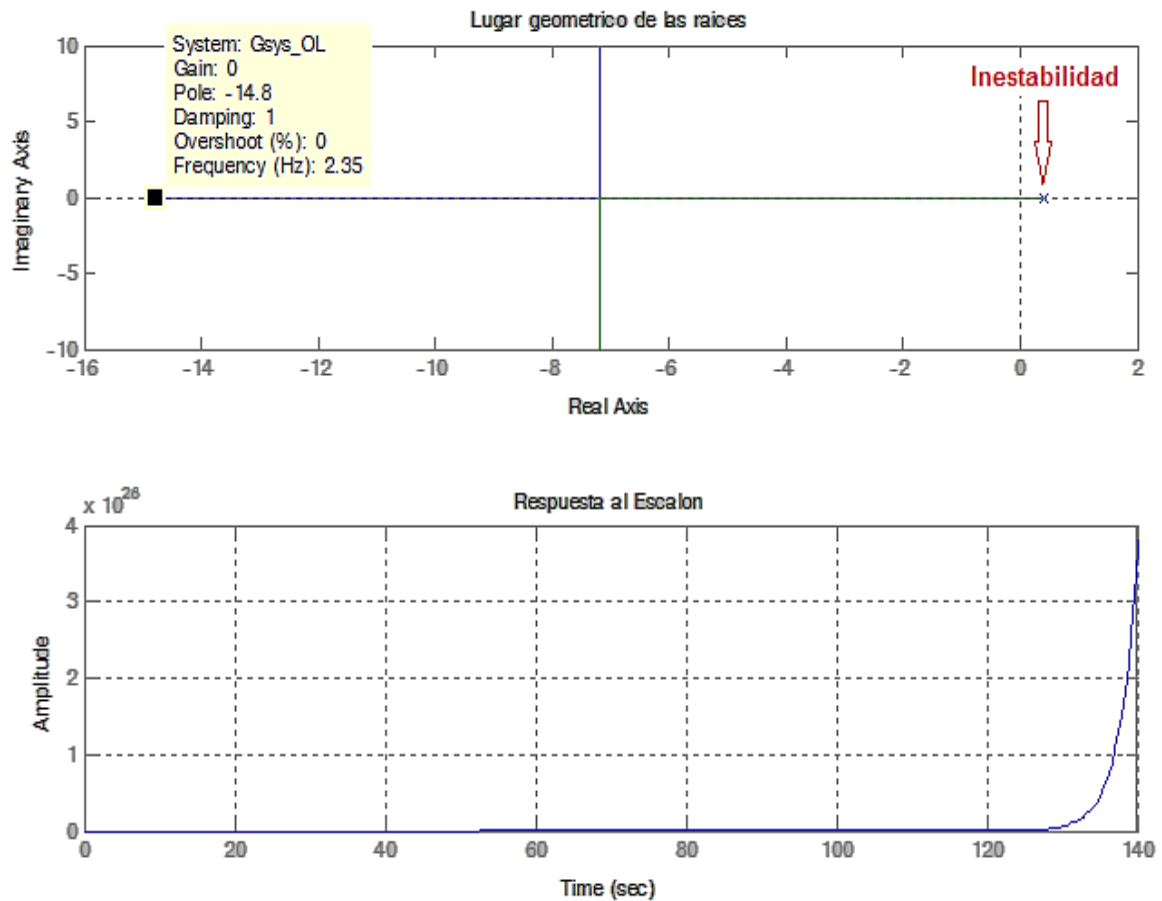


Figura 23: Análisis en lazo abierto. Lugar geométrico de las raíces (arriba). Respuesta al escalón (Abajo).

3.4 DISEÑO DEL CONTROLADOR

Para el diseño del controlador se utiliza la metodología de diseño mediante herramientas computacionales [9], ya que permite definir los requerimientos de diseño. A continuación se presenta el procedimiento.

Paso 1: Mediante el comando sisotool se ingresa a la herramienta el modelo de lazo abierto obtenido anteriormente y se escoge una arquitectura de control (Figura 24).

sisotool(Gsys_LA)

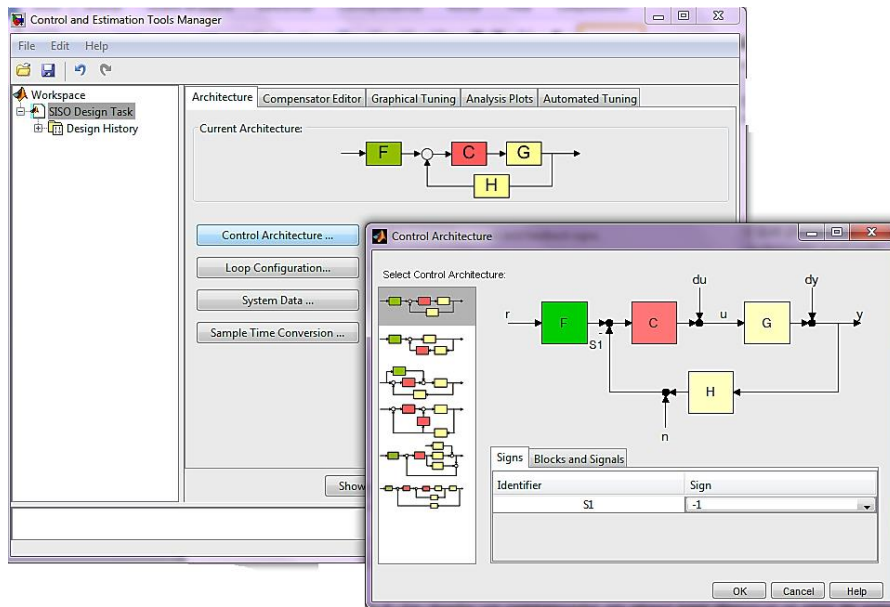


Figura 24: Herramienta de diseño sisotool.

Paso 2: Se añaden los requerimientos de diseño (Figura 25).

