



Universidad Autónoma de Querétaro

Facultad de Ingeniería

Licenciatura en Automatización

**Diseño de un sistema digital para el control de flujo de aire en
actuadores neumáticos**

Tesis

Que como parte de los requisitos para obtener el Título de
Ingeniero en Automatización

Presenta:

Pedro Alonso Camacho Angulo

Dirigido por:

Dr. Juan Manuel Ramos Arreguin

Dr. Juan Manuel Ramos Arreguín

Presidente

Firma

Dr. Efrén Gorrostieta Hurtado

Secretario

Firma

Dr. Saúl Tovar Arriaga

Vocal

Firma

Dr. Marco Antonio Aceves Fernández

Suplente

Firma

Centro Universitario Querétaro, QRO

México.

Junio 2019

Dedicatorias

Dedico esta tesis a mi Universidad, por haber dado la oportunidad de estudiar una carrera ya que de no existir esta difícilmente habría podido estudiar a este nivel.

A los profesores, administrativos y demás trabajadores que colaboran para que la universidad funcione

Dirección General de Bibliotecas UNQ

Agradecimientos

Agradezco primeramente a mis padres por haber hecho posible el que yo haya podido estudiar una carrera universitaria.

Agradezco a mi asesor de tesis el Dr. Juan Manuel Ramos Arreguin, que más de ser asesor de tesis, ha sido un guía a través de la carrera desde los primeros semestres, estando al pendiente en todo momento de problemas o necesidades presentadas en cada paso.

A la Universidad Autónoma de Querétaro, primeramente, por ofrecer la oportunidad de educación superior, y segundo por ofertar becas utilizadas en el desarrollo del proyecto que se presenta.

Agradezco a los maestros por su esfuerzo constante por transferir sus conocimientos a nosotros sus alumnos.

A mis compañeros y amigos Gerardo, Ernesto, Brandon, Mateo y Eduardo, por estar a todo lo largo de la carrera en las buenas y en las malas.

Resumen

Debido al alto precio de los equipos de regulación de caudal que se ofrecen en el mercado en este momento, se decidió diseñar un sistema digital de bajo costo con el objetivo de ser competitivo en el mercado, el sistema se basa en el uso de una válvula de mariposa acoplada a un motor de corriente continua, mediante un control de posición es posible regular el caudal de aire. El hardware consta de un microcontrolador de la familia de dsPic33 que satisface las necesidades del sistema a un costo asequible y de pequeño tamaño.

Abstract

Because the high price of the flow regulation equipment offered in the market at this time, it was decided to design a low-cost digital system with the objective of being competitive in the market, the system is based on the use of a throttle valve coupled to a dc motor, by means of a position control it is possible to regulate the air flow. The hardware consists of a microcontroller from the family of dsPic33 that meets the needs of the system at an affordable cost and small size.

Dirección General de Bibliotecas UFR

Índice general

Dedicatorias	i
Agradecimientos.....	ii
Resumen.....	iii
Abstract	iv
Índice general.....	I
Índice de figuras	IV
CAPÍTULO 1. Introducción	1
1.1. Antecedentes.....	1
1.2. Descripción del problema.....	3
1.3. Justificación	4
1.4. Objetivos	4

1.4.1.	Objetivo general.....	4
1.4.2.	Objetivos específicos.....	4
CAPÍTULO 2. Marco Teórico		5
2.1 Neumática.....		5
2.1.1	Instalación Neumática.....	7
2.1.2	Válvulas.....	8
2.2 Control de Posición de un motor DC.....		11
2.3 Microcontrolador DSPIC33FJ64MC802		15
2.3.1	Modulo QEI (Quadrature Encoder Interface)	16
2.3.2	Modulo PWM (Pulse Wave Modulation)	17
CAPÍTULO 3. Metodología		19
3.1 Modelado matemático del motor		20
3.2. Diseño CAD/CAM		22
3.2.1.	Diseño de soporte.....	23
3.2.2	Diseño de PCB.....	26
3.3. Banco de pruebas (Test Bench)		27
3.4 Identificación de Parámetros.		28
3.5 Implementación del controlador.....		29

3.5 Pruebas	30
3.6 Análisis de resultados.	31
CAPÍTULO 4. Resultados y Conclusiones	32
4.1 Resultados.....	32
4.2 Conclusiones.....	34
Bibliografía	35

Dirección General de Bibliotecas UAQ

Índice de figuras

Figura 1. Principales elementos de una instalación neumática (Buenache., et al., 2010).	8
Figura 2. Ejemplos de diferentes válvulas distribuidoras. (Festo, 2018).....	10
Figura 3. Válvula de Regulación. (Festo, 2018).....	10
Figura 4. símbolo neumático de las válvulas de regulación más comunes. (Festo, 2018)	10
Figura 5. Ejemplo de relación Flujo-Apertura de una válvula de Regulación. (Festo, 2018)	11
Figura 6. Diagrama a bloques de un lazo de control PID. (Ogata, 2010).	13
Figura 7. Circuito mínimo del dsPIC33FJ64MC802. (Microchip Technology Inc. 2011)	15
Figura 8. Código de configuración de un QEI.....	17
Figura 5. Código de configuración de bloque de PWM.....	18
Figura 10. Metodología usada para la realización del proyecto.....	19
Figura11. Tabla de dimensiones de motor pololu usado (Pololu, et. al. 2019)	23
Figura 12. Tabla de dimensiones de válvula de estrangulación. (Festo, 2018)	24
Figura 13. Soporte Principal.	24
Figura 14. Opresor de Motor.	24
Figura 15. Opresor de Válvula.....	25
Figura 16. Cople entre motor y válvula.....	25
Figura 17. Ensamble.....	25
Figura 18. Vista inferior (Bottom) del PCB.....	26
Figura 19. Vista superior (TOP) del PCB.....	27
Figura 20. Vista 3D del PCB.....	27
Figura 22. Respuesta del sistema.	31
Figura 23. Respuesta de Control.....	33

Dirección General de Bibliotecas UAQ

CAPÍTULO 1. Introducción

Introducción

1.1. Antecedentes

1868, J. C. Maxwell formula una teoría matemática relacionada con la teoría de control usando el modelo de ecuación diferencial del regulador de Watt y analizando su estabilidad.

1922, Minorsky, trabaja en controladores automáticos de dirección en barcos y muestra cómo se podría determinar la estabilidad a partir de las ecuaciones diferenciales que describen el sistema. Utilización del primer PID.

1938, Hendrik Wade Bode desarrolló el diagrama de Bode, el cual despliega la respuesta en frecuencia de los sistemas de una manera clara. Su trabajo en Sistemas de Control Automático introdujo innovadores métodos para estudiar la estabilidad de los sistemas

El control automático es una de las disciplinas sobre las que se basa el modo de vida, tecnológicamente avanzado, en el cual nos desarrollamos hoy en día, ya que sus aplicaciones se encuentran en gran parte de las actividades que el ser humano realiza en el siglo XXI, ya sea de manera directa como indirectamente (Hernández-Guzmán, et al., 2013).

El control automático tiene una gran variedad de aplicaciones, dentro de la cual se encuentra el control de sistemas eléctricos. Los sistemas neumáticos son considerados en el control automático para sistemas de apertura y cierre, básicamente, sin considerar

el control de la posición del mismo. Lo anterior, debido a la alta no linealidad del aire. A pesar de eso, se han desarrollado diversos trabajos alrededor de sistemas neumáticos para controlar su posición. Algunos de estos trabajos se mencionan a continuación.

