	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	01
		Fecha	2019-01-25

MÓDULO DIDÁCTICO PARA EL CONTROL DE LA VARIABLE PRESIÓN

Juan Sebastián Durango Mora 13236048

Jorge Andrés Herrera Arias 14236151

José Lisandro Bedoya Escobar 13236020

Ingeniería Mecatrónica

Director(es) del trabajo de grado

Orlando Zapata Cortés

INSTITUTO TECNOLÓGICO METROPOLITANO

25 de enero del 2019

RESUMEN

El módulo didáctico para el control de la variable presión consiste en diseñar una planta portátil, usando elementos a escala que realicen las mismas funciones de los elementos de una planta grande. En este módulo didáctico se pueden aplicar los mismos algoritmos de control usados en las plantas industriales, algoritmos enseñados en diferentes materias de la carrera universitaria de Ingeniería Mecatrónica.

El módulo está diseñado para la realización de diversas prácticas enfocadas en el control, más específicamente el control de la presión en un tanque a escala. Dichas prácticas serán de utilidad a los docentes y los estudiantes para una mayor comprensión de lo aprendido en los cursos de sistemas de control.

El control se realiza en la placa de desarrollo Arduino Mega en comunicación serial con Matlab para la visualización de las variables y las gráficas en tiempo real, de esta manera observar con mayor comodidad el comportamiento del sistema.

RECONOCIMIENTOS

Se desea brindar agradecimientos a las personas que hicieron parte de la evolución de este proyecto, que nos brindaron su ayuda y conocimientos. Se le agradece a nuestro asesor del producto de laboratorio Orlando Zapata Cortes y al Instituto Tecnológico Metropolitano, por prestarnos sus servicios en los laboratorios de circuitos y de mecatrónica con buena disponibilidad de equipos, y así con estos llevar a cabo el desarrollo del módulo didáctico para el control de la variable presión.

ACRÓNIMOS

PWM - Modulación por ancho de pulso

XLSX - Hoja de cálculo

PVC - Policloruro de vinilo

CAD - Diseño asistido por computadora

P - Control proporcional

PI - Control proporcional integral

PID - Control proporcional integral derivativo

MOSFET - Transistor de efecto de campo metal óxido semiconductor

Kp - Constante proporcional

Ki - Constante integral

Kd - Constante derivativa

K - Ganancia estática

L - Retardo puro

τ - Constante de tiempo

BIT - Dígito binario

DXF - Drawing exchange format

TABLA DE CONTENIDO

1. INTRODUCCIÓN	7
1.1. Problema	8
1.2. Justificación	8
1.3. Objetivos	8
1.3.1. Objetivos generales	50
1.3.2. Objetivos específicos	50
1.4. Organización de la tesis	9
2. MARCO TEÓRICO	9
2.1. Presión de aire	10
2.2. Sistemas embebidos	10
2.3. Lenguaje de programación	10
2.3.1. MATLAB	10
2.3.1.1. GUIDE	11
2.4. Dispositivos neumáticos	11
2.4.1. Compresor de aire	11
2.4.2. Tanques de aire	12
2.4.3. Sensor de presión	12
2.4.4. Válvula antirretorno	13
2.4.5. Válvula solenoide	13
2.4.6. Filtro de aire	13
2.5. Fuente de alimentación	14
2.6. Circuito de control	15
2.7. Sistemas de control	15
2.8. Comunicación serial	16
3. METODOLOGÍA	17
3.1. Diseño CAD de la carcasa	17
3.2. Construcción física	17
3.2.1. Corte laser	17
3.2.2. Elaboración de los tanques	18
3.2.3. Desarrollo de circuito de control	18
3.2.3.1. Diseño	18

3.2.3.2. Construcción	19
3.3. Ensamble	20
3.4. Interfaz Gráfica	22
3.5. Comunicación serial MATLAB con Arduino	25
3.6. Implementación de sensor MPX5500	27
3.7. Control	28
3.7.1. Identificación del sistema	28
3.7.1.1. Adquisición de datos	29
3.7.1.2. Procesamiento de datos	30
3.7.1.3. Función de transferencia de la planta	33
3.7.2. Controladores	44
3.7.2.4. Control digital de la planta	46
4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	47
4.1 Discusión	49
5. CONCLUSIONES, RECOMENDACIONES Y TRABAJO FUTURO	50
5.1 Conclusiones	50
5.2 Recomendaciones	50
5.3 Trabajo futuro	50

1. INTRODUCCIÓN

El módulo didáctico para el control de la variable presión consiste en una serie de dispositivos neumáticos, electrónicos y electroneumáticos conectados entre sí, para cumplir el propósito de semejar la interacción de una planta de control de envergadura industrial con los alumnos. El módulo didáctico es versátil, ya que se pueden aplicar diversas técnicas de control para hacer una correcta adecuación de la variable presión.

Este dispositivo tiene la gran característica de ser modular, porque los estudiantes pueden modificar el hardware y el software a fines convenientes, ya que la información sensada por la placa de desarrollo puede ser llevada a cualquier software por medio de comunicación serial, y así usar el software con el cual se sienta más cómodo el educando. Matlab es el programa principal en el cual se realizó la comunicación serial y una interfaz gráfica amigable, de uso intuitivo y de fácil acceso, proporcionando al usuario una comodidad para ingresar variables y visualizar resultados en tiempo real.

1.1. Problema

Los temas de la asignatura de sistemas de control pueden llegar a ser complejos para un aprendizaje rápido, ya que se requiere una buena profundización en la materia para comprenderla de la mejor forma posible; por eso siempre es un desafío para los docentes darse a entender ante los alumnos sin crear confusiones. Debido a esto es fundamental que el Instituto Tecnológico Metropolitano cuente con un módulo didáctico para controlar la variable presión, y así facilitarle tanto a los docentes en su labor de la educación, como a los estudiantes en su proceso de aprendizaje con prácticas aplicadas en modelos tangibles.

1.2. Justificación

El módulo didáctico para controlar la variable presión está diseñado para facilitar el aprendizaje de los estudiantes en el Instituto Tecnológico Metropolitano, ya que debido a

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	01
		Fecha	2019-01-25

la complejidad de los sistemas de control es imperioso presentar a los alumnos una manera más aplicativa, para así comprender la teoría de control más cómodamente. Este módulo está construido con materiales de bajo costo, simulando la labor de una planta industrial de forma verosímil, para que los aprendices tengan la posibilidad de interactuar con un ambiente coherente a el industrial. También se realizó una interfaz virtual, en la que los educandos pueden ingresar de manera fácil todos los valores requeridos para el control de la planta, y del mismo modo visualizar la respuesta a estos estímulos.

1.3. Objetivos

1.3.1. Objetivos generales

- Desarrollar un módulo físicamente compacto, con una interfaz amigable y con todas las funciones posibles para facilitar el aprendizaje en el área de sistemas de control a los alumnos del Instituto Tecnológico Metropolitano.

1.3.2. Objetivos específicos

- Diseñar y materializar un módulo didáctico para facilitar la metodología de aprendizaje de la comunidad educativa del Instituto Tecnológico Metropolitano, para que con esta forma más interactiva los alumnos lleguen a comprender los conceptos aprendidos en los cursos de sistemas de control.
- Construir el modelo didáctico para el laboratorio de mecatrónica del Instituto Tecnológico Metropolitano empleando materiales de bajo costo, de tal modo que se presente un diseño de forma estética y ordenada, para facilitar la comprensión del dispositivo a los educandos.
- Programar una interfaz gráfica con las funciones necesarias para la operación del módulo didáctico, brindando al alumno la facilidad de controlar la planta en la forma que lo requiera y con la facilidad de interactuar con las variables en tiempo real.

1.4. Organización de la tesis

En el marco teórico se presentan todos los conceptos que fueron requeridos para la creación del módulo didáctico para el control de la variable presión, y así tener un mejor dimensionamiento del proyecto en todo el proceso de la creación.

En la metodología se desvelan todos los pasos que fueron requeridos para la materialización de módulo didáctico para el control de la variable presión, los cuales se presentan de la manera más específica, y así se pueda comprender todo el proceso del montaje físico que está conformado por el diseño y todos los trabajos manuales para la creación del prototipo. También se exponen todos los pasos para la creación del software, el cual consta de una interfaz gráfica, y la parte de los sistemas de control la cual se explica de la manera más idónea para la comprensión de todos los cálculos que se realizaron para el diseño del control.

En los resultados se exponen las respuestas obtenidas bajo los parámetros establecidos por Ziegler-Nichols. También se comparan los resultados obtenidos de los tres tipos de control y se define con cuál de ellos tuvo mejor comportamiento. Por último, se evalúan las ventajas y desventajas del prototipo comparándolo con módulos similares en una discusión breve.

En las conclusiones se presentan los resultados obtenidos y lo que se puede adquirir de ellos, también se presenta la recomendación para el mejor uso del producto y la posibilidad de mejorar sus falencias en un trabajo futuro.

2. MARCO TEÓRICO

2.1. Presión de aire

La presión es el peso del aire por unidad de superficie, que generalmente se mide en libras por pulgada cuadrada(PSI), también en pascales(Pa) y en bar de presión(bar). (Meteoblue. Presión del aire, 2008)

2.2. Sistemas embebidos

Los sistemas embebidos son dispositivos electrónicos los cuales se configuran de la manera adecuada para cumplir funciones específicas, puede ser una sola función o pocas funciones, dependiendo de la composición del dispositivo. Estos sistemas se utilizan para computar información en tiempo real. (Wikipedia. Sistemas embebidos, 2017)

2.3. Lenguaje de programación (Matlab)

Es un lenguaje formal que tiene como función crear diversos datos en un computador mediante instrucciones específicas. El lenguaje de programación se usa para crear programas que pongan en marcha algoritmos los cuales controlan componentes físicos o lógicos de una computadora. (Wikipedia. Lenguaje de programación, 2015)

2.3.1. Matlab

Es un entorno de desarrollo integrado el cual se manipula con un lenguaje de programación propio del software. Las funciones básicas de Matlab son: manipulación de matrices, representación de datos, implementación de algoritmos y la creación de interfaces gráficas (GUIDE). (Wikipedia. MATLAB, 2015)

2.3.1.1. GUIDE

La interfaz gráfica de usuario es un programa informático que mediante imágenes y objetos gráficos representan los valores de un sistema de manera más cómoda e interactiva. Permite un control sencillo mediante el uso de los periféricos del computador, sin la necesidad de aprender un lenguaje o comandos necesarios para ejecutar la aplicación. (Mathworks. GUI de MATLAB, 2019)

2.4. Dispositivos neumáticos

Son los sistemas que emplean gas comprimido u otro gas para transmitir señal y potencia, esta energía es la que se utiliza para hacer funcionar mecanismos. Al gas que se utiliza para el sistema neumático se le aplica una fuerza de compresión, la cual devuelve cuando se le permite el paso al fluido gaseoso, según la ley de los gases ideales. (Wikipedia. Neumática, 2017)

2.4.1. Compresor de aire

Un compresor de aire es un mecanismo diseñado para tomar el aire a presión atmosférica, u otros gases y vapores, aumentando su presión y desplazando el fluido, y así almacenarlo y comprimirlo dentro de un tanque. (Wikipedia. Compresor (máquina), 2016)



Figura 1. Compresor de aire utilizado para el módulo.

2.4.2. Tanques de aire

Un tanque es un recipiente de diversos materiales, comúnmente de forma cilíndrica, son usados para guardar y preservar líquidos o gases. Los tanques de aire comprimido también llamados tanque pulmón tiene la misión de acumular aire en su interior para regular el funcionamiento del compresor y estabilizar la red de aire comprimido. (Wikipedia. Tanque de almacenamiento, 2015)



Figura 2. Tanques de aire utilizados para el módulo (Elaboración propia)

2.4.3. Sensor de presión

Es un dispositivo compuesto por un elemento capaz de medir la presión en una región determinada, y de transformar esta magnitud física en una señal digital para que pueda ser manipulada en un dispositivo programable. (HBM. ¿Qué es un sensor de presión?, 2019) (Wikipedia. Sensor de presión, 2018)



Figura 3. Sensor de presión utilizado para el módulo.

2.4.4. Válvula antirretorno

También llamada válvula de retención, tienen por objetivo cerrar el paso en un sentido de un fluido en circulación y dejar paso libre en el contrario, ya sea un fluido gaseoso o líquido.

(Wikipedia. Válvula antirretorno, 2018)



Figura 4. Válvula antirretorno utilizada para el módulo.