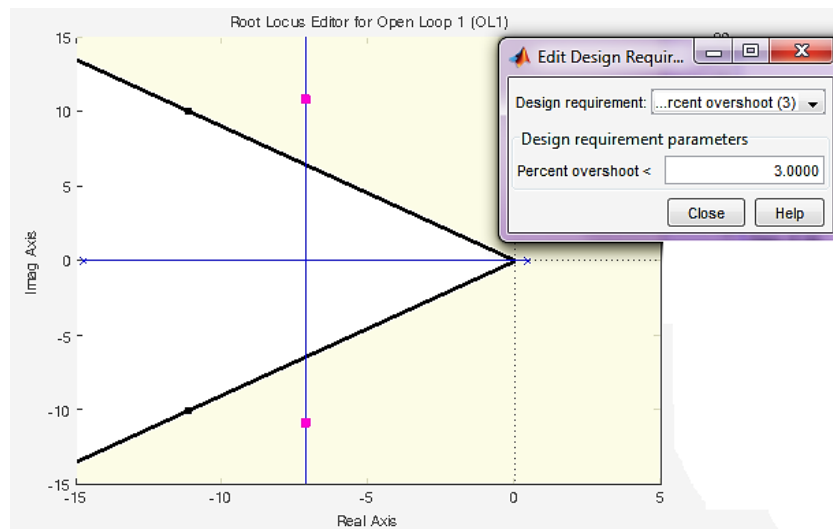


Figura 25: Herramienta de diseño sisotool, requerimientos de diseño.

Paso 3: Se diseña un compensador en atraso que permita disminuir al mínimo el error de estado estable (Figura 26).

El compensador en atraso tiene la característica de volver los sistemas inestables, por eso se observa que el sobrepaso y el tiempo de establecimiento aumentan, este comportamiento se puede mejorar con la ganancia derivativa [10].

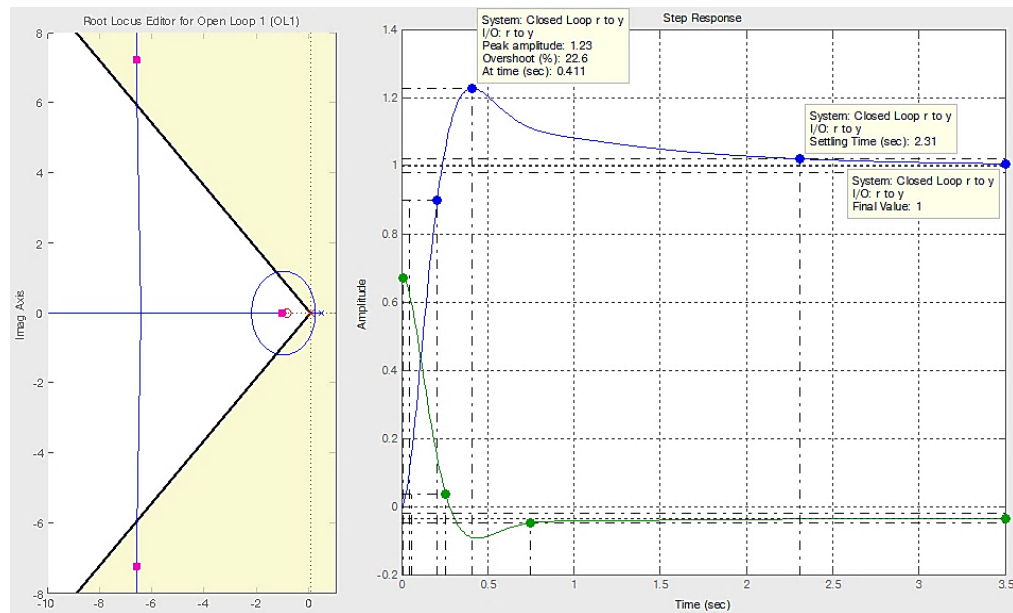


Figura 26: Compensador en adelanto y respuesta del sistema.

Paso 4: Se determinan los valores de las constantes K_p y T_i a partir del modelo del compensador obtenido (Figura 27).

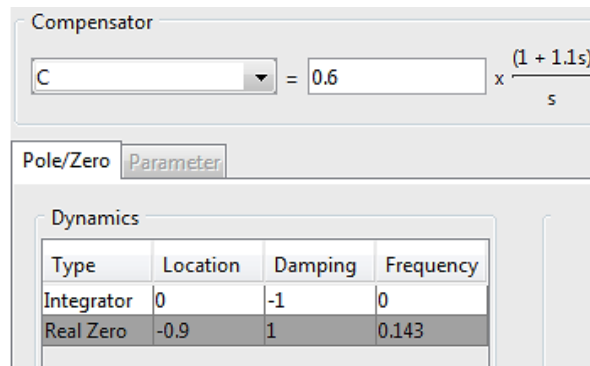


Figura 27: Modelo obtenido para el compensador en atraso.

Las constantes se obtienen resolviendo la igualdad siguiente,

$$K_p \left(1 + \frac{1}{T_i s} \right) = \frac{K_p}{T_i} \left(\frac{1 + T_i s}{s} \right) = 0.6 \frac{(1 + 1.1s)}{s}$$

Se obtienen las constantes,

$$K_p = 0.66.$$

$$T_i = 1.1s.$$

Debido a dificultades de ajustar una respuesta adecuada con los dos compensadores atraso y adelanto en conjunto, la constante de tiempo derivativa T_d se determina más adelante de forma experimental, y debido a que el modelo de segundo orden de la planta es una aproximación, las constantes K_p y T_i también tendrán que ser ajustadas manualmente para obtener una respuesta satisfactoria en el sistema real.

3.5 SIMULACIÓN DE LOS MODELOS

El software de simulación de sistemas neumáticos FLUIDSIM-P de FESTO, es una herramienta que permite montar diferentes tipos de circuitos neumáticos y configurar cada uno de los dispositivos. Ingresando características y parámetros específicos de cada componente se pueden obtener resultados muy parecidos a los reales.

Se empieza primero por el montaje de los componentes de los circuitos neumático y el de control (Figura 28). En el circuito de control se encuentra montado el PID junto con el solenoide de la válvula proporcional 1Y1, la realimentación del potenciómetro SB1, el enlace entre el circuito de potencia y control se realiza mediante estas etiquetas.