En 2004 Situm presenta un procedimiento de diseño e implementación experimental de un control PID de posición, el cual se ajusta de acuerdo a la amortiguación óptima para lograr un controlador de posición preciso de un servomotor neumático, este sistema carece de una compensación de variación de presión, lo cual explica el autor, necesita un sistema de control más robusto (Situm, et al. 2004).

En 2017 la empresa CNH patenta un sistema de control neumático para levantar un brazo de un implemento agrícola, controlando posición y velocidad de movimiento (Brooks, 2017).

En 2016 se utiliza el control en una válvula neumática para regular la presión y cantidad de aire que se inyecta a las llantas de un automóvil. (Spindler., et al., 2016).

En 2018 He utiliza un control feedforward para controlar pistones con el fin de mover los elementos de ajuste de altitud de un ala delta (He., et al., 2018).

En la Universidad Autónoma de Querétaro, se está trabajando en el desarrollo de robots neumáticos, donde se presenta el trabajo de un robot neumático de 1 grado de libertad, realizando una comparación de resultados prácticos contra resultados de simulación (Ramos-Arreguin, et. Al, 2008a). Así mismo, se presenta un control basado en lógica difusa para controlar la posición de un robot neumático de 1 grado de libertad (Ramos-Arreguin, et. Al, 2008b). En el 2018, se realiza la modelación y simulación de un robot neumático de 4 grados de libertad (Delgado J.A.P., et. al, 2018).

En 2018 Saba controla una plataforma de dos grados de libertad mediante el control PI del flujo de aire hacia 3 actuadores neumáticos tipo musculo. (Saba., et al., 2018)

En 2019 Wu utiliza FSMC (Fuzzy Sliding Mode Controller) para controlar un actuador neumático tipo musculo, el cual es altamente utilizado en sistemas Bionicos (Wu, et al.

2019). Así mismo, Huang estudia el control ¿de? mediante válvulas Neumáticas controladas por PWM, en la aplicación de movimientos suaves, en manos humanoides y grippers (Huang, et al. 2019).

En 2019 Li desarrolla un asiento para maquinaria forestal la cual tiene ajuste neumático de altura, además de protección para vibraciones, con el fin de cuidar la salud del operador. Este ajuste se hace por medio de un control en cascada, el lazo maestro ajusta la altura del asiento y el lazo esclavo se encarga de absorber las vibraciones generadas por la naturaleza del trabajo (Li, et al., 2019).

En 2019 Fan desarrolla un sistema de control de Velocidad/Fuerza para un proceso de pulimiento con la finalidad de regular el espesor de la capa de pintura que se remueve en el proceso (Fan., et al., 2019)

En 2019 Fan desarrolla un control de trayectoria de movimiento de un sistema manipulador de doble unión actuado mediante un elemento neumático tipo musculo artificial (Fan., et al., 2019).

En enero del 2019 la IRJET presenta un artículo con una investigación sobre el control de flujo de aire que controla la apertura y cierre de las puertas de los trenes de pasajeros, con el objetivo de hacer más eficiente el gasto de aire y por lo tanto de energía eléctrica (Bora., et al., 2019).

En 2020 Jaiman estudia el comportamiento de actuadores neumáticos con el objetivo de implementar un control de posición, encontrando que estos no poseen un comportamiento lineal dada la compresibilidad del aire y las altas fuerzas de fricción que estos poseen (Jaiman,et al, 2020).

1.2. Descripción del problema

En la Universidad Autónoma de Querétaro, se está trabajando en el desarrollo de robots neumáticos, donde actualmente se cuenta con un robot neumático de 4 grados de libertad. Sin

embargo, el principal problema al que nos enfrentamos es el control de flujo de aire. Derivado de las complicaciones encontradas para poder usar equipo comercial para controlar el flujo de aire, se requiere desarrollar un dispositivo que permita controlar el flujo de aire, de manera que se pueda controlar los actuadores neumáticos para poder así posicionar al robot en el punto deseado.

1.3. Justificación

En el área de investigación y desarrollo de robots neumáticos, un elemento muy importante y esencial es el control de flujo de aire hacia los actuadores neumáticos. Esto debido a que el aire comprimido es el elemento que proporciona la fuerza a un actuador neumático para generar la fuerza de movimiento. Sin embargo, debido al uso del aire, el comportamiento de estos actuadores es altamente no lineal. Actualmente, existen algunos sistemas reguladores de aire, pero suelen ser caros, y no se consiguen fácilmente en México. Debido a esto, y motivado por el trabajo desarrollado en la UAQ, se ha detectado la necesidad de desarrollar tecnología para controlar el flujo de aire hacia los actuadores neumáticos.

1.4. Objetivos

1.4.1. Objetivo general

Desarrollar e implementar un sistema digital para la regulación de flujo de aire con el fin de controlar el movimiento de actuadores neumáticos.

1.4.2. Objetivos específicos

- Diseñar un banco de pruebas en el que se acoplen válvula y motor de DC para la realización de un controlador utilizando un PID.
- Identificar los parámetros de la planta del Motor utilizando mínimos cuadrados para su uso en el control PID.
- Implementar un controlador de posición del Motor para controlar el flujo de aire, utilizando el controlador PID.

Marco Teórico

2.1 Neumática

El aire comprimido es una de las formas de energía más antiguas que conoce el hombre y que éste ha utilizado y utiliza para ampliar sus recursos físicos. De los antiguos griegos procede la expresión "Pneuma", que designa la respiración, el viento y, desde el punto de vista filosófico, también el alma. Como derivación de las ideas que representa la palabra "Pneuma" se obtuvo, entre otras cosas el concepto Neumática, que trata los movimientos y procesos del aire. (Buenache., et al., 2010).

Para comprender el amplio uso de esta tecnología, expliquemos brevemente el porqué del uso de la Neumática. Algunas de sus ventajas principales son (Buenache., et al., 2010):

- El aire es de fácil captación y abunda en la tierra.
- Es un tipo de Energía limpia.
- El aire no posee propiedades explosivas, por lo que no existen riesgos de chispas.

Las velocidades de trabajo de los elementos neumáticos son razonablemente altas y de relativa facilidad de regulación.

El trabajo con aire no provoca efectos de golpes de ariete, con lo que no daña los componentes de un circuito.

Las sobrecargas no constituyen situaciones peligrosas o que dañen los equipos en forma permanente.

Los cambios de temperatura no afectan de manera significativa.

Permite cambios instantáneos de sentido en los componentes.

Los actuadores no se dañan por sobrecarga.

Las ventajas son importantes, pero como toda tecnología, también tiene desventajas. A continuación, se mencionan algunas de las desventajas más notables de la neumática (Buenache., et al., 2010):

En circuitos muy extensos se producen pérdidas de cargas considerables.

Si se quiere recuperar el aire usado, se requiere de instalaciones especiales.

Las presiones a las que trabajan normalmente no permiten aplicar grandes fuerzas.

Genera altos niveles de ruido debido a la descarga del aire hacia la atmósfera.

El aire comprimido constituye en realidad una forma de transporte de energía de muy fácil manejo, y su utilización se ha ido imponiendo paulatinamente en la industria. Las principales propiedades que han contribuido a que el aire comprimido sea tan ampliamente utilizado son (Buenache., et al., 2010):

- Abundante: Está disponible para su compresión prácticamente en todo el mundo, en cantidades ilimitadas.
- Transporte: El aire comprimido puede ser fácilmente transportado por tuberías, incluso a grandes distancias. No es necesario disponer tuberías de retorno.
- Almacenable: No es preciso que un compresor permanezca continuamente en servicio. El aire comprimido puede almacenarse en depósitos y tomarse de éstos. Además, se puede transportar en recipientes (botellas).
- Temperatura: El aire comprimido es insensible a las variaciones de temperatura, garantiza un trabajo seguro incluso a temperaturas

extremas.