2.4.5. Válvula solenoide

Está diseñada para controlar el paso de un fluido por tuberías en sistemas neumáticos. Esta válvula se acciona mediante una bobina solenoide que cuando tiene corriente levanta el émbolo en su interior. (Wikipedia. Electroválvula, 2014)



Figura 5. Válvula solenoide utilizada para el módulo.

2.4.6. Filtro de aire

Dispositivo que elimina partículas que puedan afectar el funcionamiento de un determinado sistema, tales como el polvo, el polen y las bacterias en el aire. Los filtros de

aire tienen utilidad en lugares donde es relevante la calidad del aire, por ejemplo, en aplicaciones con aire comprimido, en la cual no podemos permitir ninguna partícula que pueda afectar la integridad de los tanques. (Wikipedia. Filtro de aire, 2018)



Figura 6. Filtro de aire utilizado para el módulo.

2.5. Fuente de alimentación

Dispositivo diseñado para convertir la corriente alterna de la red de suministro en una o varias fuentes de corriente directa, que alimentan los distintos circuitos de un artilugio para su correcto funcionamiento. (Wikipedia. Fuente de alimentación, 2018)



Figura 7. Fuente de alimentación utilizada para el módulo.

2.6. Circuito de control

Es el dispositivo encargado de controlar las entradas y las salidas, separando las corrientes de alta tensión del microprocesador, y así esperar un mejor funcionamiento de todo un dispositivo en general y disminuir el riesgo de un corto circuito. (recursostic educación. Circuito de control, 2009)

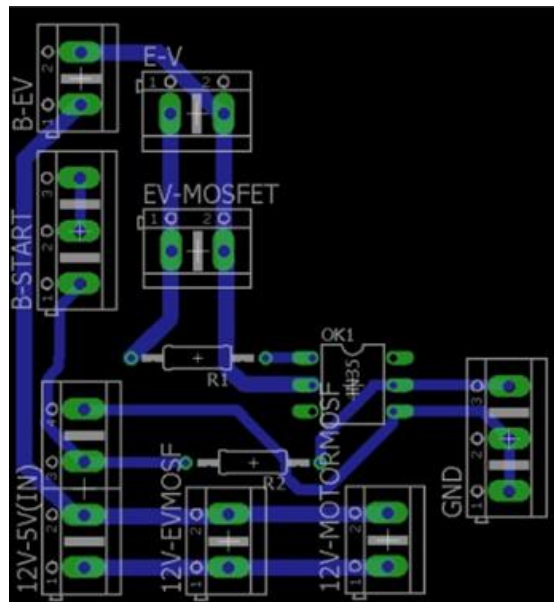


Figura 8. Esquema del circuito de control utilizado para el módulo (Elaboración propia).

2.7. Sistemas de control

Son un conjunto de dispositivos encargados de ordenar y dirigir el comportamiento de otro sistema, para que de esta manera más ordenada se eviten los fallos y se obtenga los mejores resultados. Existen dos tipos de sistemas de control, uno es el sistema en lazo abierto, el cual la salida depende de la entrada, mientras que el sistema en lazo cerrado la salida depende de las correcciones realizadas en la realimentación. (Wikipedia. Sistema de control, 2017)

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	01
		Fecha	2019-01-25

2.8. Comunicación serial

Es el proceso de envío de datos de forma secuencial, es decir un bit a la vez sobre un canal de comunicación. Una de las ventajas de la comunicación en serie, es que se puede llevar a cabo toda la transferencia de información por medio de una sola línea de transmisión. y hay que tener en cuenta que para mejorar el rendimiento es imprescindible manejar una frecuencia más alta. (Wikipedia. Comunicación serie, 2010)

3. METODOLOGÍA

3.1. Diseño CAD de la carcasa

La carcasa o cubierta del módulo es una unión de partes de acrílico, las cuales están diseñadas con la ayuda del software solidworks, en el que se puede ver el diseño ensamblado y también se puede extraer un archivo (.dxf) el cual es leído por una cortadora láser, y posteriormente cortado por la misma.

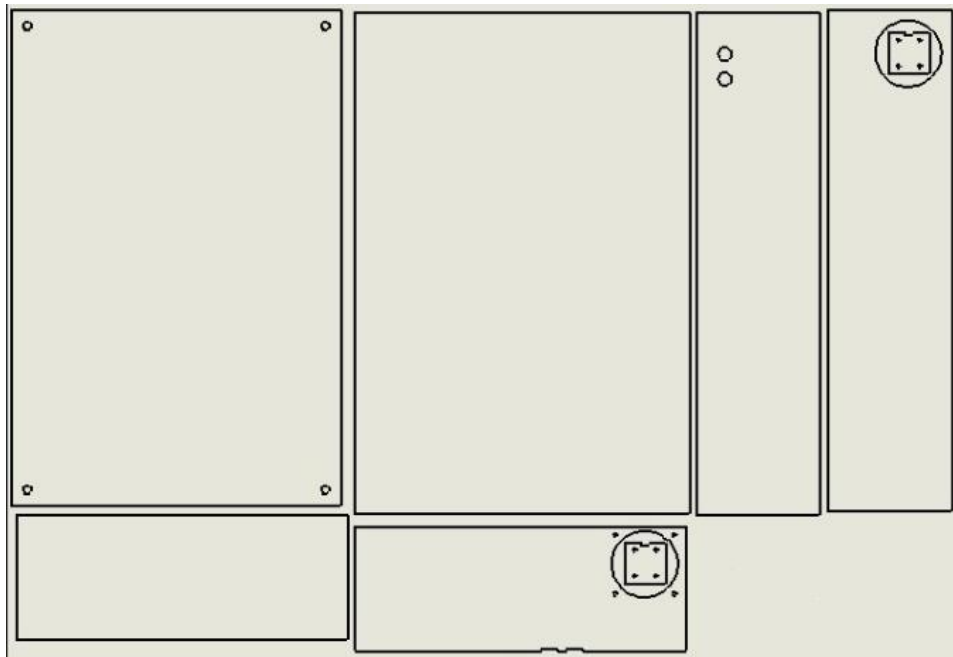


Figura 9. Planos de la carcasa del módulo (Elaboración propia).

3.2. Construcción física

3.2.1. Corte laser

Con los planos en un formato (.dxf) respectivo se realiza el corte láser en el taller de máquinas del Instituto Tecnológico Metropolitano, el material utilizado es un acrílico de 4mm de espesor.

3.2.2. Elaboración de los tanques

Los tanques de este módulo didáctico están elaborados con tubos de PVC, los cuales fueron cortados y refrentados en un torno industrial, y así mediante esta serie de ajustes se garantizan las medidas adecuadas y el correcto funcionamiento de los tanques. En las tapas de los tanques se realizaron perforaciones concéntricas de $\frac{1}{4}$ de pulgada, para realizar la conexión de los racores que se unen a las mangueras que transportan el aire comprimido.



Figura 10. intervención a tubos de PVC en torno (Elaboración propia).

3.2.3. Desarrollo de circuito de control

3.2.3.1. Diseño

Este circuito se diseñó en el software Eagle, el cual nos permite realizar las conexiones más pertinentes para el montaje físico. Posteriormente se imprime en papel fotográfico, esta impresión es colocada sobre una baquelita de cobre, que con la ayuda del calor es plasma sobre la baquelita, seguidamente se introduce en ácido férrico por 10 minutos diluyendo el material no cubierto por la impresión.

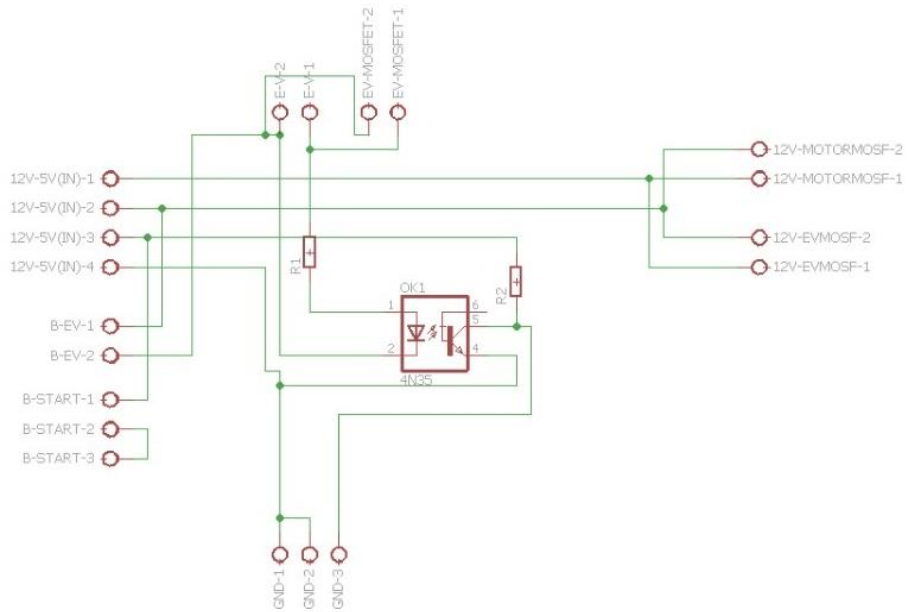


Figura 11. Diseño del circuito de control del módulo (Elaboración propia).

3.2.3.2. Construcción

Cuando la baquelita ya ha cumplido su proceso de dilución del material y se han obtenido las pistas por donde fluirá la corriente eléctrica, se prosigue a realizar perforaciones en los puntos exactos donde quedarán los elementos electrónicos ya definidos en el diseño. Posteriormente se colocan los elementos en sus respectivos orificios, para así fijarlos en la placa mediante estaño como se observa en la *figura 12*.

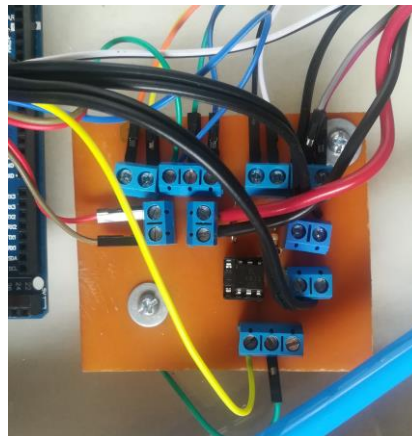


Figura 12. Circuito de control utilizado para el módulo (Elaboración propia).

3.3. Ensamble

- Módulo didáctico para el control de presión:

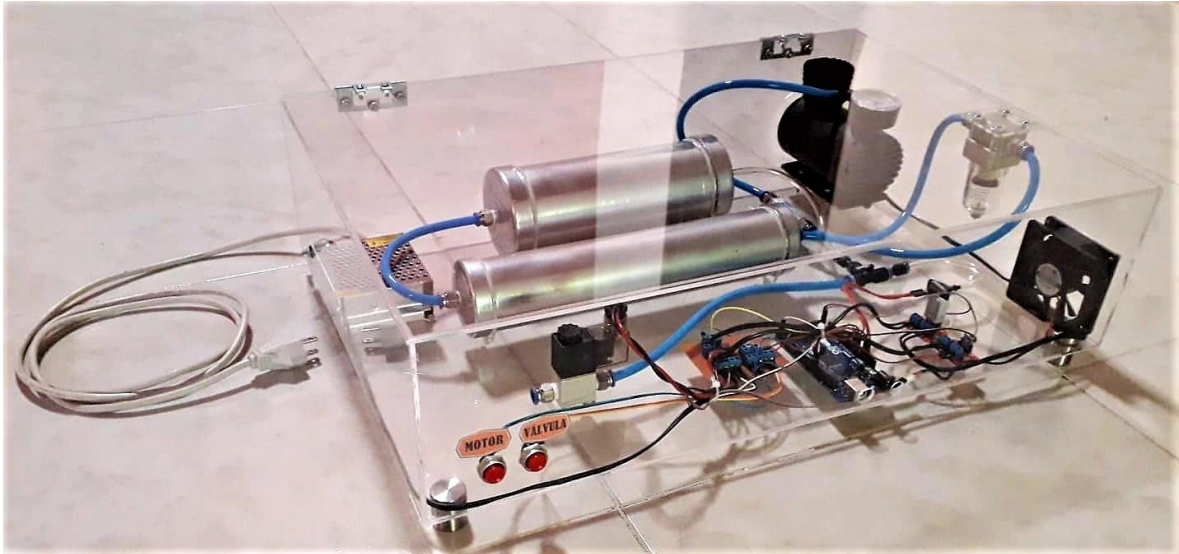


Figura 13. Modelo físico del módulo didáctico para el control de la variable presión (Elaboración propia).