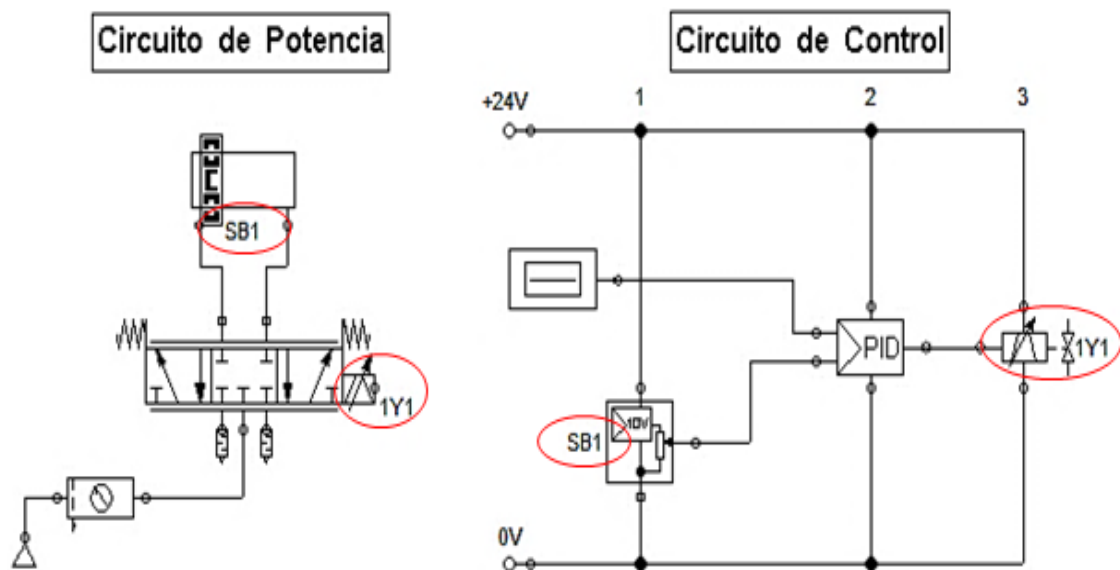


Figura 28: Circuito neumático de potencia y de control.

Luego se configuración los parámetros y características de cada uno de los componentes en cada uno de los circuitos (Figura 29), estos parámetros se obtienen de las hojas técnicas de cada componente que se encuentran en la página del fabricante [12].

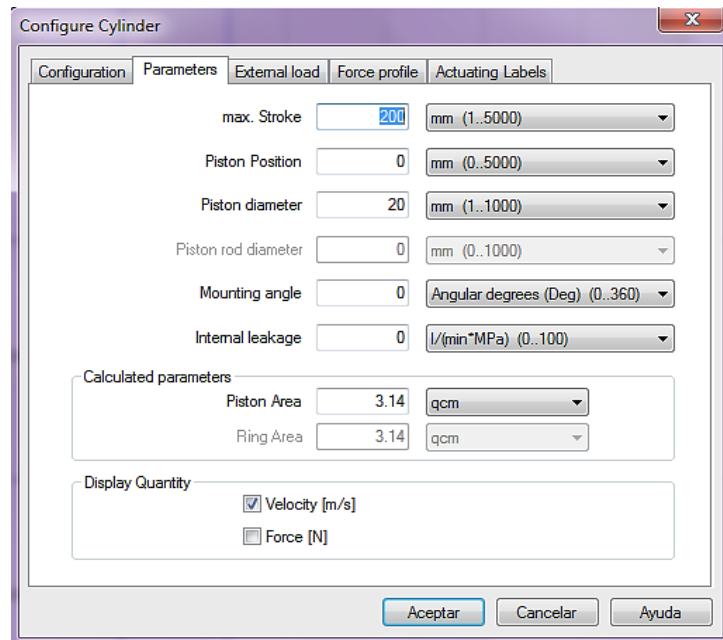


Figura 29: Ventana de configuración de componentes.

Al ingresar los valores de las constantes K_p y T_i calculadas anteriormente e iniciar la simulación (Figura 30), se observa una respuesta sin error de estado estable como se esperaba, al igual que el sobrepaso que es muy elevado como se observó en la gráfica obtenida mediante la herramienta sisotool.

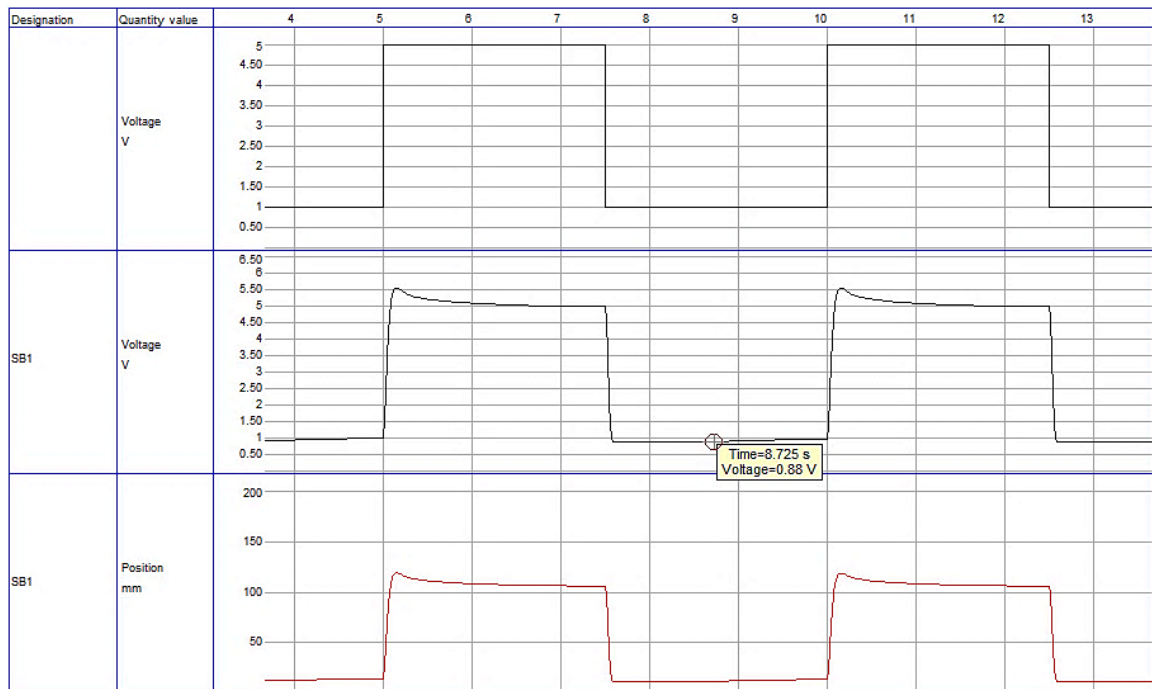


Figura 30: Respuesta del sistema con controlador PI.