- Antideflagrante: No existe ningún riesgo de explosión ni incendio; por lo tanto, no es necesario disponer instalaciones contra incendio, que son muy caras.
- Limpio: El aire comprimido es limpio y no ensucia. Esto es muy importante, por ejemplo, en las industrias alimenticias, de la madera, textiles y del cuero.

Constitución simple de los elementos: que implica precios económicos.

Es importante destacar que el aire tiene un comportamiento altamente no lineal, por lo que el controlar el flujo de aire, así como el comportamiento de los actuadores neumáticos, es una tarea complicada. Por esto, en este trabajo se busca controlar el flujo de aire, con la finalidad de controlar el comportamiento del actuador neumático.

2.1.1 Instalación Neumática

En toda instalación neumática se hace necesario tratar el aire por varias circunstancias, no necesariamente ajenas a la propia instalación. El aire atmosférico lleva consigo partículas nocivas para los dispositivos de la instalación neumática. El compresor lleva filtros previos, pero no depura el aire. Además, el aire también tiene cierta cantidad de vapor de agua, que puede llegar a condensar y es necesario evacuar (purgar), si no, los componentes mecánicos del circuito sufrirán una oxidación, además del desgaste por otras partículas (Buenache., et al., 2010). Esto lo podemos apreciar en la figura 1.

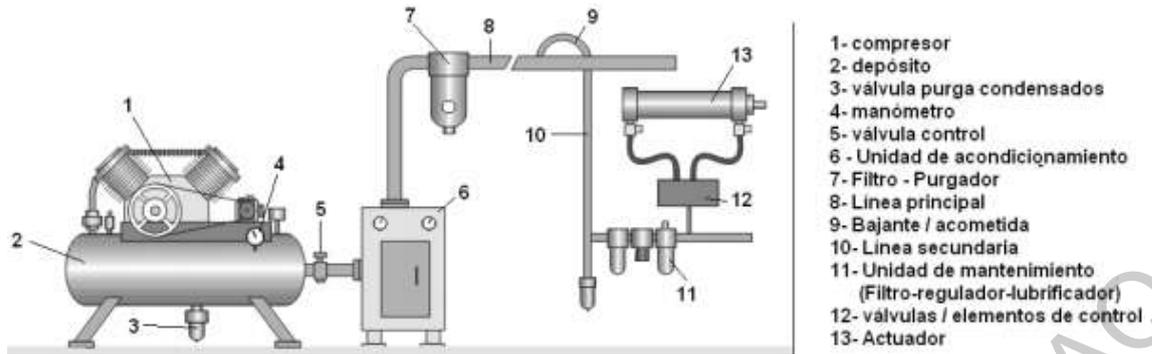


Figura 1. Principales elementos de una instalación neumática (Buenache., et al., 2010).

Otro aspecto muy importante es que los actuadores también ensucian el circuito, ya que son los componentes que enlazan el circuito con el exterior. En el desplazamiento del vástago de un cilindro, en la carrera de retorno puede traer consigo partículas del exterior (polvo, virutas, etc.) e introducirlas en el interior del cilindro. Ocurrido esto, podemos considerar que el aire del circuito queda contaminado. Los cilindros están dotados de juntas rascadoras para evitar este suceso, pero cuando el cilindro no es nuevo, la junta pierde eficacia por desgaste. Con esto queda claro la importancia de un buen tratamiento del aire, para evitar desgastes y corrosiones de los componentes. Una vez que el aire ha superado al compresor, comienza la etapa de acondicionamiento industrial, entendiéndose por esto, los procesos a que debe ser sometido para que pueda ser utilizado sin ningún riesgo mecánico ni químico, consiguiendo las prestaciones deseadas. (Buenache., et al., 2010)

2.1.2 Válvulas

Las válvulas neumáticas controlan o regulan el paso del aire comprimido y su clasificación se efectúa por la función que desarrollan. Siguiendo las recomendaciones de CETOP, la norma DIN 24300 establece la siguiente división: direccionales o distribuidoras, de bloqueo, de presión, de caudal y de cierre. En el presente proyecto se utilizó una válvula del tipo distribuidora (Festo, 2018).

2.1.2.1 Válvulas Distribuidoras (Festo, 2018).

Este tipo de válvulas se usan para controlar el movimiento del flujo neumático, así como la dirección del movimiento. La nomenclatura de las válvulas de acuerdo con su constitución interna, número de posiciones, número de vías, tipo de accionamiento, entre otras características. (Festo, 2018).

Las válvulas distribuidoras se representan por cajas. La cantidad de cajas yuxtapuestas indica las posibles posiciones, y las vías quedan representadas por las entradas y salidas de las líneas interiores que atraviesan dichas cajas. Existen toda clase de combinaciones de canalizaciones: doble mando, obturaciones, conexiones, escape común, entre otros.

Con el fin de reconocer cada conexión, se identifican con números o antiguamente con letras, pero independientemente que nos encontremos planos antiguos o actuales, siempre veremos esta nomenclatura escrita en la posición de reposo o inicial, y nunca se vuelve a escribir la nomenclatura en la otra u otras posiciones (por claridad) y se utilizan de la siguiente forma:

- 1 ó P: Suministro de presión
- 3, 5 o R, S: Escapes
- 2, 4 o A, B: Utilización

En definitiva, con estos elementos, tenemos la posibilidad de representar una válvula, En la Figura 2 se muestra la simbología de las válvulas más comunes.

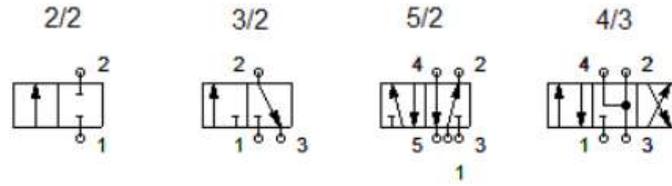


Figura 2. Ejemplos de diferentes válvulas distribuidoras. (Festo, 2018)

2.1.2.2 Válvula de Regulación de flujo

Las válvulas reguladoras o estranguladoras regulan la velocidad del avance y del retroceso del émbolo de actuadores neumáticos. Esta regulación se consigue mediante una estrangulación apropiada del caudal de aire comprimido, tanto en sentido de escape como en el sentido de la alimentación del aire, en la Figura 3, se aprecia la composición básica de la válvula.

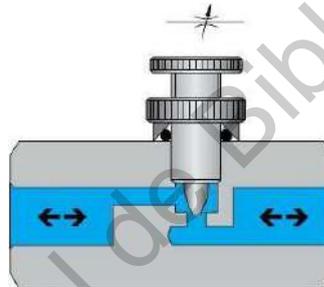


Figura 3. Válvula de Regulación. (Festo, 2018)

En el caso de las válvulas reguladoras de un solo sentido, la función de estrangulación funciona únicamente en un sentido (ya sea en sentido de escape o de alimentación). La función de antirretorno funciona en el sentido contrario correspondiente. En el caso de la válvula estranguladora sencilla, el efecto de estrangulación se aplica en ambos sentidos. A continuación, se muestra la simbología de los 3 tipos más comunes de válvula de regulación por estrangulación.