- Esquema electroneumático del módulo:

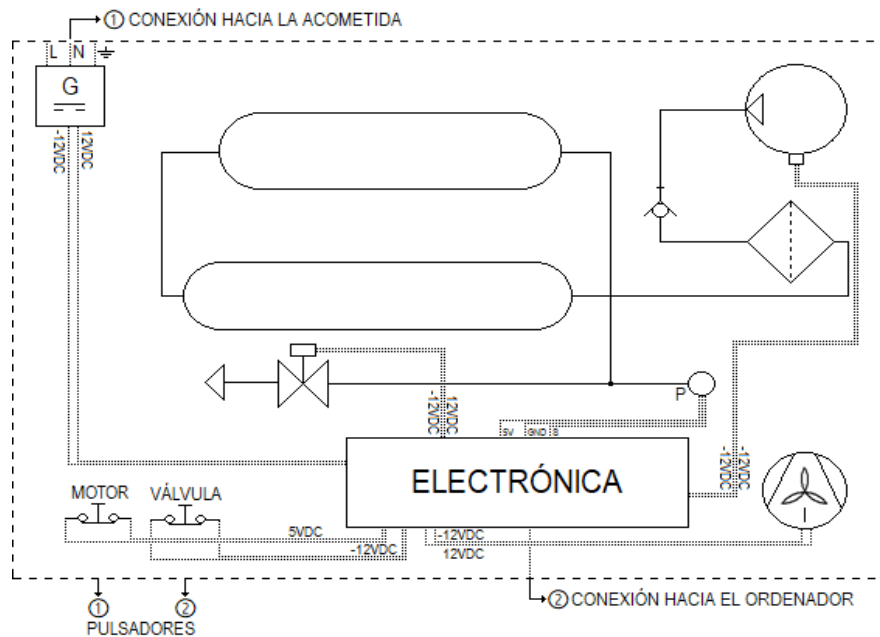


Figura 14. Esquema del módulo didáctico para el control de la variable presión (Elaboración propia).

- Simbología

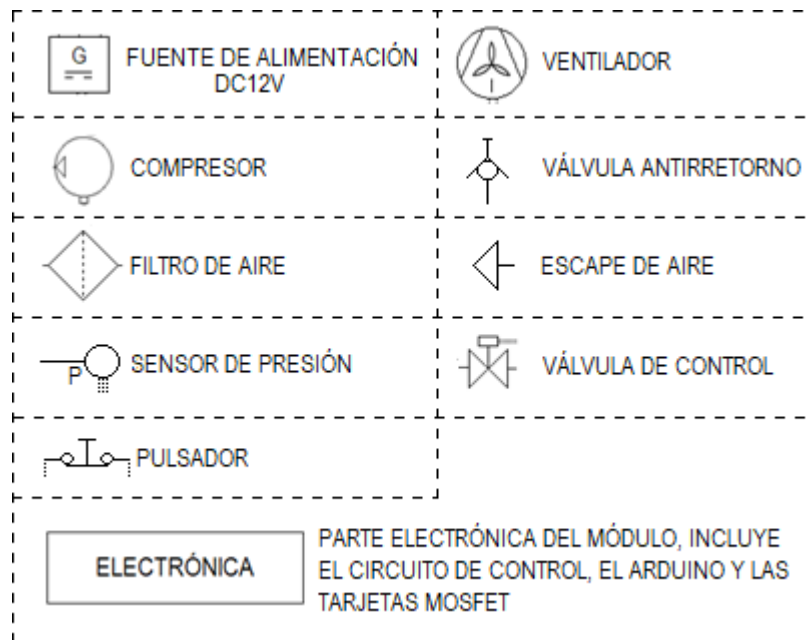


Figura 15. Simbología del esquema (Elaboración propia).

- Conexiones externas

① Conexión de la fuente DC12V del módulo didáctico hacia la conexión AC110V de la red de suministro.

② Conexión del Arduino Mega del módulo didáctico hacia el ordenador por medio del conector USB estándar plug macho tipo 'A' y plug tipo 'B'.

- Pulsadores

① Pulsador con enclavamiento programado para el encendido y apagado del motor del compresor de manera manual.

② Pulsador para activar y desactivar la electroválvula de manera manual, esto con el fin de perturbar el sistema o de vaciar los tanques de manera rápida.



Figura 16. Pulsadores del módulo (Elaboración propia).

3.4. Interfaz Gráfica

La interfaz gráfica especial para el módulo se realizó en el entorno de programación visual del MATLAB llamado GUIDE, previamente se creó una aplicación, y un archivo ejecutable.

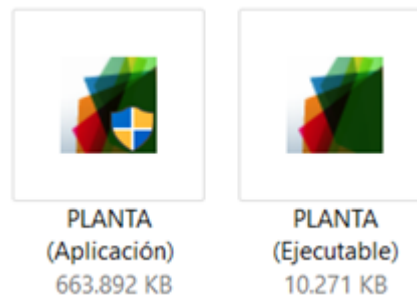


Figura 17. Archivos de interfaz gráfica (Elaboración propia).

Ejecutable: Este archivo puede interpretarse y cargarse como aplicación si y sólo si el ordenador cuenta con MATLAB.

Aplicación: Esta aplicación puede instalarse y cargarse sin necesidad de contar con MATLAB en el ordenador.

Para la interfaz gráfica se diseñaron y programaron las siguientes pantallas:

Pantalla de inicio:



Figura 18. Pantalla de inicio de la interfaz gráfica (Elaboración propia).

En esta pantalla (*figura 18*) el usuario podrá encontrar tres botones que comunican la pantalla inicial con los demás procesos de la planta.

Pantalla de adquisición de datos:

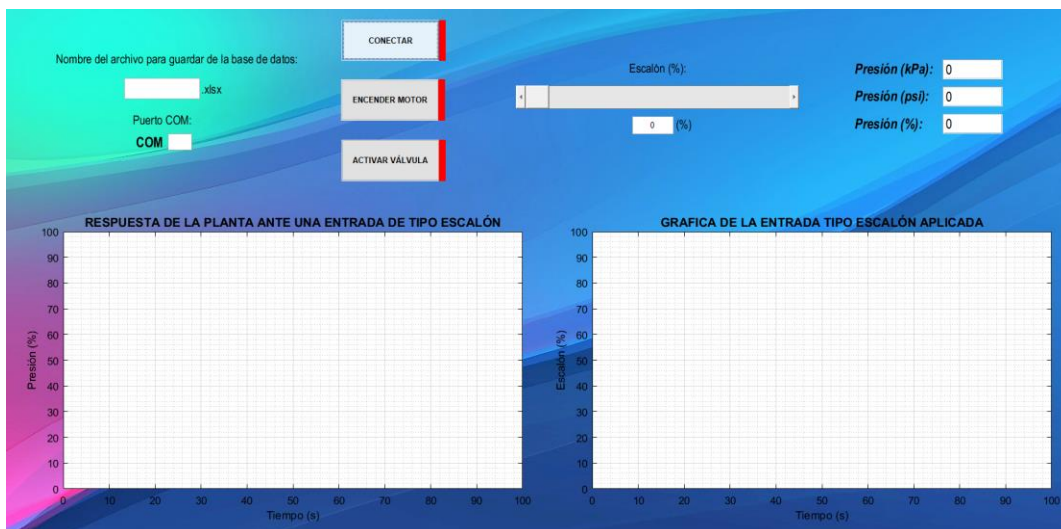


Figura 19. Pantalla de adquisición de datos de la interfaz gráfica (Elaboración propia).

En esta pantalla (*figura 19*) el usuario podrá conectar la interfaz gráfica con la planta, posteriormente excitarla por medio de estímulos de tipo escalón unitario y visualizar el comportamiento en tiempo real. El programa recopila una base de datos en un archivo .xlsx y a partir de este realizar la identificación del sistema.

Pantalla de procesamiento de datos:

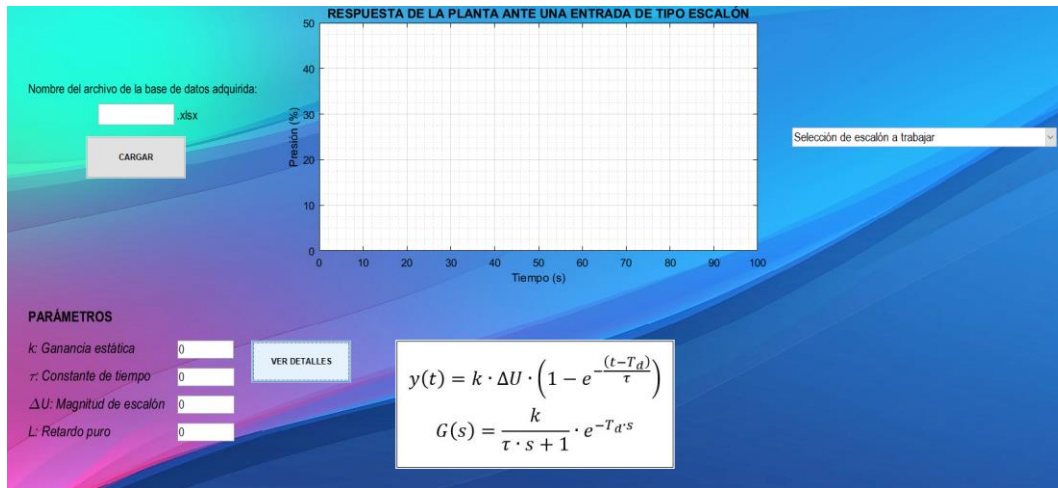


Figura 20. Pantalla de procesamiento de datos de la interfaz gráfica (Elaboración propia).

En esta pantalla (*figura 20*) el usuario podrá realizar el procesamiento de los datos previamente adquiridos y con la respuesta tipo escalón unitario encontrar una función de transferencia que identifique a la planta.

Pantalla de controladores PID:

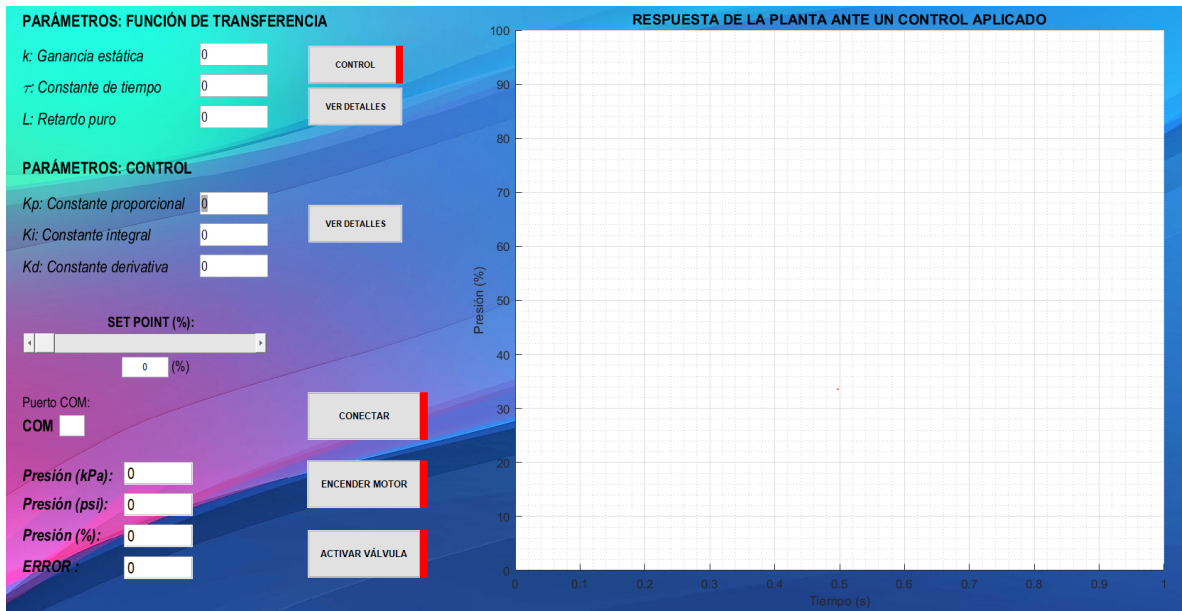


Figura 21. Pantalla de controladores PID de la interfaz gráfica (Elaboración propia).

En esta pantalla (figura 21) el usuario podrá encontrar el mejor controlador que se adapte a la planta, esto a partir de la función de transferencia previamente adquirida. El programa permite ingresar las constantes de controlador P, PI o PID y conectar la interfaz con el módulo para visualizar el comportamiento en tiempo real de la planta.

3.5. Comunicación serial MATLAB con Arduino

En Arduino:

El Arduino del módulo didáctico se encarga de enviar tres datos a MATLAB y de recibir a su vez seis datos.