Añadiendo la constante T_d y variando un poco las constantes K_p y T_i obtenidas se obtiene una respuesta bastante aceptable a los parámetros iniciales (Figura 31), para implementarla en el sistema real.

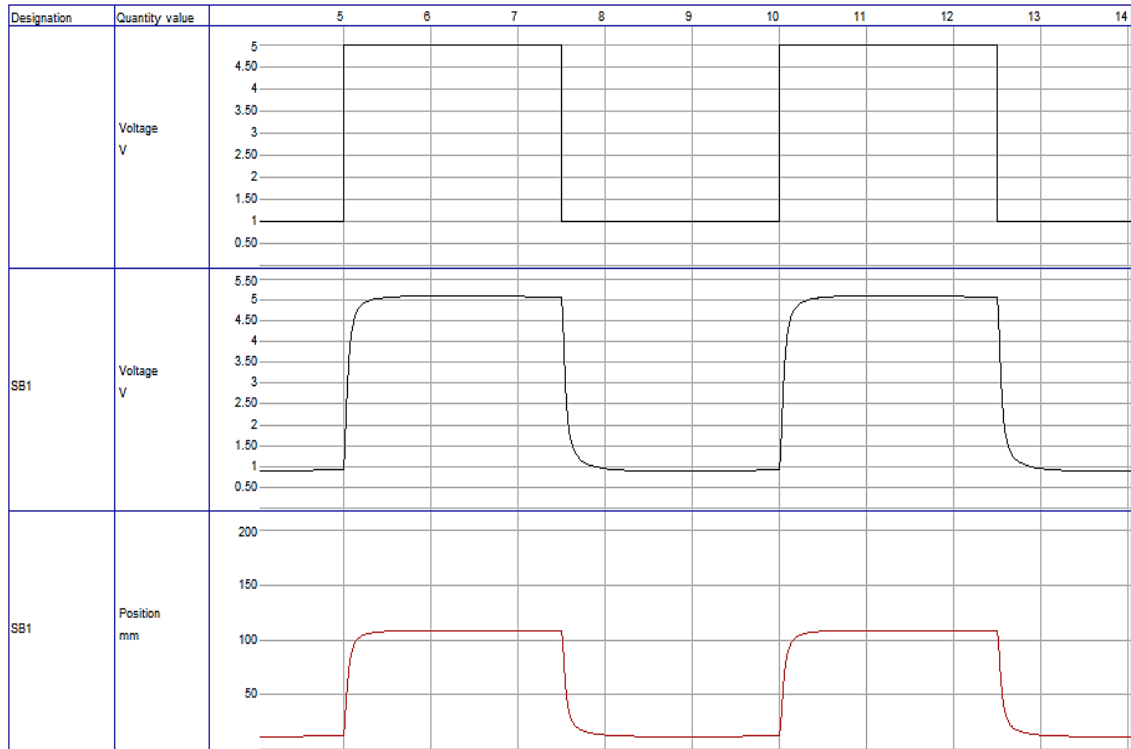


Figura 31: Respuesta del sistema con controlador PID.

Las nuevas constantes obtenidas son:

$$K_p = 0.8.$$

$$T_i = 1.2s = 1200ms.$$

$$T_d = 0.03s = 30ms.$$

Si aplicáramos el método de ZN en lazo cerrado para determinar las constantes del controlador PID obtendríamos:

$$K_u = 1.5.$$

$$T_u = 0.24s.$$

Con lo que se obtienen las constantes:

$$K_p = 0.9.$$

$$T_i = 120ms.$$

$$T_d = 30ms.$$

Se observa que los resultados son muy parecidos a excepción de la constante Ti.

3.6 IMPLEMENTACIÓN EN UN PLC

En la etapa de implementación del PID (Figura 32), se utilizó un PLC de la familia SIMATIC S7-300 de la marca SIEMENS, cuya CPU es de referencia 314C-2DP, ésta CPU tiene integrado un módulo de 5 entradas y 2 salidas analógicas con resolución de 16bits.