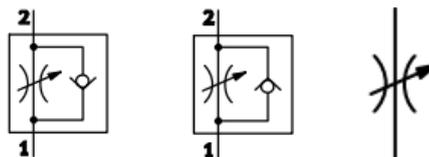


Figura 4. símbolo neumático de las válvulas de regulación más comunes. (Festo, 2018)

Un inconveniente notable en el uso de válvulas de estrangulación es que la cantidad de flujo de aire que permite pasar no es lineal con relación a la apertura de la válvula, por lo que es necesario hacer una identificación, en la siguiente figura se muestra la relación entre en número de vueltas de apertura de la válvula y el flujo.

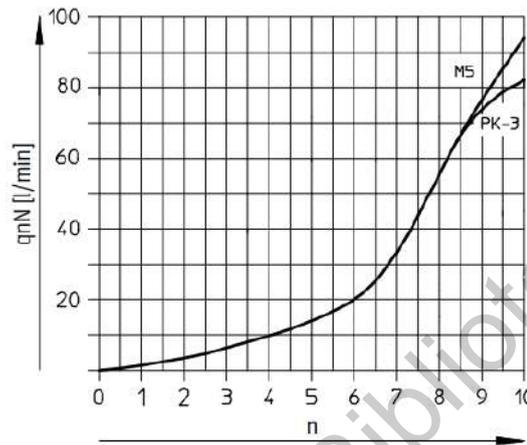


Figura 5. Ejemplo de relación Flujo-Apertura de una válvula de Regulación. (Festo, 2018)

2.2 Control de Posición de un motor DC

Aunque existen diversos tipos de sistemas de control desde la Antigüedad, la formalización del dominio de la Regulación comenzó con un análisis de la dinámica del regulador centrífugo, dirigida por el físico James Clerk Maxwell en 1868 bajo el título *On Governors*, sobre los reguladores. Aquí describió y analizó el fenómeno de la "caza", en el que retrasos en el sistema pueden provocar una compensación excesiva y un comportamiento inestable. Se generó un fuerte interés sobre el tema, durante el cual el compañero de clase de Maxwell, Edward John Routh, generalizó los resultados de Maxwell para los sistemas lineales en general. Este resultado se conoce con el nombre de Teorema de Routh-Hurwitz (Ogata, 2010).

Un controlador automático se basa en la comparación de la salida de un sistema con el valor deseado de salida, se calcula su diferencia, el cual es llamado comúnmente error y produce una señal con el fin de llevar ese error a cero o a un valor más pequeño. La forma en que un controlador automático produce la

señal de control recibe el nombre de acción de control (Ogata, 2010).

Cuando se trata de control, podemos hablar de que existen dos tipos de sistemas, por un lado, los sistemas de control en lazo abierto, y por el otro, los sistemas de control de lazo cerrado.

Un sistema de control en lazo abierto es donde la salida no afecta la acción de control. En otras palabras, en un sistema de lazo abierto no se mide la salida, ni se realimenta a la entrada. Por lo tanto, a cada entrada de referencia le corresponde una condición operativa fija, como resultado. Por lo tanto, la precisión del sistema depende de la calidad de su calibración. Sin embargo, ante la presencia de perturbaciones, un sistema de control en lazo abierto no realiza la tarea deseada.

En cambio, un sistema de control en lazo cerrado es aquel en que la salida se encuentra realimentada a la entrada. Mediante esta retroalimentación se obtiene la señal de error (diferencia entre la respuesta obtenida a la salida y el valor esperado de salida), a fin de reducir el error y llevar la salida del sistema a un valor esperado. "El término Control en lazo cerrado siempre implica el uso de una acción de control realimentado para reducir el error del sistema" (Ogata, 2010).

Uno de los controladores más utilizados en nuestros tiempos, es el Controlador PID, que puede ser usado de diferentes maneras. Su nombre proviene de: Proporcional, Integral y Derivativo. Estas acciones pueden ser usadas en conjunto (PID), o por separado (P, I, PI o PD). El controlador PID es de lazo cerrado exclusivamente, por lo tanto, es necesaria una retroalimentación. A continuación, se muestran cada una de las funciones de un controlador PID, como el que se muestra en la Figura 6, así como cada una de sus acciones.

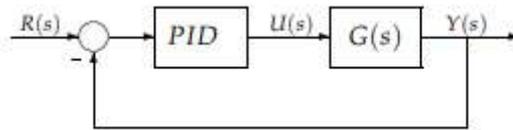


Figura 6. Diagrama a bloques de un lazo de control PID. (Ogata, 2010).

- **P: acción de control proporcional.** La salida es proporcional al error. Es decir: $u(t) = K_p e(t)$, que describe una función de transferencia que queda como se muestra en (1).

$$C_p(s) = K_p \quad (1)$$

Donde K_p es una ganancia proporcional ajustable. Un controlador proporcional puede controlar cualquier planta estable, pero posee un desempeño limitado y error en régimen permanente (off-set).

- **I: acción de control integral (2)**, proporciona una salida la cual es proporcional al error acumulado, lo que implica que es un modo de controlador lento.

$$u(t) = K_i \int_0^t e(\tau) d\tau \quad C_i(s) = \frac{K_i}{s} \quad (2)$$

La señal de control $u(t)$ tiene un valor diferente de cero cuando la señal de error es diferente de cero. Por lo que se concluye que, dada una referencia constante, o perturbaciones, el error en régimen permanente es cero.

- **PI: acción de control Proporcional-Integral**, se define mediante (3).

$$u(t) = K_p e(t) + \frac{K_p}{T_i} \int_0^t e(\tau) d\tau \quad (3)$$

Donde T_i se denomina como tiempo integral y es quien ajusta la acción integral. La función de transferencia resulta en (4).

$$C_{PI} = K_p \left(1 + \frac{1}{T_i s} \right) \quad (4)$$

Con un control proporcional, es necesario que exista error para tener una acción

de control distinta de cero. Con acción integral, un error pequeño positivo siempre nos dará una acción de control creciente, en el caso de error negativo la señal de control será decreciente. Este razonamiento sencillo nos muestra que el error en régimen permanente será siempre cero.

Muchos controladores industriales tienen acciones PI. Se puede demostrar que un control PI es adecuado para todos los procesos donde la dinámica es esencialmente de primer orden. Lo que puede demostrarse en forma sencilla, por ejemplo, mediante un ensayo de escalón unitario.

- **PD: acción de control Proporcional-Derivativa**, se define mediante (5).

$$u(t) = K_p e(t) + K_p T_d \frac{de(t)}{dt} \quad (5)$$

Donde T_d es una constante de tiempo denominada tiempo derivativo. Esta acción tiene carácter de previsión, lo que hace más rápida la acción de control, aunque tiene la desventaja importante que amplifica las señales de ruido y puede provocar saturación en el actuador. La acción de control derivativa nunca se utiliza por sí sola, debido a que solo es eficaz durante periodos transitorios. La función de transferencia de un controlador Pd se muestra en (6).

$$C_{PD} = K_p + sK_p T_d \quad (6)$$

Cuando una acción de control derivativa se agrega a un controlador proporcional, permite obtener un controlador de alta sensibilidad, es decir, que responde a la velocidad del cambio del error y produce una corrección significativa antes de que la magnitud del error se vuelva demasiado grande. Aunque el control derivativo no afecta de forma directa al error en estado estacionario, añade amortiguamiento al sistema y, por lo tanto, permite un valor más grande que la ganancia k , lo cual provoca una mejora en la precisión en estado estable.