Dicho dispositivo envía hacia MATLAB por comunicación serial el dato que proporciona el sensor MPX5500 con respecto al tiempo, envía el estado del pulsador del motor y el error del control. Dicha tarea la realiza con las siguientes funciones:

```
Serial.print(VSENSOR);
Serial.print(', ');
Serial.print(START);
Serial.print(', ');
Serial.println(Er);
```

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	01
		Fecha	2019-01-25

Arduino recibe desde MATLAB por comunicación serial los siguientes datos proporcionados directamente desde la interfaz gráfica:

1. El estado del botón para encendido y apagado del motor
2. El estado del botón para activar y desactivar la electroválvula
3. El set point
4. La constante proporcional (Kp)
5. La constante integral (Ki)
6. La constante derivativa (Kd)
7. El escalón

Todos estos datos se reciben en Arduino con esta función:

```
DATASTR = Serial.readStringUntil('\n');
```

Después, Arduino los recibe en forma de una cadena de caracteres y posteriormente se encarga de separar cada uno y procesarlos para el correcto uso del módulo.

En MATLAB:

Luego de crear la comunicación y abrir el puerto en MATLAB, este programa se encarga recibir de Arduino los datos en forma de una cadena de caracteres con la siguiente función:

```
a = fscanf(s);
```

Luego, MATLAB se encarga de separar la cadena en los tres datos recibidos y así realizar el correcto uso de cada uno.

MATLAB envía los datos a Arduino desde la interfaz gráfica programada según las opciones y el manejo que el usuario adjudique, dichos datos son enviados mediante la siguiente función:

```
fwrite(s, strcat('0,0,0,0,0,0, ', num2str(V)), 'uint8');
```

Finalmente, de esta manera se realizó la comunicación programada entre ambos sistemas a una velocidad de lectura de dos datos por segundo, esta velocidad se denomina como el tiempo de muestreo.

3.6. Implementación de sensor MPX5500

El sensor de presión MPX5500 es un sensor diseñado especialmente para aplicaciones con microcontroladores o microprocesadores (NXP Semiconductor, Empresa 2009).

Conexión del sensor en el módulo:

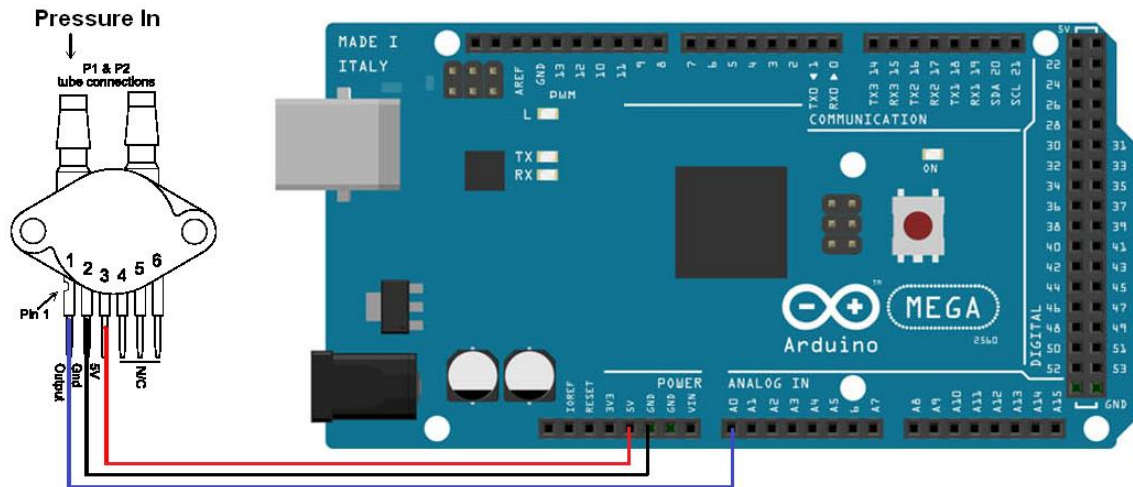


Figura 22. Conexión del sensor MPX5500 con Arduino Mega (Elaboración propia).

La función de transferencia del MPX5500 es:

$$V_{out} = V_s * (0.0018 * P + 0.04) \pm Error$$

La función de transferencia del sensor fue programada en MATLAB para poder hacer una lectura de la presión en kPa, en psi y en porcentaje.

Traducida al lenguaje de programación:

$$PkPa = \frac{(PRESION - 35) * 500.0}{(963 - 35)};$$

↑ Dato leído por el Arduino
 ↑ Offset
 ↑ Presión máxima
 ↑ Dato
 ↑ Offset

Dato del Arduino: Este dato se lee en el PIN análogo A0 del Arduino Mega e inmediatamente se envía a MATLAB por comunicación serial y luego allí se procesa.

Offset: Este es el valor de offset en presión cero que marca el sensor MPX5500 por defecto.

Presión máxima: El sensor MPX5500 tiene un rango de presión diferencial de 0 a 500 kPa.

Dato: El sensor MPX5500 tiene un voltaje de salida de 0.2 a 4.7V, de esta manera hallamos el dato: $4.7/5 \cdot 1024 \approx 963$.

Luego de leer la presión en kPa procedemos a hacer la conversión a psi, y posteriormente mostramos ambas presiones al usuario mientras que éste está haciendo labores de adquisición de datos y control de la planta en tiempo real.

3.7. Control

Para el control de la planta se implementó principalmente un procedimiento muy conocido llamado el método de la curva de reacción por Ziegler-Nichols.

(P. M. Meshram & Rohit G. Kanojia, 2012, IEEE) Ziegler-Nichols derivaron los siguientes parámetros de control basados en la respuesta escalón unitario de la planta como se muestra en este modelo.

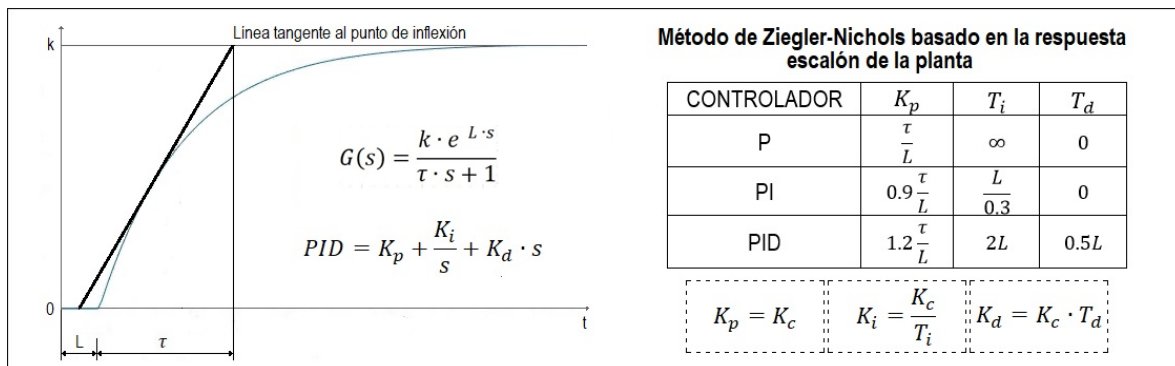


Figura 23. Modelo de la curva de reacción por Ziegler-Nichols (Elaboración propia).

De esta manera, al recopilar los datos de la planta se logró hacer la identificación de la misma y posteriormente un control basado en este método que funciona principalmente para los sistemas que en lazo abierto su comportamiento es estable.

3.7.1. Identificación del sistema

Con ayuda de la interfaz gráfica, la comunicación con Arduino y el sistema físico del módulo completo se identificó el sistema de la siguiente manera:

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	01
		Fecha	2019-01-25

La planta fue excitada a cierto número de escalones y posteriormente estos escalones fueron procesados y analizados, después y de acuerdo con el método de la curva de reacción se encontraron diversas funciones de transferencia que describen al sistema.

3.7.1.1. Adquisición de datos

La adquisición de datos se enfocó en lo siguiente:

Recopilar una base de datos en la ventana de adquisición de datos de la interfaz gráfica programada para la planta, donde:

1. Se aplicaron 5 escalones a la planta, cada uno con un aumento de magnitud del 20% (Cada escalón equivale a un aumento porcentual en la velocidad PWM aplicada al actuador).
2. Se recopilaron los datos durante 1071 segundos.
3. La presión subió hasta un 83,5256512% de la presión máxima soportada por la planta.
4. En total se recopilaron 2142 datos para la identificación de la planta.

Gráficamente el resultado fue el siguiente:

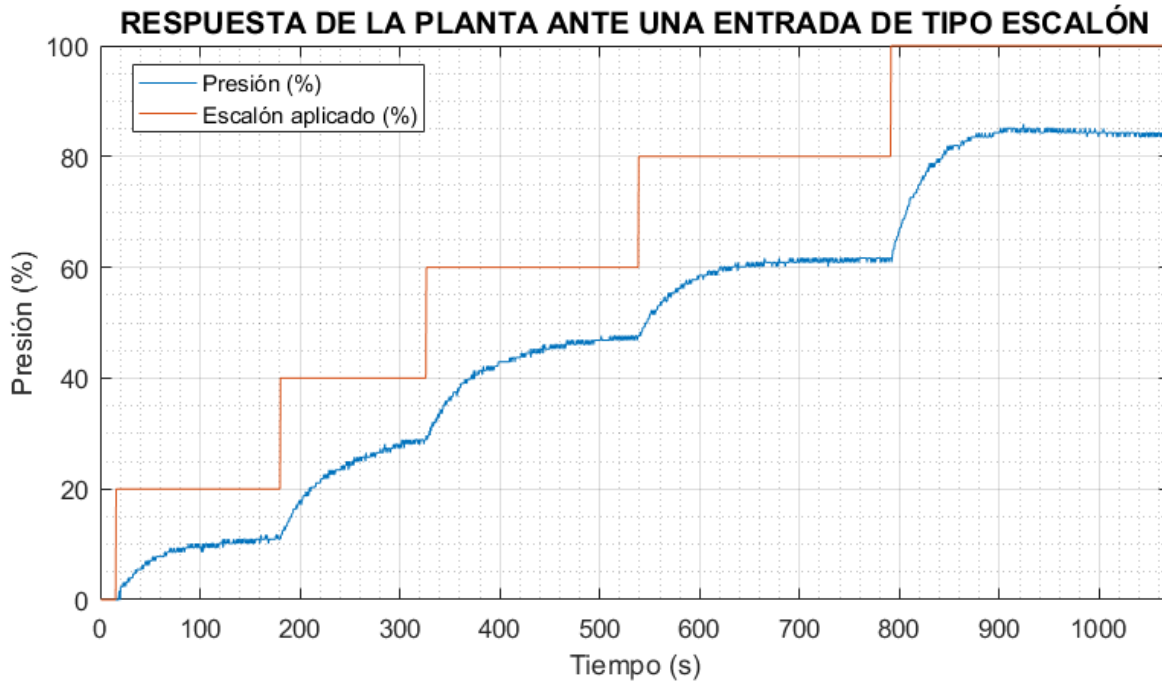


Figura 24. Respuesta de la planta ante el escalón aplicado (Elaboración propia).

Cada uno de estos escalones fue analizado de manera independiente por el software de procesamiento de datos disponible en la interfaz gráfica, esto con el fin de analizar diversos comportamientos y elegir un modelo que mejor identifique al sistema.

3.7.1.2. Procesamiento de datos

El procesamiento de los datos adquiridos, se basó en analizar por separado cada uno de los escalones aplicados y elegir en cuales, la planta llegó a un mejor nivel de saturación para poder hacer un mejor análisis e identificación.