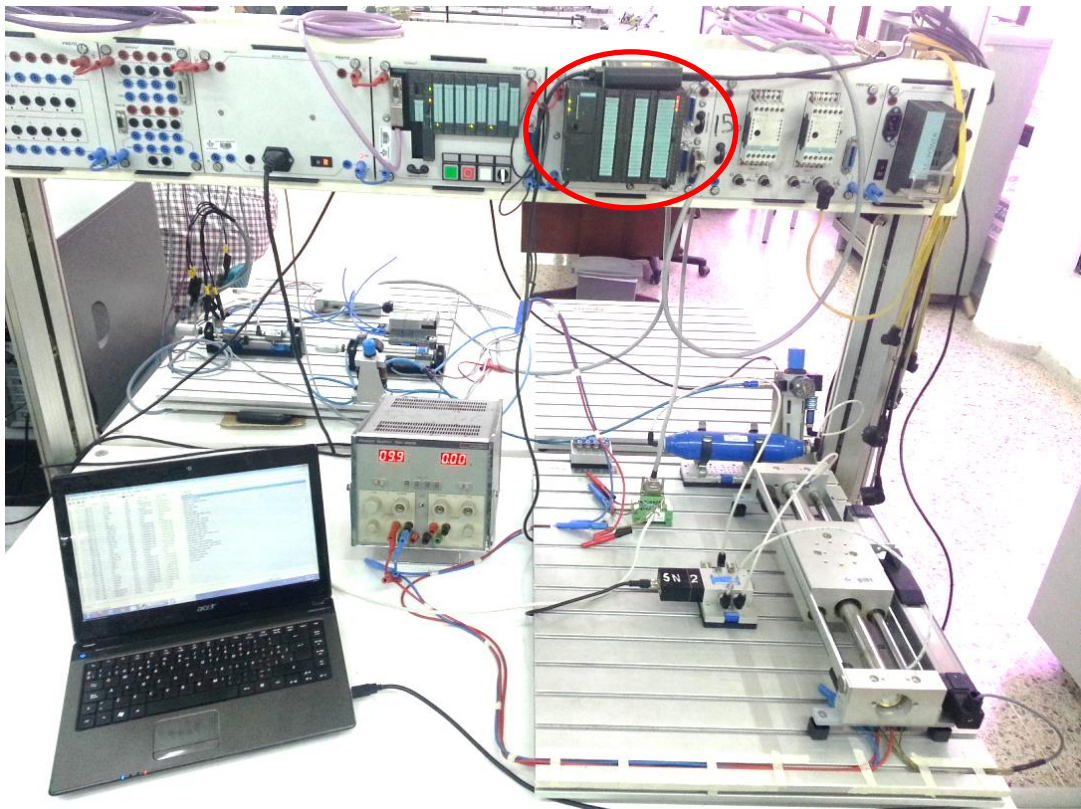


Figura 32: Montaje control PID con PLC S7-300.

El software STEP7 contiene en sus librerías un bloque de función FB41 para la regulación continua llamado COUNT_C [11], este bloque funciona con un algoritmo PID tipo industrial (Figura 33). Mediante la parametrización es posible conectar o desconectar las funciones parciales del regulador PID, adaptándolo así al proceso regulado.

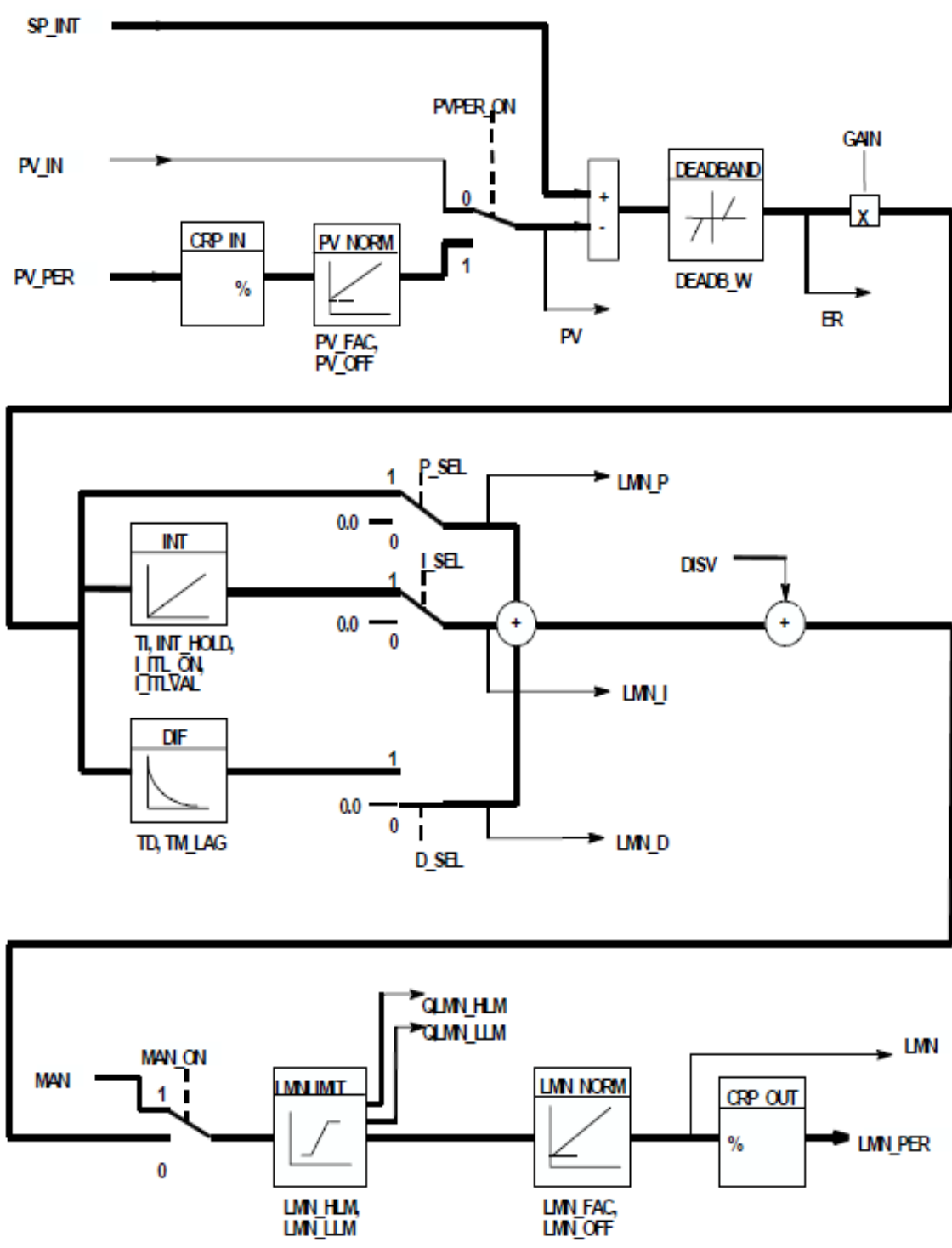


Figura 33: Estructura regulador PID 'COUNT_C'.

Para que el bloque FB41 funcione correctamente, se debe insertar dentro en un bloque de organización de alarmas cíclicas como el OB35 y ajustar el periodo de interrupción, para este caso se ajustó a 5ms (Figura 34), el tiempo mínimo recomendable para esta CPU.