- **PID: acción de control Proporcional-Integral-Derivativa**, esta acción combinada reúne las ventajas de cada una de las tres acciones de control individuales. La ecuación de un controlador con esta acción combinada se obtiene mediante (7).

$$u(t) = K_p e(t) + \frac{K_p}{T_i} \int_0^t e(\tau) d\tau + K_p T_d \frac{de(t)}{dt} \quad (7)$$

Y su función de transferencia resulta en (8).

$$C_{PID} = K_p \left(1 + \frac{1}{T_i s} + T_d s \right) \quad (8)$$

2.3 Microcontrolador DSPIC33FJ64MC802

El microcontrolador dsPIC33FJ64MC802 es uno de los microcontroladores más potentes de la familia dsPIC33, esta familia fue creada específicamente para el control de motores, ya sean de corriente directa (DC) o servomotores. Funcionan con un voltaje de entre 3.3 a 3.6v. La figura 7 muestra el sistema mínimo para trabajar con este microcontrolador.

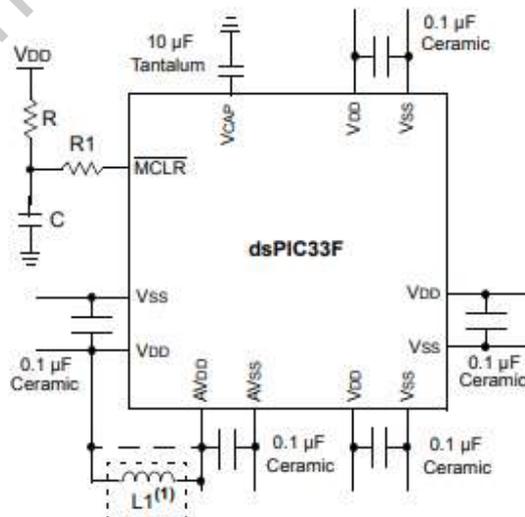


Figura 7. Circuito mínimo del dsPIC33FJ64MC802. (Microchip Technology Inc. 2011)

Este microcontrolador cuenta con módulos de 22 pines I/O, 8 de ellos tolerantes hasta 5 volts, 2 puertos UART para comunicación RS-232 y RS-485, comunicación CAN, I²C, SPI, 4 PWM con 8 salidas seleccionables, 2 ADC (uno de 10 bits y otro de 12bits) y 1 DAC.

A continuación, enumero los puntos clave para la selección de este microcontrolador:

- Cuenta con 2 módulos QEI.
- Terminales reconfigurables.
- Velocidad de procesamiento de hasta 150 MHz.
- PWM especializado para el control de motores.
- Capaz de comunicarse con 2 dispositivos casi al mismo tiempo.
- Costo accesible.
- Tamaño reducido (28 pines).

2.3.1 Modulo QEI (Quadrature Encoder Interface)

El módulo de interfaz de encoder de cuadratura fue la principal causa por la cual se usa un dsPIC de la familia 33, ya que este módulo es capaz de realizar el conteo de pulsos de un encoder de cuadratura, además de determinar el sentido de giro, y las cuentas máximas disponibles.

Este módulo es de gran ayuda en lo que respecta a un control de posición por PID, porque por una parte te ahorra código, y circuitería, además de ser más preciso en el conteo de los pulsos del encoder.

A continuación, en la figura 8 se muestra parte del código usado para la configuración de un QEI en el software MPLAB.

2.3.2 Modulo PWM (Pulse Wave Modulation)

El uso de un módulo de PWM es vital para el control de motores, controla la velocidad de giro de los motores de corriente directa, el microcontrolador usado tiene capacidad una capacidad de 16 PWM con 4 canales de hasta 32bits de resolución, lo cual es más que suficiente para los fines para los que lo necesitamos.

Mediante la modulación de pulsos de voltaje genera un voltaje medio entre los 0v y el voltaje máximo (en nuestro caso 6 v), este voltaje medio puede aumentar o disminuir dependiendo del Duty Cycle que va de 0% para 0v hasta el 100% que serían el voltaje máximo.

```
void Encoder() {
    POS1CNT = 0;
    QEICONbits.QEIM = 0b100; // resolución 4x, modo de Reset por MAXCNT
    QEICONbits.QEISIDL = 0; // continuar en modo idle (0)
    QEICONbits.SWPAB = 1; // Phase-A y Phase-B intercambiados
    QEICONbits.PCDOUT = 1; // activado el pin de Position Counter Status
    QEICONbits.TQGATE = 0; // Timer gate apagado
    QEICONbits.TQCKPS = 0; // Prescaler 1:1
    QEICONbits.POSRES = 0; // Un pulso en INDEX no hace un reset
    QEICONbits.TQCS = 0; // Usamos clock interno para el timer
    QEICONbits.UPDN_SRC=1; // Phase-B indica dirección
    MAX1CNT=1600;
    POS1CNT = 0;
    DFLTCON = 0x00F0;

    POS2CNT=0;
}
```

Figura 8. Código de configuración de un QEI.

El controlador PID determina el Duty Cycle de acuerdo con la sintonización hecha, para llegar a la posición deseada variando la velocidad de giro. A continuación, en la figura 9 se muestra la parte de código que respecta a la configuración del PWM usado.

```

void PWM(){
  TRISBbits.TRISB15 = 0; // Ponemos los puertos del PWM1 Como salida
  TRISBbits.TRISB14 = 0; //
  PORTBbits.RB15 = 0; // Ponemos la salida del pwm en cero.
  PORTBbits.RB14 = 0;

  PTCONbits.PTOPS = 1; // PWM timer post-scale
  PTCONbits.PTCKPS = 0; // PWM timer pre-scale
  PTCONbits.PTMOD = 2; // PWM operates in Up-down Mode continuously

  PTMR = 0; // PWM counter value, start at 0

  PTPER = 999; // PWM Timebase period

  PWMCON1bits.PMOD1 = 1; // PWM in complimentary mode
  PWMCON1bits.PEN1H = 1; // PWM High pin is enabled
  PWMCON1bits.PEN1L = 1; // PWM Low pin enabled (direction control later?)
  DTCON1bits.DTAPS = 0; //DeadTime pre-scaler
  DTCON1bits.DTA = 59;

  PTCONbits.PTEN = 1; // Enable PWM Timerbase!
}

```

Figura 5. Código de configuración de bloque de PWM.

Metodología

A continuación, en la figura 10 se muestra el diagrama de flujo de la metodología usada para la realización del proyecto.