Estos fueron los escalones elegidos para realizar el análisis:

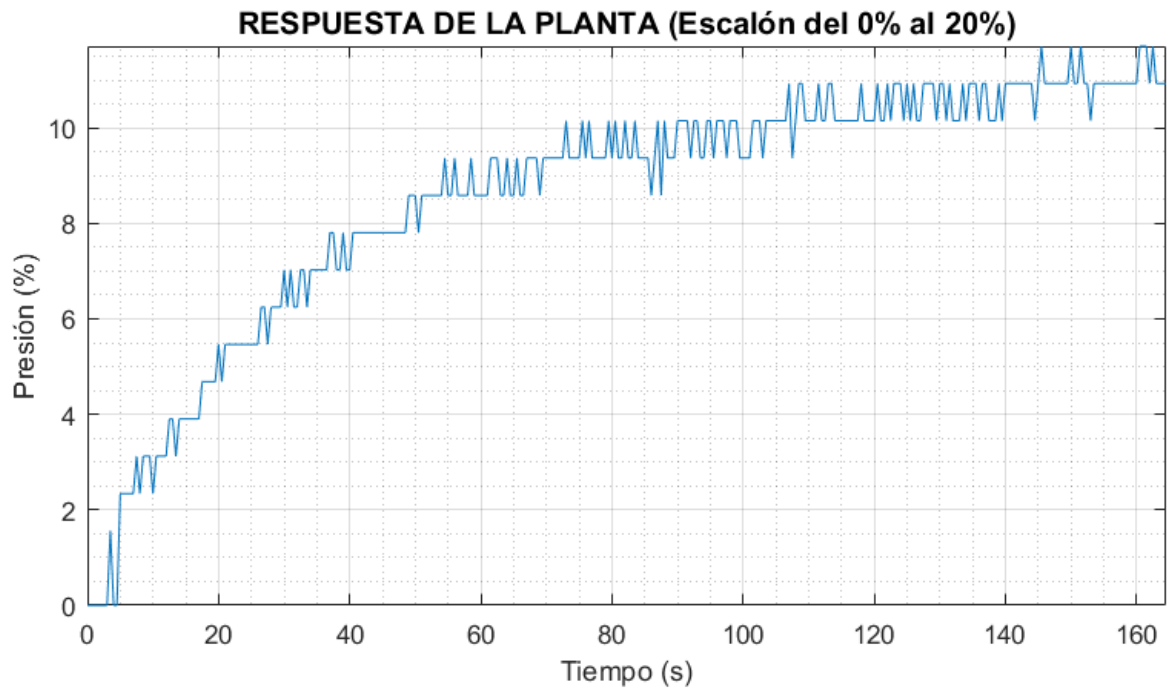


Figura 25. Respuesta de la planta ante el escalón de 0% al 20% (Elaboración propia).

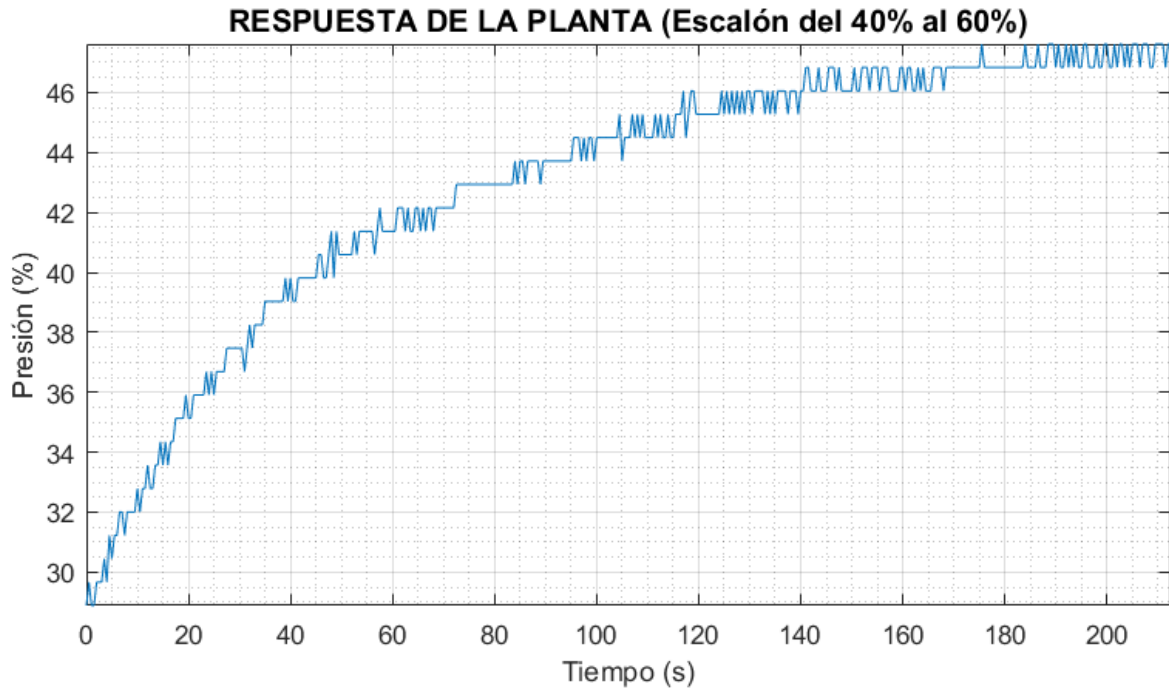


Figura 26. Respuesta de la planta ante el escalón de 40% al 60% (Elaboración propia).

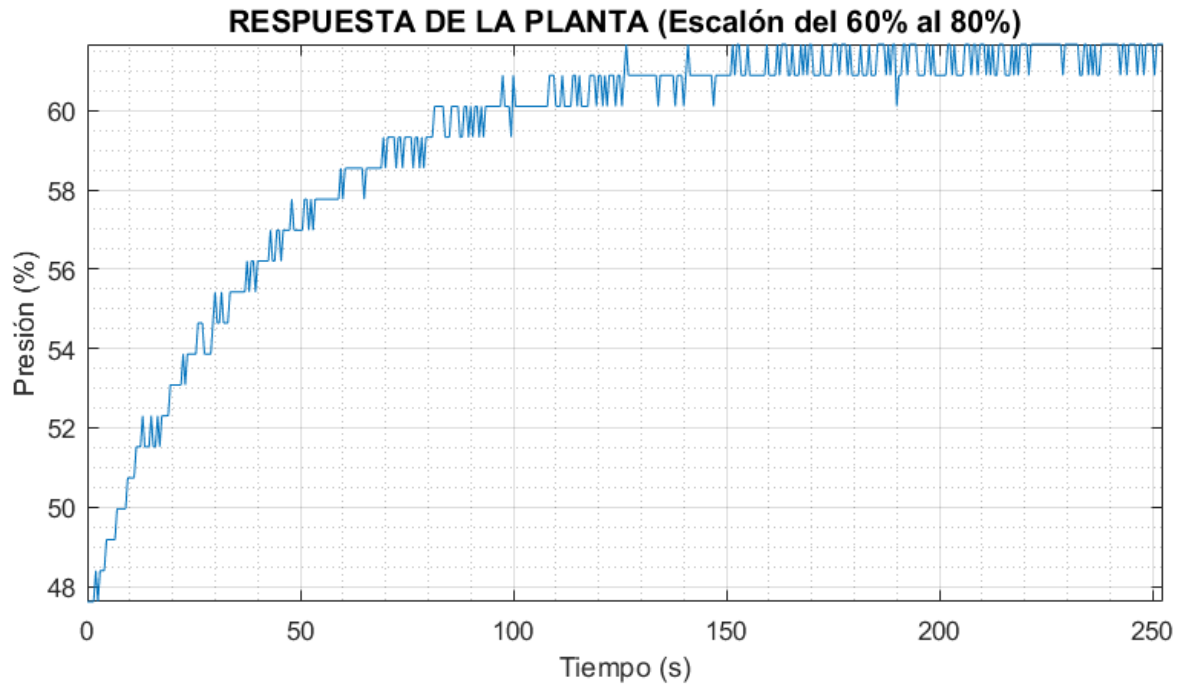


Figura 27. Respuesta de la planta ante el escalón de 60% al 80% (Elaboración propia).

Se puede observar que en cada uno de los escalones el sistema no tuvo oscilaciones amortiguadas por lo que el sistema se comporta como uno de primer orden más retardo, esto debido a que, al momento de aplicar el escalón, el sistema tarda un instante en reaccionar.

3.7.1.3. Función de transferencia de la planta

El módulo didáctico para control de presión se comporta como un sistema de primer orden más retardo. De acuerdo con esto, la función de transferencia en dominio del tiempo y de la frecuencia compleja para dichos sistemas es la siguiente:

$$y(t) = k \cdot \Delta U \cdot \left(1 - e^{-\frac{(t-T_d)}{\tau}} \right)$$

$$G(s) = \frac{k}{\tau \cdot s + 1} \cdot e^{-T_d \cdot s}$$

Figura 28. Función de transferencia para un sistema de primer orden más retardo (Elaboración propia).

Donde:

- k - Ganancia Estática.
- ΔU - El cambio en el escalón o lo que podría traducirse como la magnitud del escalón.
- τ - Constante de tiempo.
- L - Retardo puro o tiempo muerto.

Para encontrar el mejor modelo que identifique la planta se calculó la función de transferencia para cada uno de los escalones.

Gracias al análisis de la respuesta temporal del sistema respecto a la entrada tipo escalón, podemos darnos una idea del tiempo de establecimiento del sistema, es decir cuánto se tarda el sistema en alcanzar su estado estacionario (Análisis de la respuesta temporal de un sistema, Wikipedia. 2018).

En la interfaz gráfica se realizó un apoyo metodológico que nos ayudó y ayudará a los estudiantes a analizar cada uno de los parámetros para llegar a la función de transferencia.

Dicho apoyo es el siguiente:

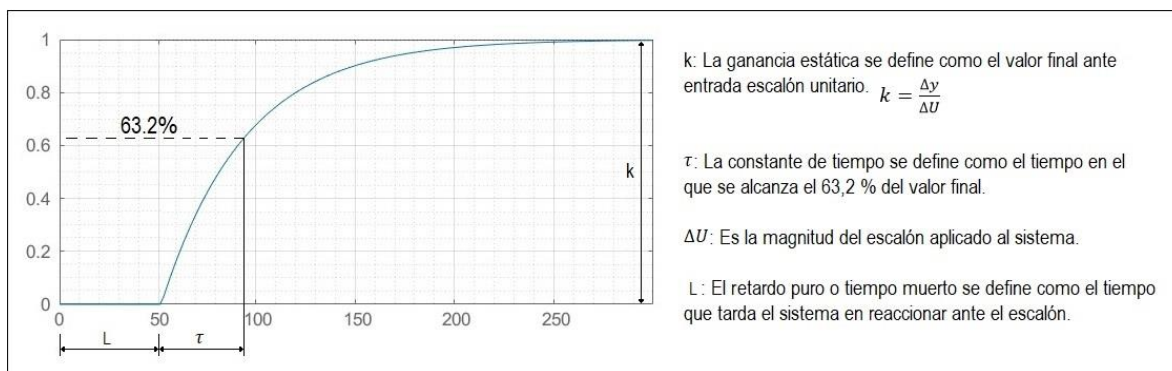


Figura 29. Modelo de la curva de reacción por Ziegler-Nichols, función de transferencia (Elaboración propia).

NOTA: Los análisis se basaron en la gráfica y en la tabla de los datos de cada uno de los escalones, dichas herramientas están disponibles en la pantalla de procesamiento de datos de la interfaz gráfica.

Para el escalón de 0% al 20%:

- Magnitud de escalón:

$$\Delta U = 20$$

- Ganancia estática:

	Tiempo (s)	Presión (%)	Escalón (%)		Tiempo (s)	Presión (%)	Escalón (%)	
1	0	0	0	^	319	159	10.9286	
2	0.5000	0	20		320	159.5000	10.9286	20
3	1	0	20		321	160	10.9286	20
4	1.5000	0	20		322	160.5000	11.7092	20
5	2	0	20		323	161	11.7092	20
6	2.5000	0	20		324	161.5000	11.7092	20
7	3	0	20		325	162	10.9286	20
8	3.5000	1.5612	20		326	162.5000	11.7092	20
9	4	0	20		327	163	10.9286	20
10	4.5000	0	20		328	163.5000	10.9286	20
11	5	2.3418	20		329	164	10.9286	20
12	5.5000	2.3418	20		330	164.5000	10.9286	20

Figura 30. Porcentaje mínimo y máximo de presión en el escalón del 0% al 20% (Elaboración propia).

$$k = \frac{\Delta y}{\Delta U} = \frac{(10.9286 - 0)}{20} = 0.54643$$

- Retardo puro:

	Tiempo (s)	Presión (%)	Escalón (%)	
1	0	0	0	^
2	0.5000	0	20	
3	1	0	20	
4	1.5000	0	20	
5	2	0	20	
6	2.5000	0	20	
7	3	0	20	
8	3.5000	1.5612	20	
9	4	0	20	
10	4.5000	0	20	
11	5	2.3418	20	
12	5.5000	2.3418	20	

Figura 31. Tiempo muerto en el escalón del 0% al 20% (Elaboración propia).