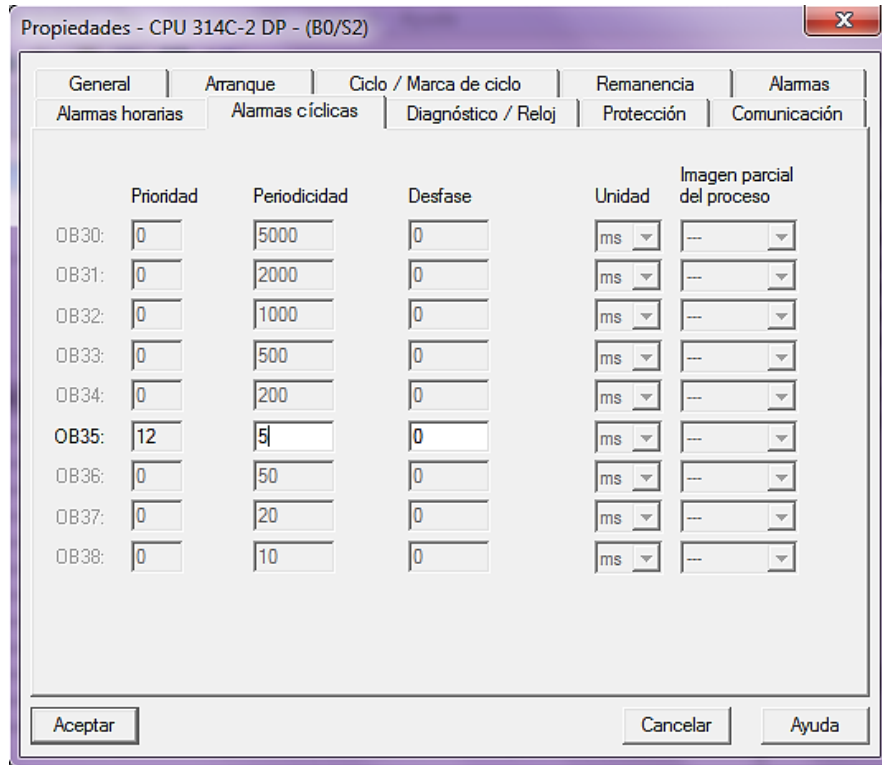


Figura 34: Ajuste del periodo de interrupción del bloque OB35.

Consultar los anexos para más información acerca de la implementación paso a paso del bloque COUNT_C en STEP7.

3.7 DESARROLLO DE LA INTERFAZ

En esta etapa se diseña en el Software de ingeniería SIMATIC WinCC Flexible una interfaz hombre máquina (HMI) en el PC que se encuentra enlazada al PLC mediante protocolo MPI (Figura 35). La HMI permite tanto observar, ó modificar los datos del controlador PID implementado en el PLC [13].

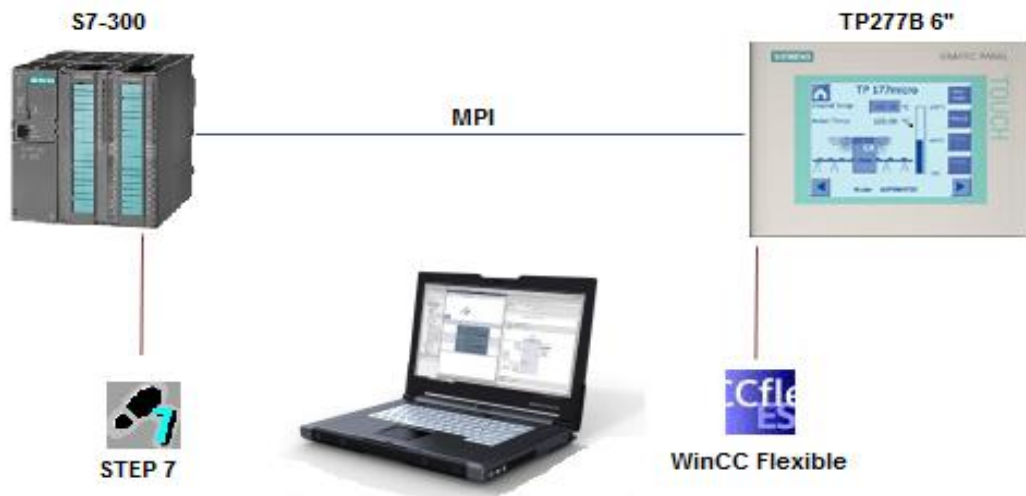


Figura 35: Conexión PLC-HMI.

El diseño de HMI consta de una arquitectura paralela del controlador PID implementado en el PLC (Figura 36), con opción de modificar el setpoint y las constantes del controlador, observar la evolución de la variable de proceso, variable de control y del error. Además permite habilitar/deshabilitar las constantes Proporcional, Integral y Derivativa.

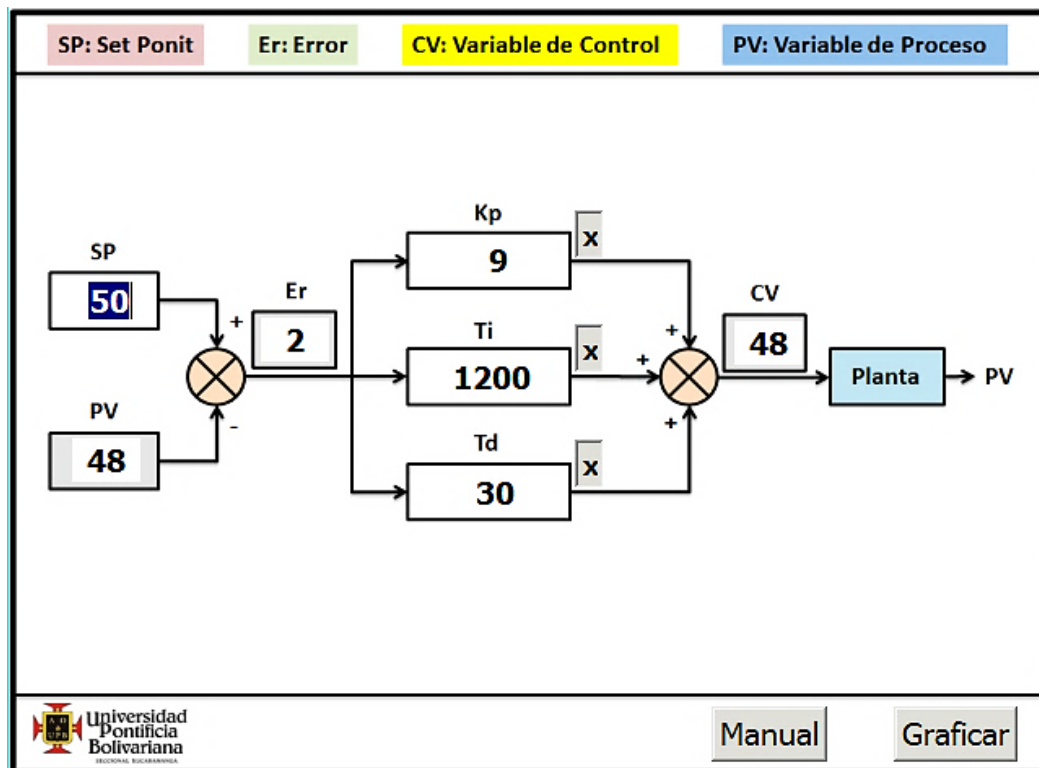


Figura 36: HMI del regulador PID.