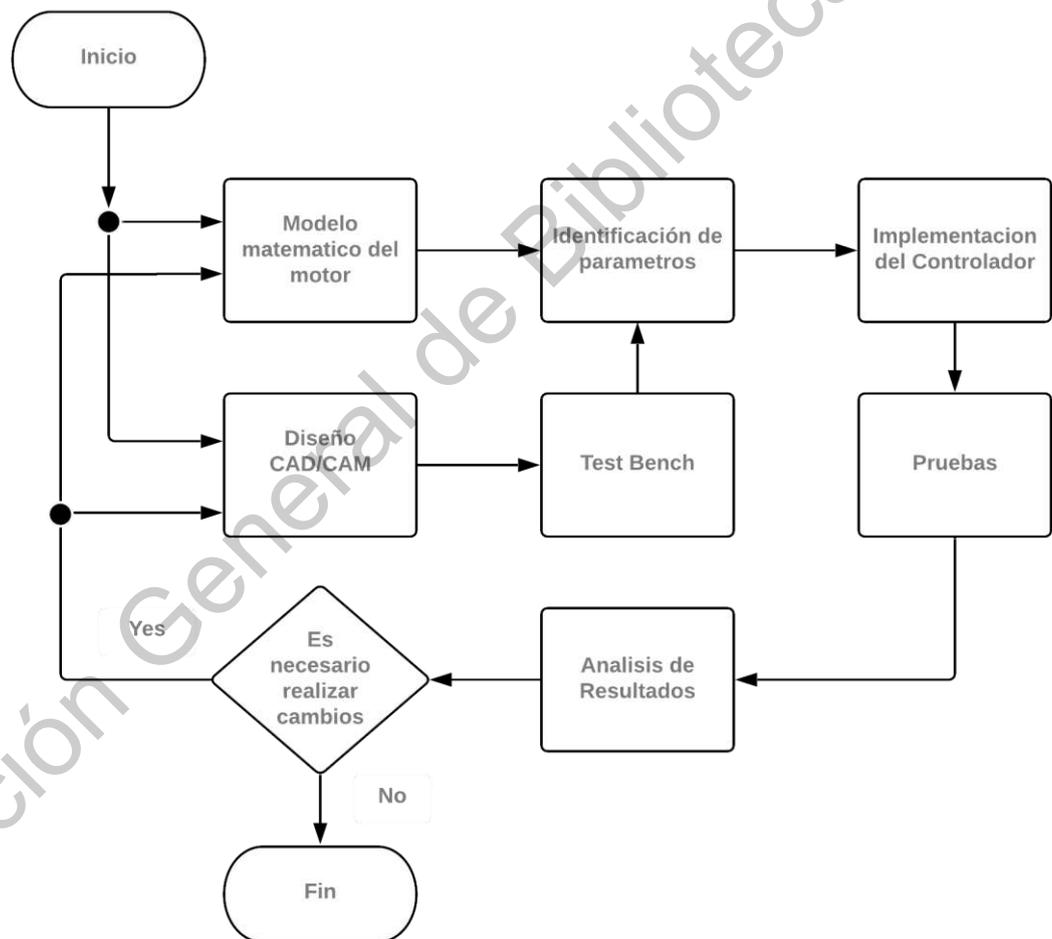


Figura 10. Metodología usada para la realización del proyecto.

Enseguida, se explica cada uno de los bloques de la metodología en la Figura 10, en estos se explica cada una de las actividades realizadas en el proceso de

desarrollo.

3.1 Modelado matemático del motor

El modelo matemático del motor a utilizar, al ser un motor de corriente continua de imán permanente se muestra en (9).

$$\frac{k}{s(s+a)} \quad (9)$$

A continuación, se presenta la metodología para calcular los valores de k y a , mediante la respuesta en frecuencia siguiendo los pasos mostrados en el libro **Control Automático teoría de diseño, construcción de prototipos, modelado, identificación, y pruebas experimentales (Hernandez-Guzman.et.al.2013)**, por lo tanto, todas las referencias a ecuaciones y paginas descritas a continuación serán de este libro.

Comenzamos determinando el sobrepaso ($M_p\%$) aceptable para el sistema, así como el tiempo de subida (t_r), como se muestra en (10).

$$t_r = .3seg \quad M_p\% = 20 \quad (10)$$

Tomando la ecuación (10.9) de la página 533 del libro tenemos (11) y (12).

$$\zeta = \frac{\ln^2\left(\frac{M_p\%}{100}\right)}{\sqrt{\ln^2\left(\frac{M_p\%}{100}\right) + \pi^2}} \quad (11)$$

$$\zeta = \frac{\ln^2\left(\frac{20}{100}\right)}{\sqrt{\ln^2\left(\frac{20}{100}\right) + \pi^2}} = 0.4559 \quad (12)$$

Teniendo ζ tomamos la ecuación (10.10) de la página 533 del libro para calcular

w_d , se tiene (13).

$$w_d = \frac{1}{t_r} \left[\pi - \arctan \left(\frac{\sqrt{1-\zeta^2}}{\zeta} \right) \right] \quad (13)$$

Tomando el resultado de (12) y el tiempo de subida t_r de (10) se obtiene (14).

$$w_d = \frac{1}{0.3} \left[\pi - \arctan \left(\frac{\sqrt{1-(0.4559)^2}}{(0.4559)} \right) \right] = -199.1185 \quad (14)$$

Procedemos a calcular w_n usando la ecuación (10.11) del libro, pagina 533, y usando los valores de ζ y w_d obtenidas en (12) y (14), se obtiene (15).

$$w_n = \frac{w_d}{\sqrt{1-\zeta^2}} \quad (15)$$

Sustituyendo valores se obtiene (16).

$$w_n = \frac{-199.1185}{\sqrt{1-(0.4559)^2}} = -365.9593 \quad (16)$$

Asignamos un valor de $k_p = 20$, determinamos k y α usando la ecuación (10.6) de la página 533 del libro en (17).

$$w_n = \sqrt{K_p K} \quad (17)$$

Despejando k de (17) se obtiene (18).

$$k = \frac{w_n^2}{k_p} \quad (18)$$

Sustituyendo K_p y w_n en (18) se obtiene (19).

$$k = \frac{(-365.9593)^2}{20} = 6696.3136 \quad (19)$$

Usando la misma ecuación (10.6), calculamos α en (20).

$$\zeta = \frac{\alpha}{2\sqrt{k_p k}} \quad (20)$$

Despejando α de (20) se obtiene (21).

$$\alpha = 2\zeta\sqrt{k_p k} \quad (21)$$

Sustituyendo K_p , k y ζ en (21) tenemos (22).

$$\alpha = 2(0.4559)\sqrt{(20)(6696.3136)} = 333.6817 \quad (22)$$

Por lo tanto, habiendo obtenido los valores de α y k procedemos a armar la representación matemática del motor, la cual se muestra en (23).

$$\frac{6696.3136}{s(s+333.6817)} \quad (23)$$

3.2. Diseño CAD/CAM

En esta sección, se muestra el diseño mecánico para el acoplamiento entre un motor de corriente directa con encoder, y una válvula reguladora de flujo. Esto con la finalidad de controlar el flujo de aire hacia actuadores neumáticos.

También se incluye el diseño del circuito impreso para la electrónica involucrada en el control.

3.2.1. Diseño de soporte

Dada la naturaleza del proyecto es necesario el diseño de un soporte en el cual se acoplen el motor de corriente continua y la válvula de estrangulación. Es necesario que el acoplamiento sea completamente recto, debido a que el centro de la flecha del motor tiene que estar perfectamente alineado al centro de la perilla de la válvula de estrangulación.

Es por eso que se optó por hacer el acoplamiento sobre un mismo soporte, esto ayuda a que el acoplamiento no dependa de la superficie sobre la que va a ser colocado el sistema.

Por lo tanto, es necesario conocer las dimensiones exactas del motor y de la válvula de estrangulación, en las Figuras 11 y 12 muestra todas las dimensiones necesarias para el diseño de todas las piezas necesarias.

Habiendo recabado la información, se procede a hacer el diseño de las piezas en SolidWorks. En las Figuras 13, 14, 15, 16 y 17 se muestra cada una de las piezas diseñadas con las medidas obtenidas de las Figuras 11 y 12.