$L = 3s \Rightarrow$ Tiempo que tarda el sistema en reaccionar ante el escalón

- Constante de tiempo:

Para la hallar la constante de tiempo se utilizó la ecuación de interpolación:

$$y = y_1 + \left[\frac{(x - x_1)}{(x_2 - x_1)} * (y_2 - y_1) \right] \Rightarrow \text{Ecuación de interpolación}$$

siendo:

$y \Rightarrow$ Valor a hallar $x \Rightarrow$ 63,2% del valor final

$y_1 \Rightarrow$ 0 $x_1 \Rightarrow$ 0%

$y_2 \Rightarrow$ 10.9286 $x_2 \Rightarrow$ 100%

NOTA: Dichos valores fueron extraídos de la tabla de datos.

$$y = y_1 + \left[\frac{(x - x_1)}{(x_2 - x_1)} * (y_2 - y_1) \right] = 0 + \left[\frac{(63.2 - 0)}{(100 - 0)} * (10.9286 - 0) \right] = 6.9069$$

Ahora buscamos en los datos un valor igual o aproximado al valor de presión hallado y de esta manera encontramos un valor que se aproxima al de la constante de tiempo.

	Tiempo (s)	Presión (%)	Escalón (%)
52	25.5000	5.4643	20
53	26	5.4643	20
54	26.5000	6.2449	20
55	27	6.2449	20
56	27.5000	5.4643	20
57	28	6.2449	20
58	28.5000	6.2449	20
59	29	6.2449	20
60	29.5000	6.2449	20
61	30	7.0255	20
62	30.5000	6.2449	20
63	31	7.0255	20

Figura 32. Constante de tiempo en el escalón del 0% al 20% (Elaboración propia).

$$\tau = 30s - L = 30s - 3s = 27s$$

$\tau = 27s \Rightarrow$ En este instante de tiempo se alcanza el 63,2% del valor final

Para el escalón de 40% al 60%:

- Magnitud de escalón:

$$\Delta U = 20$$

- Ganancia estática:

	Tiempo (s)	Presión (%)	Escalón (%)			Tiempo (s)	Presión (%)	Escalón (%)
1	0	28.8827	40	^	415	207	47.6174	60
2	0.5000	29.6633	60		416	207.5000	47.6174	60
3	1	28.8827	60		417	208	47.6174	60
4	1.5000	28.8827	60		418	208.5000	46.8368	60
5	2	29.6633	60		419	209	46.8368	60
6	2.5000	29.6633	60		420	209.5000	47.6174	60
7	3	29.6633	60		421	210	47.6174	60
8	3.5000	30.4439	60		422	210.5000	47.6174	60
9	4	29.6633	60		423	211	47.6174	60
10	4.5000	31.2245	60		424	211.5000	46.8368	60
11	5	30.4439	60		425	212	47.6174	60
12	5.5000	31.2245	60	v	426	212.5000	47.6174	60

Figura 33. Porcentaje mínimo y máximo de presión en el escalón del 40% al 60% (Elaboración propia).

$$k = \frac{\Delta y}{\Delta U} = \frac{(47.6174 - 28.8827)}{20} = 0.936735$$

- Retardo puro:

	Tiempo (s)	Presión (%)	Escalón (%)
1	0	28.8827	40
2	0.5000	28.8827	60
3	1	28.8827	60
4	1.5000	28.8827	60
5	2	29.6633	60
6	2.5000	29.6633	60
7	3	29.6633	60
8	3.5000	30.4439	60
9	4	29.6633	60
10	4.5000	31.2245	60
11	5	30.4439	60
12	5.5000	31.2245	60

Figura 34. Tiempo muerto en el escalón del 40% al 60% (Elaboración propia).

$L = 1.5s \Rightarrow$ Tiempo que tarda el sistema en reaccionar ante el escalón

- Constante de tiempo:

Para la hallar la constante de tiempo se utilizó la ecuación de interpolación:

$$y = y_1 + \left[\frac{(x - x_1)}{(x_2 - x_1)} * (y_2 - y_1) \right] \Rightarrow \text{Ecuación de interpolación}$$

siendo:

$y \Rightarrow$ Valor a hallar $x \Rightarrow$ 63,2% del valor final

$y_1 \Rightarrow$ 28.8827 $x_1 \Rightarrow$ 0%

$y_2 \Rightarrow$ 47.6174 $x_2 \Rightarrow$ 100%

NOTA: Dichos valores fueron extraídos de la tabla de datos.

$$y = y_1 + \left[\frac{(x - x_1)}{(x_2 - x_1)} * (y_2 - y_1) \right] = 28.8827 + \left[\frac{(63.2 - 0)}{(100 - 0)} * (47.6174 - 28.8827) \right] = 40.7230$$

Ahora buscamos en los datos un valor igual o aproximado al valor de presión hallado y de esta manera encontramos un valor que se aproxima al de la constante de tiempo.

	Tiempo (s)	Presión (%)	Escalón (%)
89	44	39.8113	60
90	44.5000	39.8113	60
91	45	39.8113	60
92	45.5000	40.5919	60
93	46	40.5919	60
94	46.5000	39.8113	60
95	47	39.8113	60
96	47.5000	40.5919	60
97	48	41.3725	60
98	48.5000	39.8113	60
99	49	41.3725	60
100	49.5000	40.5919	60

Figura 35. Constante de tiempo en el escalón del 40% al 60% (Elaboración propia).

$$\tau = 48s - L = 48s - 1.5s = 46.5s$$

$$\tau = 46.5s$$

⇒ En este instante de tiempo se alcanza el 63,2% del valor final

Para el escalón de 60% al 80%:

- Magnitud de escalón:

$$\Delta U = 20$$

- Ganancia estática:

	Tiempo (s)	Presión (%)	Escalón (%)		Tiempo (s)	Presión (%)	Escalón (%)
1	0	47.6174	60	495	247	61.6685	80
2	0.5000	47.6174	80	496	247.5000	61.6685	80
3	1	47.6174	80	497	248	60.8879	80
4	1.5000	47.6174	80	498	248.5000	61.6685	80
5	2	48.3980	80	499	249	61.6685	80
6	2.5000	47.6174	80	500	249.5000	61.6685	80
7	3	48.3980	80	501	250	61.6685	80
8	3.5000	48.3980	80	502	250.5000	60.8879	80
9	4	48.3980	80	503	251	61.6685	80
10	4.5000	49.1787	80	504	251.5000	61.6685	80
11	5	49.1787	80	505	252	61.6685	80
12	5.5000	49.1787	80	506	252.5000	61.6685	80

Figura 36. Porcentaje mínimo y máximo de presión en el escalón del 60% al 80% (Elaboración propia).

$$k = \frac{\Delta y}{\Delta U} = \frac{(61.6685 - 47.6174)}{20} = 0.702555$$

- Retardo puro:

	Tiempo (s)	Presión (%)	Escalón (%)
1	0	47.6174	60
2	0.5000	47.6174	80
3	1	47.6174	80
4	1.5000	47.6174	80
5	2	48.3980	80
6	2.5000	47.6174	80
7	3	48.3980	80
8	3.5000	48.3980	80
9	4	48.3980	80
10	4.5000	49.1787	80
11	5	49.1787	80
12	5.5000	49.1787	80

Figura 37. Tiempo muerto en el escalón del 60% al 80% (Elaboración propia).

$L = 1.5s \Rightarrow$ Tiempo que tarda el sistema en reaccionar ante el escalón

- Constante de tiempo:

Para la hallar la constante de tiempo se utilizó la ecuación de interpolación:

$$y = y_1 + \left[\frac{(x - x_1)}{(x_2 - x_1)} * (y_2 - y_1) \right] \Rightarrow \text{Ecuación de interpolación}$$

siendo:

$y \Rightarrow$ Valor a hallar $x \Rightarrow$ 63,2% del valor final

$y_1 \Rightarrow$ 47.6174 $x_1 \Rightarrow$ 0%

$y_2 \Rightarrow$ 61.6685 $x_2 \Rightarrow$ 100%

NOTA: Dichos valores fueron extraídos de la tabla de datos.

$$y = y_1 + \left[\frac{(x - x_1)}{(x_2 - x_1)} * (y_2 - y_1) \right] = 47.6174 + \left[\frac{(63.2 - 0)}{(100 - 0)} * (61.6685 - 47.6174) \right] = 56.4977$$

Ahora buscamos en los datos un valor igual o aproximado al valor de presión hallado y de esta manera encontramos un valor que se aproxima al de la constante de tiempo.

	Tiempo (s)	Presión (%)	Escalón (%)
80	39.5000	55.4236	80
81	40	56.2042	80
82	40.5000	56.2042	80
83	41	56.2042	80
84	41.5000	56.2042	80
85	42	56.2042	80
86	42.5000	56.2042	80
87	43	56.9848	80
88	43.5000	56.2042	80
89	44	56.2042	80
90	44.5000	56.9848	80
91	45	56.9848	80

Figura 38. Constante de tiempo en el escalón del 40% al 60% (Elaboración propia).

$$\tau = 43s - L = 43s - 1.5s = 42.5s$$

$$\tau = 42.5s$$

⇒ En este instante de tiempo se alcanza el 63,2% del valor final

Luego de hallar todos los parámetros para cada uno de los escalones, tenemos las siguientes funciones de transferencia:

Escalón	Parámetros función de transferencia	Función de transferencia de primer orden más retardo
0% al 20%	$k = 0.54643$ $\tau = 27s$ $L = 3s$	$G(s) = \frac{0.54643}{27 \cdot s + 1} \cdot e^{-3 \cdot s}$
40% al 60%	$k = 0.936735$ $\tau = 46.5s$ $L = 1.5s$	$G(s) = \frac{0.93673}{46.5 \cdot s + 1} \cdot e^{-1.5 \cdot s}$
60% al 80%	$k = 0.702555$ $\tau = 42.5s$ $L = 1.5s$	$G(s) = \frac{0.70255}{42.5 \cdot s + 1} \cdot e^{-1.5 \cdot s}$

De acuerdo con la respuesta de cada función de transferencia, se analiza cual identifica de una manera más exacta a la planta para proceder a realizar el control.

Para el escalón del 0% al 20%:

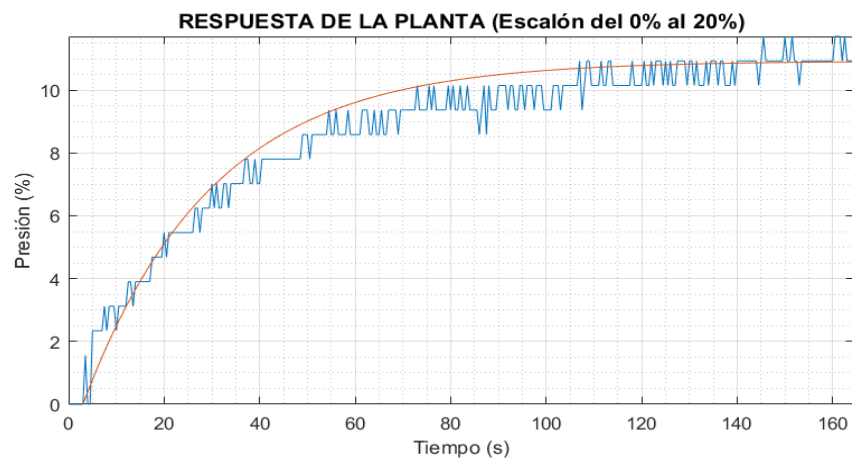


Figura 39. Respuesta de la función de transferencia, escalón del 0% al 20% (Elaboración propia).

Para el escalón del 40% al 60%:

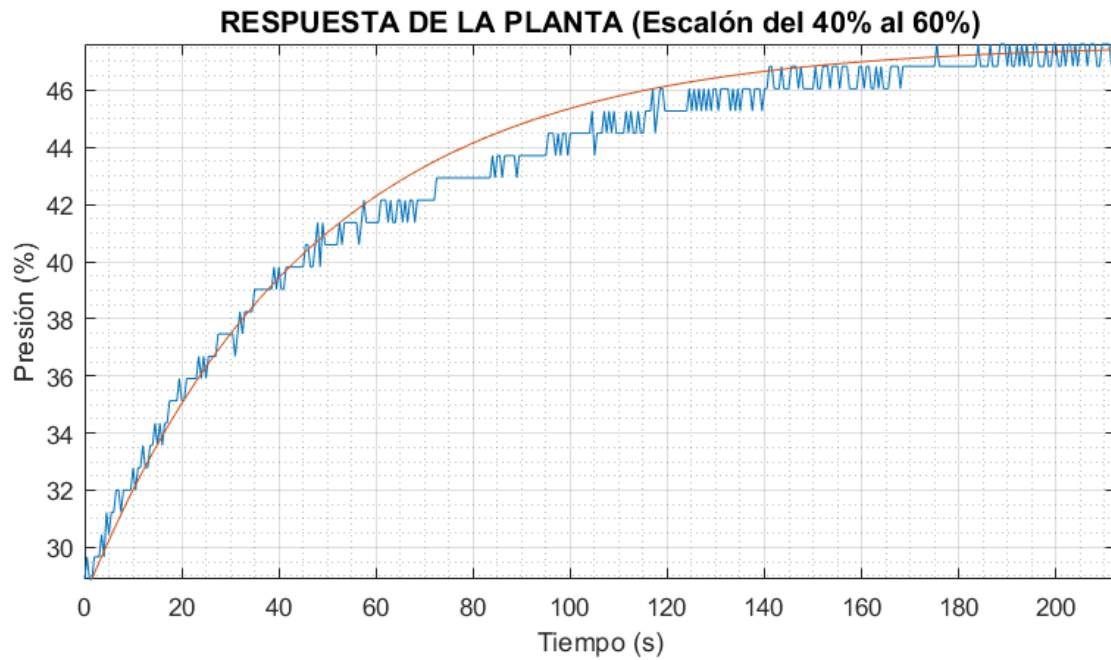


Figura 40. Respuesta de la función de transferencia, escalón del 40% al 60% (Elaboración propia).