Adicionalmente se diseñó una pantalla para graficar el setpoint, variable de proceso y variable de control, con opción de ingresar una señal de perturbación para realizar pruebas de cancelación del error con la constante integral.

Para una mejor comprensión de los pasos seguidos para implementar diseñar e implementar la HMI consulte los anexos adjuntos.

3.8 RESULTADOS OBTENIDOS

Con el objetivo de verificar el desempeño del controlador PID, se diseñó una pantalla para graficar la evolución de la variable de proceso ante una entrada de perturbación o un cambio en el punto de consigna SP.

A continuación en la Figura 37 se muestra el comportamiento de la variable de proceso PV (Color azul), ante un cambio del SP del 10% hasta el 50% (Color rojo), se observa claramente que se ha disminuido el sobrepaso por debajo del 3% y el error es casi nulo (Color amarillo).

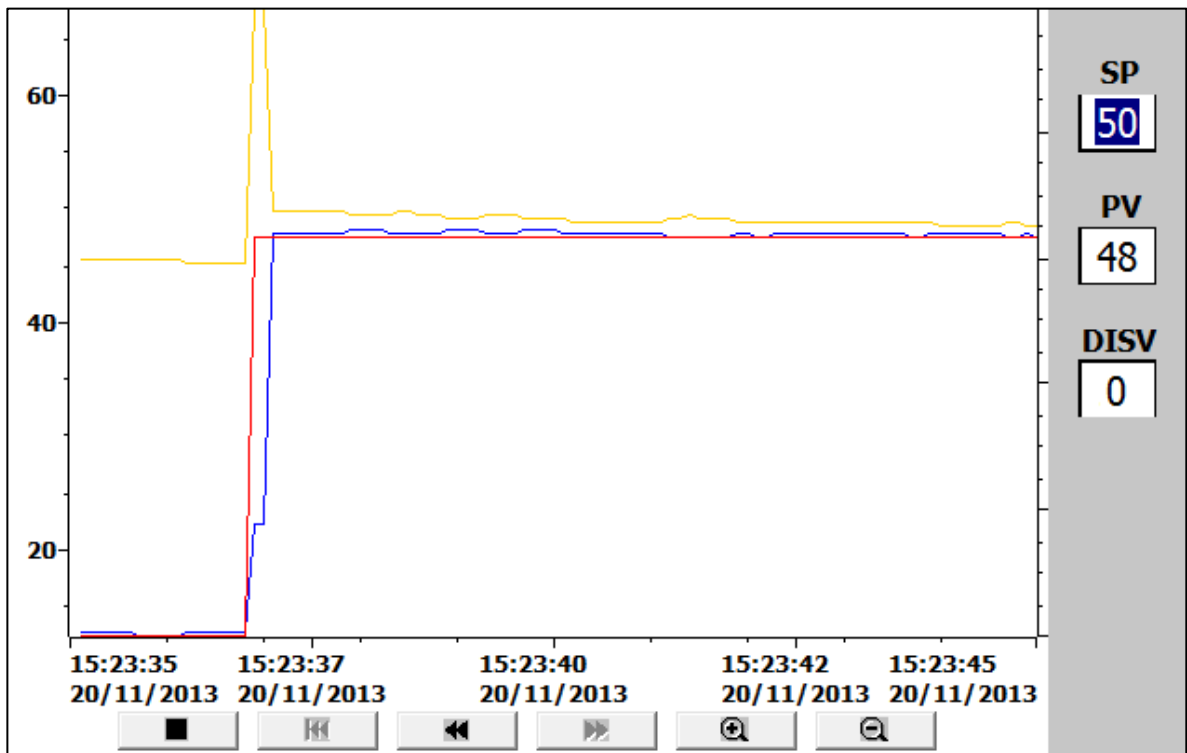


Figura 37: Respuesta del sistema real sin perturbación.

Luego se realiza otra prueba con la diferencia que ahora se añade una entrada de perturbación del 10% a la salida del controlador (Figura 38), se puede observar

que la acción integral cumple con su tarea de reducir el error llevando a la variable de proceso hacia el punto de consigna del 50%.