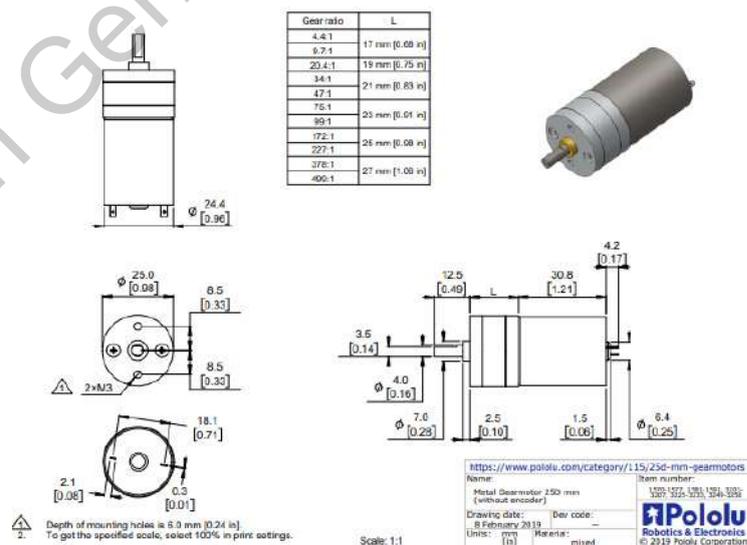
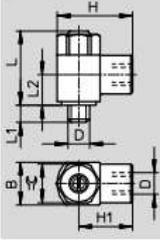


Figura11. Tabla de dimensiones de motor pololu usado (Pololu, et. al. 2019)



Tipo	Conexión	Diámetro nominal [mm]	B	H	H1	L máx.	L1	L2	∅c
GRLO	M3	0,8	5 ^{-0,3}	9	6,5	13,3	2,5 ^{-0,35/-0,3}	6,4	4,5

Figura 12. Tabla de dimensiones de válvula de estrangulación. (Festo, 2018)

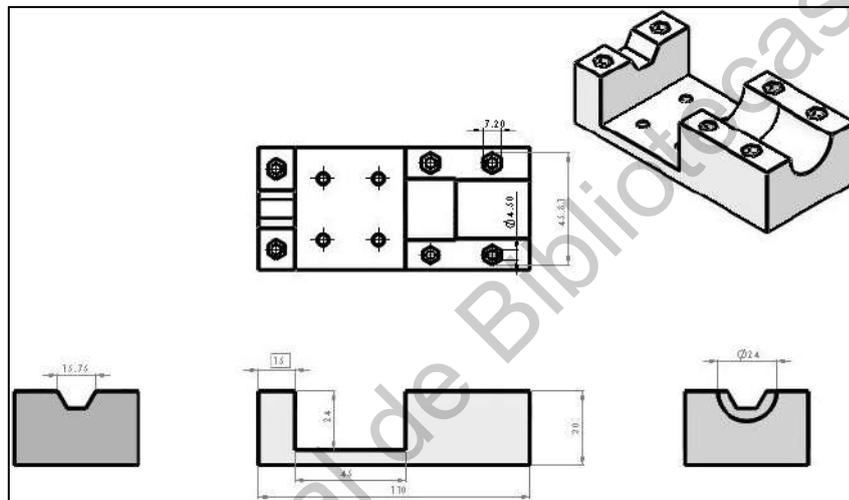


Figura 13. Soporte Principal.

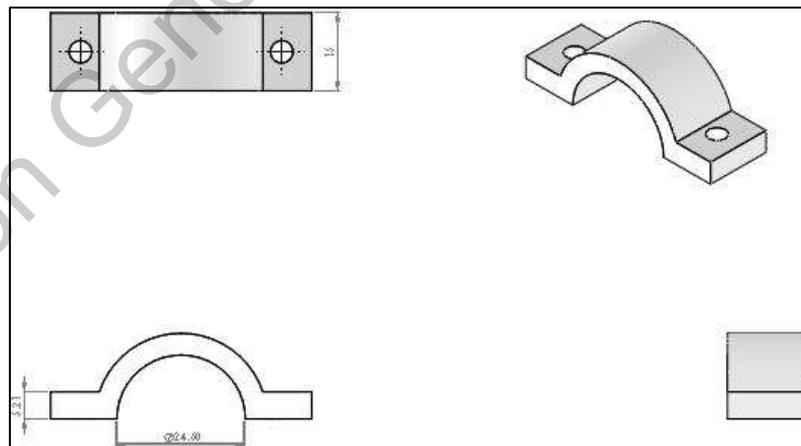


Figura 14. Opresor de Motor.

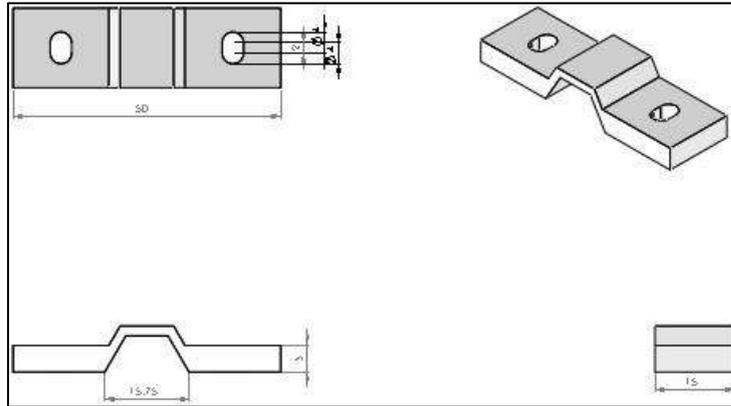


Figura 15. Opresor de Válvula.

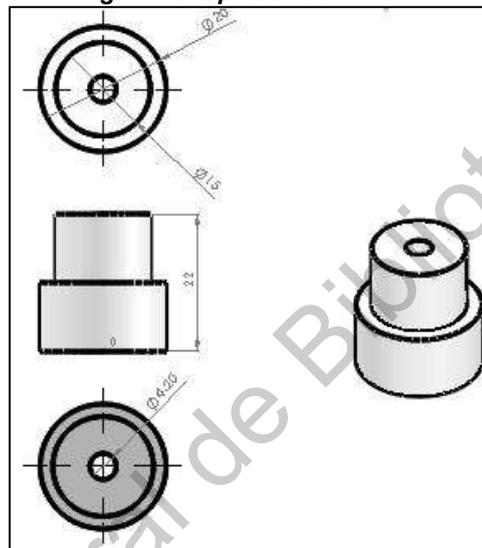


Figura 16. Cople entre motor y válvula.

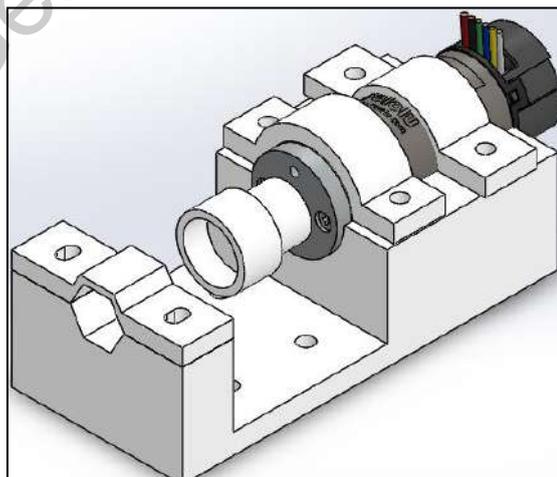


Figura 17. Ensemble.

3.2.2 Diseño de PCB

Dada la necesidad de un circuito eléctrico para llevar a cabo el control de posición del motor de CC, se decidió utilizar un microcontrolador.

La familia dsPIC33f está especialmente diseñada para el control del motor, mediante el uso del módulo de codificador de cuadratura integrado.

Con la ayuda de un puente H (L298N), la fase de potencia se realiza en el control de posición del motor, mediante el PWM proveniente del microcontrolador, la velocidad se regula a través de la variación de voltaje, además, es necesario tener dos señales digitales También desde el microcontrolador que controla la dirección de rotación del motor.