Para el escalón del 60% al 80%:

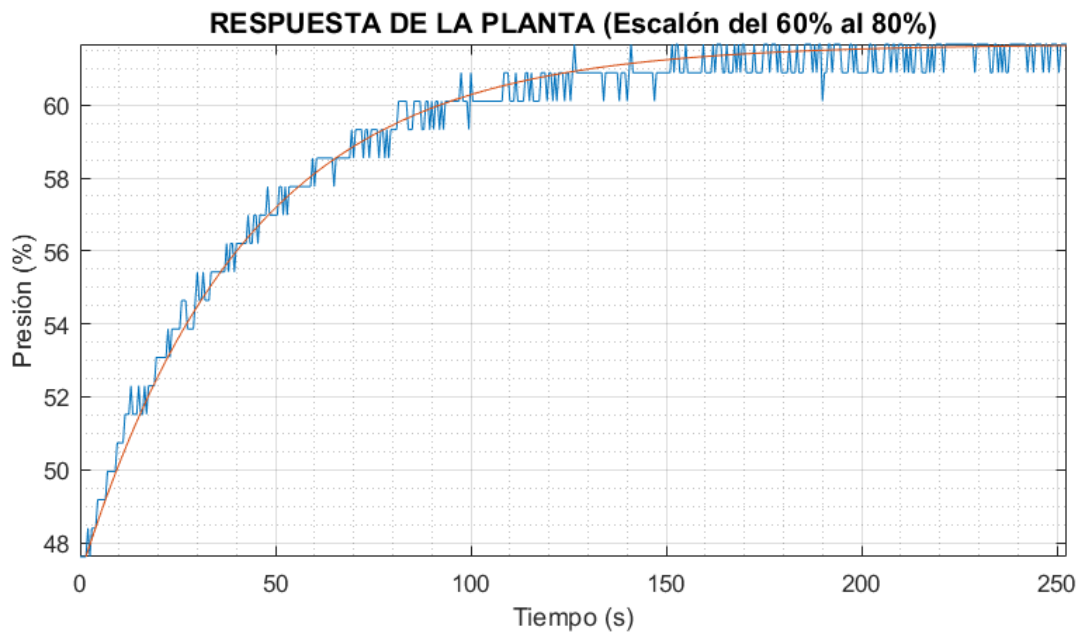


Figura 41. Respuesta de la función de transferencia, escalón del 60% al 80% (Elaboración propia).

La función de transferencia que mejor identifica a la planta es la del escalón del 60% al 80%, basándonos en el comportamiento que tuvo de acuerdo a su escalón y en el error que se presenta.

Con esta función procedemos a hacer el controlador del módulo didáctico para control de la variable presión.

3.7.2. Controladores

Respuestas de los controladores P, PI y PID en lazo cerrado respecto a la función de transferencia de la planta.

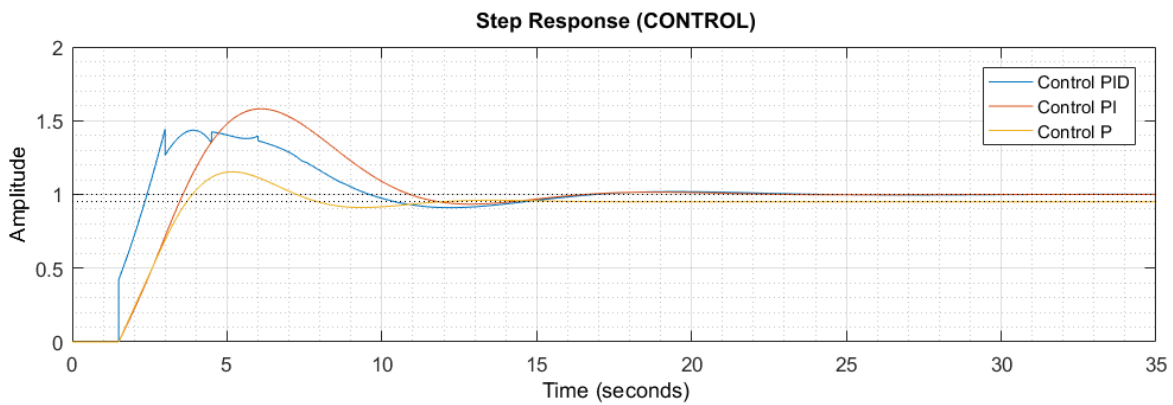


Figura 42. Respuesta de los controladores en lazo cerrado para la planta (Elaboración propia).

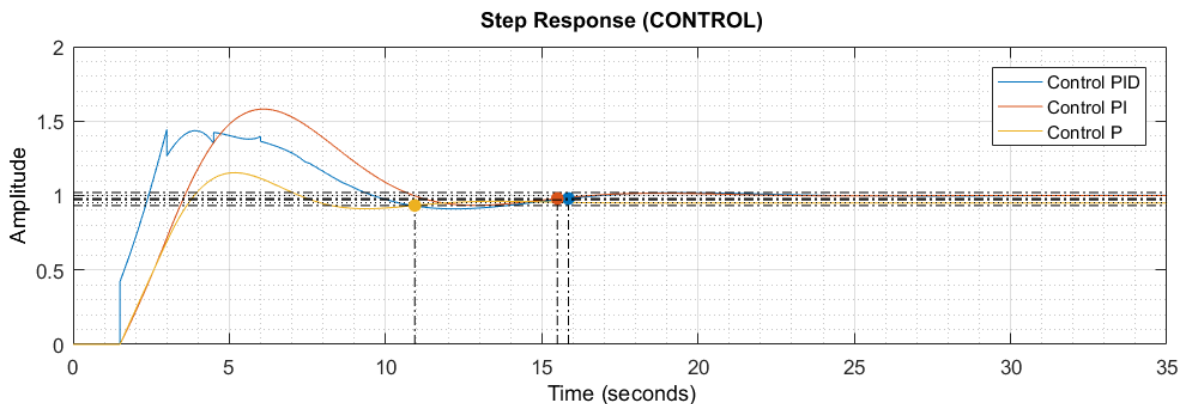


Figura 43. Tiempo de establecimiento de los controladores (Elaboración propia).

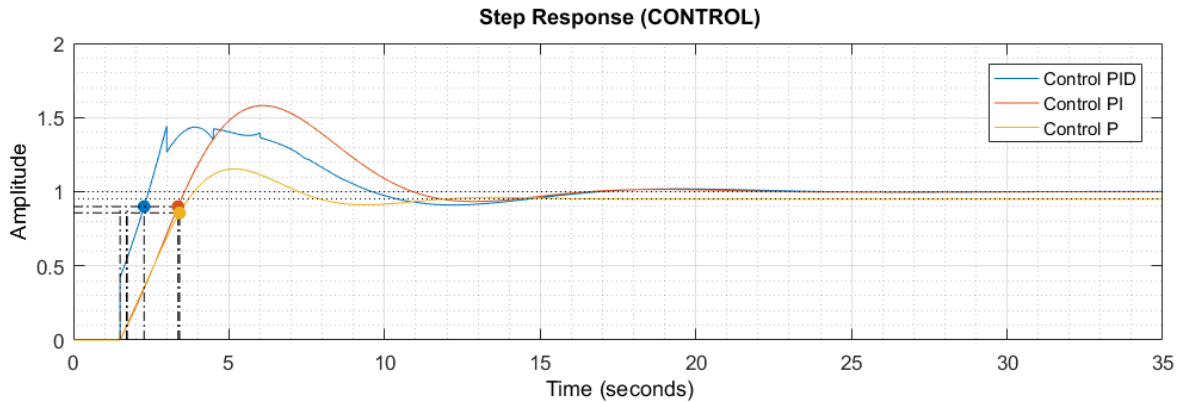


Figura 44. Tiempo de aumento de los controladores (Elaboración propia).

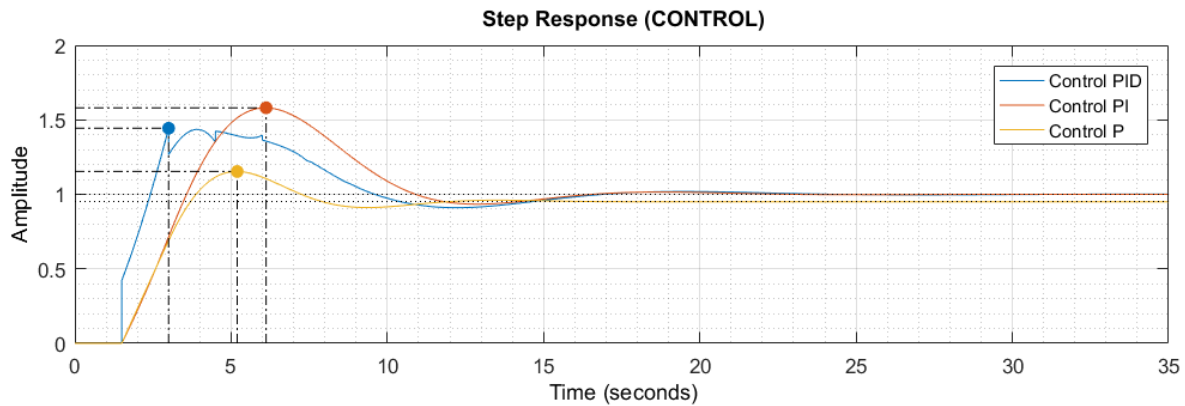


Figura 45. Respuesta pico de los controladores (Elaboración propia).

Finalmente y de acuerdo a lo que podemos inferir de las respuestas, como los tiempos de establecimiento, tiempos de aumento y respuestas pico, decidimos realizar el control PI para la planta, esto debido a que el control PID visualizamos que aunque llega a su estabilización, es más controlado el PI en el sentido de que trabaja con una mejor linealidad, por otro lado, el control P, llega a su estabilización en un mejor tiempo pero no se estabiliza en el set point, lo cual, es lo que más nos interesa en este caso.

Basados en los parámetros de control que Ziegler-Nichols derivaron para el método de la curva de reacción, encontramos las ganancias para su posterior uso en el control de la planta (Parámetros, Figura 23).