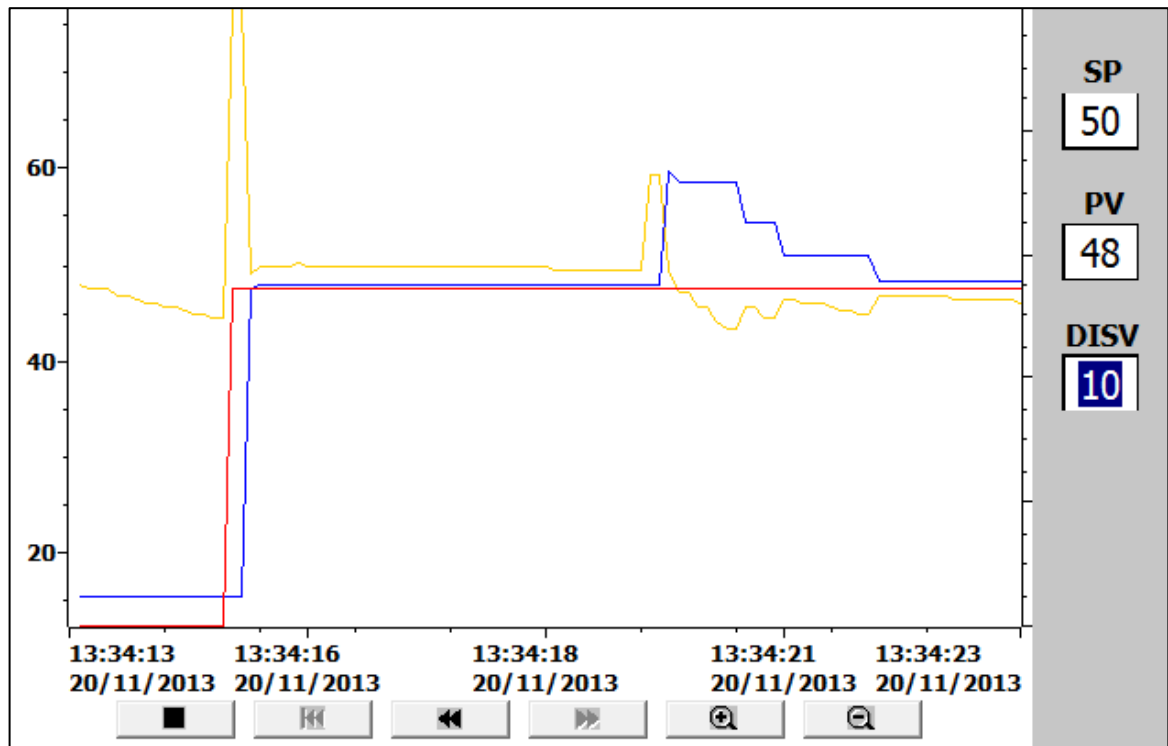


Figura 38: Respuesta del sistema real con perturbación del 10%.

Se puede concluir que el diseño del controlador es robusto ante perturbaciones externas y es capaz de llevar el sistema hasta el punto de consigna con un error y sobrepaso aceptables de acuerdo a las especificaciones de diseño establecidas.

Más detalles de las pruebas realizadas se pueden observar en los siguientes enlaces:

Prueba de perturbación de un control PID en PLC

<http://www.youtube.com/watch?v=ID-9I6iKdB8&feature=youtu.be>

Prueba de posicionamiento de un cilindro neumático

<http://www.youtube.com/watch?v=tY-gr8n9Yv8&feature=youtu.be>

4 CONCLUSIONES

A pesar de que el sistema montado es no lineal e inestable en lazo abierto, se logró implementar un controlador PID en un PLC que lograra mejorar la respuesta dinámica ante cambios del punto de consigna y entradas perturbadoras cumpliendo con los criterios de diseño.

Al realizar el diseño de un controlador PID se debe tener pleno conocimiento del comportamiento del sistema tanto el lazo abierto como en lazo cerrado.

Al momento de realizar la identificación del modelo matemático de un sistema, se debe tener en cuenta el periodo de muestreo, ya que de este depende la precisión del modelo y la estabilidad del sistema.

Es importante realizar adquisiciones de señales bien acondicionadas que no presenten tanto ruido y además tener presente si se deben realizar escalamientos de los valores de conversión.

La acción integral es indispensable para el mejoramiento de la respuesta de los sistemas en estado estable, mientras que la acción derivativa mejora la respuesta transitoria.

Las herramientas computacionales MATLAB y FLUIDSIM son de gran utilidad y unas importantes herramientas a la hora de diseñar controladores y simular el comportamiento de sistemas reales.

Sería de gran interés implementar en trabajos futuros, técnicas de control avanzadas como el control predictivo que permiten anticiparse a la respuesta del sistema y de esa manera generar una señal correctiva antes de que se produzcan errores mayores, además que funciona muy bien en sistemas no lineales.

La implementación de la interfaz Hombre Maquina al sistema permite una fácil visualización de las respuestas obtenidas tanto a modificaciones del SP como a perturbaciones y permite observar gráficamente la acción de control implementada.

A través del desarrollo del trabajo de grado se realiza un aporte importante al desarrollo de futuras prácticas que permita a los Aprendices SENA un mejor aprovechamiento de los equipos y elementos neumáticos en prácticas de control de procesos.

BIBLIOGRAFÍA

- [1]. Juan Burbano, Control de posición y presión para manipulador neumático a través de pc. Facultad de Ingeniería Mecánica, Universidad Tecnológica de Pereira.
- [2]. -Jianjun Tian, A System of Position Control for Cylinder Based on Fuzzy Control, College Of Electromechanical, North China University of Technology, BeiJing (100144). Sixth International Conference on Natural Computation (ICNC 2010).
- [3]. Neumática en Bucle Cerrado. Festo Didactic. 1995.
- [4]. Válvulas proporcionales neumáticas. FESTO AG & Co. Info 159. 2001.
- [5]. System Dynamics, Katsuhiko Ogata, Prentice Hall, Second Edition.
- [6]. Control PID Avanzado, Karl J. Åström, Tore Hägglund, Pearson Educación, S.A. 2009. ISBN: 978-84-8322-511-0.
- [7]. Oscar Reinoso. Identificación y control de un cilindro neumático con válvulas proporcionales. Universidad Miguel Hernández Dpto. Ingeniería 03202 Elche-Alicante.
- [8]. Revista Iberoamericana de Automática e Informática, Modelado, Identificación y Control de Actuadores Lineales electro – Neumáticos. Aplicación en plataforma de dos grados de libertad, Universidad Politécnica de Madrid. ISSN 1697-7912. Vol. 4, Núm. 4, Octubre 2007, pp. 58-69.
- [9]. Servopneumatic Precision Positioning. FESTO.2002.
- [10]. Controladores PID y Controladores Difusos, Revista de la Ingeniería Industrial, volumen 5, Nº 1, 2011, IISSSSNN 11994400—22116633.
- [11]. Manual SIMATIC, Software estándar para S7-300/400 PID Control (Regulación PID). SIEMENS C79000-G7078-C516-01.
- [12]. <http://www.festo-didactic.com/es-es/>
- [13]. Manual: "SIMATIC HMI WinCC flexible 2008".

ANEXOS

Anexo A. Documento: "Control Engineering with STEP 7"

Anexo B. Documento: "Regulación PID en siemens S7 300. Función FB41
CONT_C)

Anexo C. Documento: " Software estándar para S7-300/400 PID Control
(Regulación PID)"

Anexo D. Practica: " Control PID del nivel - Volúmen de agua"

Anexo E. Documento: "Neumática Proporcional"

Anexo F. Manual: "SIMATIC HMI Panel de operador TP 277"

Anexo G. Manual: "SIMATIC HMI WinCC flexible 2008"

Anexo H. Guia: "Configuración y depuración en pantalla Touch"

NOTA: El contenido de los anexos se encuentran en formato digital, incluido en el CD de Memorias.