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	01
		Fecha	2019-01-25

Para un controlador P:

$$K_p = K_c = \frac{\tau}{L} = \frac{42.5}{1.5} = 28.3333$$

$$K_i = \frac{K_c}{T_i} = \frac{28.3333}{\infty} = 0$$

$$K_d = K_c * T_d = 28.3333 * 0 = 0$$

Para un controlador PI:

$$K_p = K_c = 0.9 * \frac{\tau}{L} = 0.9 * \frac{42.5}{1.5} = 25.5$$

$$K_i = \frac{K_c}{T_i} = \frac{0.3 * K_c}{L} = \frac{0.3 * 25.5}{1.5} = 5.1$$

$$K_d = K_c * T_d = 25.5 * 0 = 0$$

Para un controlador PID:

$$K_p = K_c = 1.2 * \frac{\tau}{L} = 1.2 * \frac{42.5}{1.5} = 34$$

$$K_i = \frac{K_c}{T_i} = \frac{K_c}{2 * L} = \frac{34}{2 * 1.5} = 11.3333$$

$$K_d = K_c * T_d = K_c * 0.5 * L = 34 * 0.5 * 1.5 = 25.5$$

3.7.2.4. Control digital de la planta

Para llevar el control de la planta a un modelo digital que podamos utilizar en computacionalmente, procedemos a discretizar la planta:

Como se encuentra la ecuación en términos de la transformada Z, se debe hacer el manejo matemático para poder implementarlo en el software de programación como es el caso.

$$C[z] = e[z] * \left(K_c + K_i * \frac{T}{2} * \frac{1 + z^{-1}}{1 - z^{-1}} + K_d * \frac{1 - z^{-1}}{T} \right)$$

$$C[z] = e[z] * \frac{(K_c + K_i * \frac{T}{2} * (1 + z^{-1}) + K_d * \frac{(1 - z^{-1})^2}{T})}{1 - z^{-1}}$$

Luego de este procedimiento se pasa el denominador a multiplicar al otro lado de la igualdad y posteriormente se debe realizar la transformada inversa Z, quedando la ecuación en diferencias.

$$C[k] - C[k - 1] = K_c(e[k] - e[k - 1]) + K_i T \frac{(e[k] - e[k - 1])}{2} + K_d \frac{e[k] - 2e[k - 1] + e[k - 2]}{T}$$

Ahora llevamos la ecuación final al software de Arduino, de esta forma:

$$C[k] = C[k - 1] + K_c(e[k] - e[k - 1]) + K_i T \frac{(e[k] - e[k - 1])}{2} + K_d \frac{e[k] - 2e[k - 1] + e[k - 2]}{T}$$

Donde:

- $C[k] \Rightarrow$
El valor controlado que en nuestro caso es el PWM aplicado al motor
- $C[k - 1] \Rightarrow$ *El valor de control anterior*
- $e[k] \Rightarrow$ *Error presente*
- $e[k - 1] \Rightarrow$ *Error anterior*
- $e[k - 2] \Rightarrow$ *Error dos muestras atrás*
- $T \Rightarrow$ *Tiempo de muestreo, en nuestro caso es 0.5*
- $T \Rightarrow$ *Tiempo de muestreo, en nuestro caso es 0.5*
- $e[k] = SETPOINT - PRESIÓN$

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

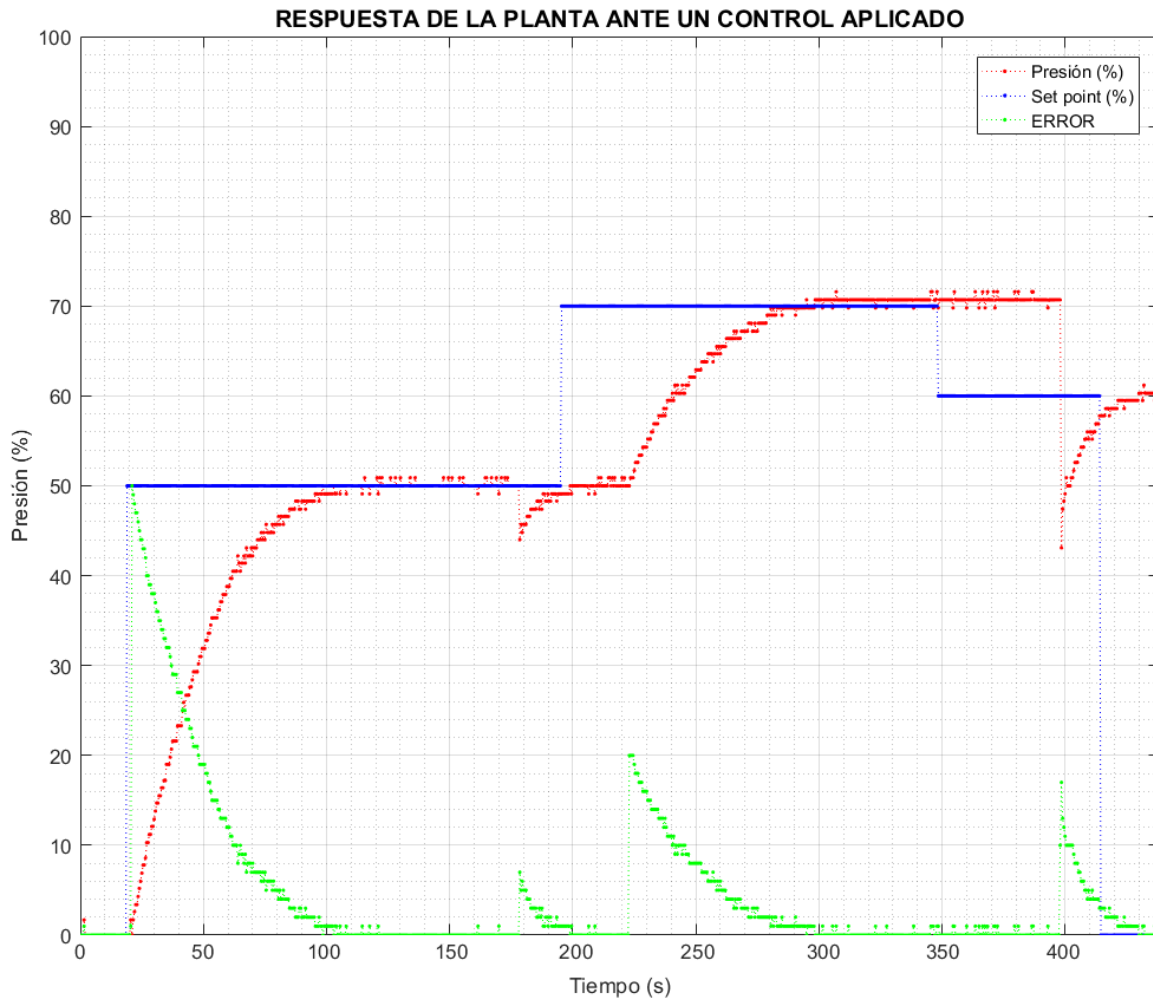


Figura 46. Respuesta del controlador ante la planta de presión (Elaboración propia).

La respuesta de la planta bajo los parámetros establecidos por Ziegler-Nichols *figura 23*, se pueden visualizar en la gráfica obtenida por la interfaz *figura 46*, los datos para esta iteración se calcularon manualmente bajo las fórmulas establecidas para cada tipo de control y se ingresaron en la interfaz. Se puede inferir de la gráfica que la planta sigue correctamente el control programado. La interfaz tiene la herramienta de analizar la planta en lazo cerrado bajo los parámetros de la función de transferencia (ganancia estática,

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	01
		Fecha	2019-01-25

constante de tiempo, retardo puro), esta herramienta arroja una gráfica la cual muestra tres tipos de control que se pueden realizar para la estabilización del sistema en una presión determinada, control proporcional (P), control proporcional integral (PI) y control proporcional integral derivativo (PID) de la figura 42. Se puede inferir que el control P no logra estabilizar la planta en el set point establecido, el control PID y el PI logran estabilizar la planta en el set point establecido en un tiempo similar pero el PID con cambios más abruptos, lo cual afecta directamente el funcionamiento del motor creando picos de corrientes que pueden generar ruidos en los circuitos del módulo, por esta razón se trabaja con el control PI. Luego de elegir el control correcto se calculan las constantes y se pone en marcha la planta encendiendo el motor y estableciendo el porcentaje de presión al que se quiere llegar.

Los resultados se pueden visualizar en la interfaz gráfica, los cambios de setpoint y el control son rápidamente ejecutados por el microcontrolador Arduino, pero la lectura de los datos en la interfaz gráfica por medio de la comunicación serial ocasiona un gasto computacional alto, el cual provoca que esta lectura no se visualice en el tiempo exacto en la interfaz.

4.1 Discusión

Este módulo de presión tiene como elemento final de control el compresor de aire ayudado por una electroválvula, que actúa llevando la presión al set point cuando las diferencias en los errores del control son negativas. A diferencia de muchos módulos de presión del mercado que utilizan válvulas proporcionales de costos elevados, este módulo utiliza válvula solenoide que además de ser económica puede cumplir óptimamente su función mediante una buena programación.

5. CONCLUSIONES, RECOMENDACIONES Y TRABAJO FUTURO

5.1 Conclusiones

- Se desarrolló un módulo físicamente compacto, con una interfaz amigable, con funciones interactivas para facilitar el aprendizaje en el área de sistemas de control a los alumnos del Instituto Tecnológico Metropolitano.
- Este módulo es construido con materiales de calidad, sustentando el buen funcionamiento, pero también sustentando el bajo costo de su construcción.
- Este tipo de módulo de la mano con una interfaz gráfica son productos que gracias a los manuales de operación e ilustraciones en tiempo real facilitan la comprensión de conceptos.

5.2 Recomendaciones

- Estos módulos deberían estar más presentes en las aulas en diferentes materias de las carreras profesionales de electrónica, mecatrónica, electromecánica y afines, ya que muchos conceptos de diferentes materias pueden ser comprendidos con mayor facilidad.
- Se recomienda a todos los estudiantes y profesores leer previamente los manuales de uso para el correcto funcionamiento de este módulo

5.3 Trabajo futuro

- La planta propuesta al tener dos tanques en serie entrega un sistema de primer orden (SPO), aparentemente lineal, este SPO propone un control más sencillo. Para la comprensión total de los temas de control es necesario realizar prácticas en

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	01
		Fecha	2019-01-25

sistemas de segundo orden, que necesitan de controles más complejos, esto quiere decir que en un futuro se puede implementar dos tanques en paralelo para la planta.

- Agregar un manómetro al módulo para así poder visualizar la presión por otro medio en caso de que el sensor de presión deje de funcionar correctamente.

6. REFERENCIAS

- Planta de Presión. Tesis de Pregrado. Medellín: Politécnico Colombiano Jaime Isaza Cadavid.
- Alfaro, V., & Vilanoba, R. (2010). Sintonización de los Controladores PID de 2GdL: desempeño, robustez y fragilidad. XIV Congreso Latinoamericano de Control Automático (CLCA 2010) (págs. 267-272). Santiago de Chile: Congreso Latinoamericano de Control Automático.
- CABALLERO, J. J. (14 de marzo de 2017). Obtenido de <https://www.lawebdelprogramador.com/foros/Matlab/1593274>
- Chojolán, S. E. (octubre de 2007). *DISEÑO DE CONTROLADORES PID EN TIEMPO DISCRETO*. Guatemala.
- Chuk, D. (2012). *Los sistemas de primer orden y controladores PID*. Argentina.
- Madrid, U. C. (2013). *Estudio Temporal de Sistemas Continuos*. Madrid.
- Muñoz, F. S., & Vallejo, A. F. (2015). *DISEÑO DE UN CONTROLADOR DIGITAL UNIVERSAL PID CON CARACTERÍSTICAS DE TIPO INDUSTRIAL*. Pereira.
- OGATA, K. (s.f.). *INGENIERÍA DE CONTROL MODERNA*.
- *Profesor molina*. (2012). Obtenido de http://www.profesormolina.com.ar/electromec/prot_circ_elect.htm
- Semiconductor, F. (2009). *NPXP*. Obtenido de www.nxp.com
- Tíscar, j. G. (15 de julio de 2011). Obtenido de <https://wechoosethemoon.es/2011/07/15/arduino-matlab-adquisicion-de-datos/>

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	01
		Fecha	2019-01-25

- Pallás Areny, R. (1987). *Sensores y Acondicionadores de Señal*. Barcelona: Marcombo Boixareu.
- Ramírez, A., & Álvarez, D. (2013). *Diseño de un Sistema de Control por Matriz Dinámica DMC para*
- Parlow, E. (2008). *Presión del aire*. Obtenido de meteoblue:
<https://content.meteoblue.com/es/meteoscool/el-tiempo/presion-del-aire>
- *Tirerack*. (s.f.). Obtenido de INFORMACIÓN DE NEUMÁTICOS: CARGA Y PRESIÓN DE AIRE EN ESTADOS UNIDOS:
<https://www.tirerack.com/wheels/tech/techpage.jsp?techid=21&ln=sp>
- definiciones. (s.f.). *Wikipedia*. Obtenido de www.wikipedia.com

FIRMA ESTUDIANTES	<u>Jorge Andrés Herrera Arias</u> <u>José Esteban Escobar</u> <u>fl...m</u>
FIRMA ASESOR	<u>ORLANDO ZAPATA CORTEZ</u>
	8 feb 2019
	FECHA ENTREGA: _____

FIRMA COMITÉ TRABAJO DE GRADO DE LA FACULTAD _____	
RECHAZADO__	ACEPTADO ____
	ACEPTADO CON MODIFICACIONES ____
	ACTA NO. _____
	FECHA ENTREGA: _____

FIRMA CONSEJO DE FACULTAD _____
ACTA NO. _____
FECHA ENTREGA: _____