Al ser el primer prototipo de PCB, se eligió el uso de componentes a través del orificio, que es más barato y más fácil de soldar, así como la forma de comunicación, en esta primera fase se lleva a cabo utilizando UART RS-232. A continuación, en la figura 18 se muestra la vista inferior del pcb diseñado, en la figura 18 se muestra la vista inferior de la tarjeta, en la figura 19 se muestra la vista superior y en la figura 20 se presenta la vista 3D del PCB con componentes.

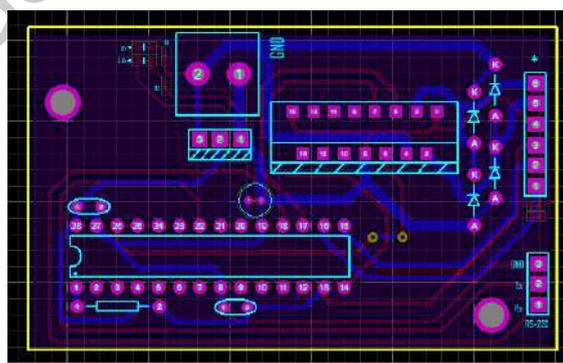


Figura 18. Vista inferior (Bottom) del PCB.

3.3. Banco de pruebas (Test Bench)

Al tener validado el diseño mediante el ensamble de las piezas en el programa de CAD/CAM, procedemos a la impresión 3D de las piezas, dicha impresión se realizó en una impresora marca Anet modelo A6.

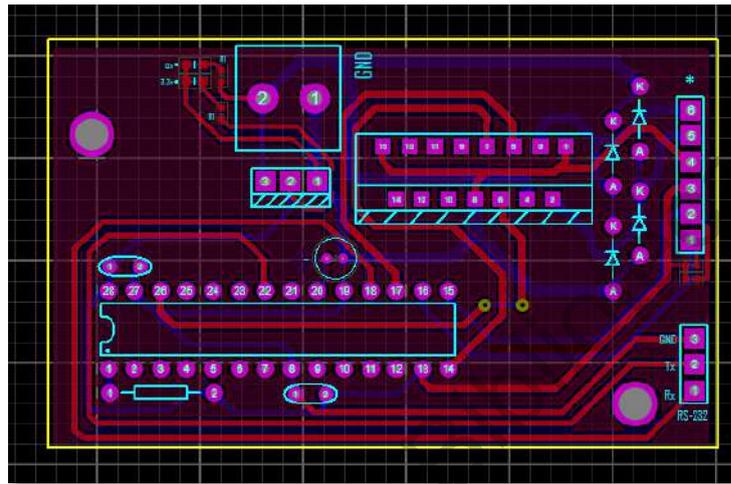


Figura 19. Vista superior (TOP) del PCB.

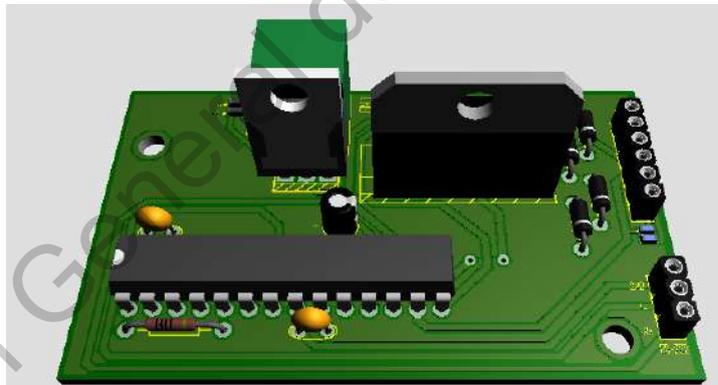


Figura 20. Vista 3D del PCB.

En total se imprimieron 6 piezas en PLA blanco, el tiempo de impresión total de todas las piezas fue de aproximadamente 27 horas, consumiendo 350 gramos de material, la impresión de la base se realizó con una densidad de 60%, y de las piezas de fijación superior del motor y de la válvula, así como el cople entre el motor y la perilla de la válvula se imprimo con una densidad de 35%.

Teniendo las piezas impresas se procedió a maquinar 2 pequeños orificios necesarios para fijar la flecha del motor y la perilla de la válvula al cople, mediante tornillos M3 0.7x16.

Para fijar el motor y la válvula se utilizaron 6 tornillos M4 con su respectiva tuerca hexagonal.

3.4 Identificación de Parámetros.

La base de un controlador PID es la sintonización de sus parámetros, por lo tanto, es necesario encontrar los que se ajusten mejor al sistema.

Por lo tanto, nos basaremos, al igual que en el punto 3.1 en el libro **Control Automático teoría de diseño, construcción de prototipos, modelado, identificación, y pruebas experimentales (Hernandez-Guzman.et.al.2013)**, por lo tanto, todas las referencias a ecuaciones y paginas descritas a continuación serán de este libro.

Tomamos como base los valores obtenidos en el punto 3.1 los cuales se muestran en (24) a (27).

$$\alpha = 333.681 \quad (24)$$

$$k = 6696.3136 \quad (25)$$

$$w_n = -365.9593 \quad (26)$$

$$\zeta = 0.4559 \quad (27)$$

Basándonos en la ecuación (5.44) de la página 254 del **Control Automático teoría de diseño, construcción de prototipos, modelado, identificación, y pruebas experimentales (Hernandez-Guzman.et.al.2013)**, tenemos(28).

$$k_d = \frac{2\zeta w_n - a}{k} \quad (28)$$

Sustituyendo se obtiene (29).

$$k_d = \frac{2(0.4559)(-365.9593) - 333.681}{6696.3136} = 0.0996 \quad (29)$$

Habiendo obtenido el valor de la ganancia derivativa, procedemos a calcular la ganancia integral mediante las ecuaciones (5.42) y (5.44), usando (30) y (31).

$$\beta = \frac{w_n^2}{k_d k} \quad (30)$$

$$k_i = \alpha \beta k_d \quad (31)$$

Procedemos a sustituir valores en (30) y (31), obteniendo (32) y (33).

$$\beta = \frac{(-365.9593)^2}{(0.0996)(6696.3136)} = 200.8031 \quad (32)$$

$$k_i = (333.681)(200.8031)(0.0996) = 6673.6162 \quad (33)$$

Obtenemos los siguientes parámetros del controlador:

$$k_p = 20$$

$$k_i = 6673.6162$$

$$k_d = 0.0996$$

3.5 Implementación del controlador.

En la figura 21 se muestra el diagrama de flujo de las operaciones que se realizan dentro del dsPIC comenzando con una interrupción de entrada generada por el recibimiento de una nueva posición, esto a su vez seteada la nueva posición

como posición deseada y pone a trabajar al controlador PID.

El controlador PID se encuentra retroalimentado mediante el encoder de cuadratura que se encuentra incorporado en la flecha del motor, el cual tiene una resolución de 48 pulsos por revolución (ppr), esto, multiplicado por la relación de la caja de engranes (34:1) obtenemos 1632 ppr lo cual nos da una precisión de $.22^\circ$.

Mientras no se reciba una posición nueva el controlador se quedará en la última posición asignada, ajustando esa posición en el caso de que exista alguna perturbación externa de la posición.

3.5 Pruebas

Previo a la culminación del proyecto se realizaron pruebas tanto mecánicas como programación con el fin de identificar posibles fallos del sistema, así como de diseño, buscando optimizar aún más el consumo de energía, las dimensiones y la velocidad de respuesta.

Se realizaron 30 pruebas para la validación de el control de posición PID, de los datos obtenidos se sacó la media, en la figura 22 se muestra en la grafica superior, el comportamiento de la posición en color naranja, y en la línea azul la posición deseada; en la grafica inferior de la figura 22, se muestra el error para cada escalón que se seteaba.

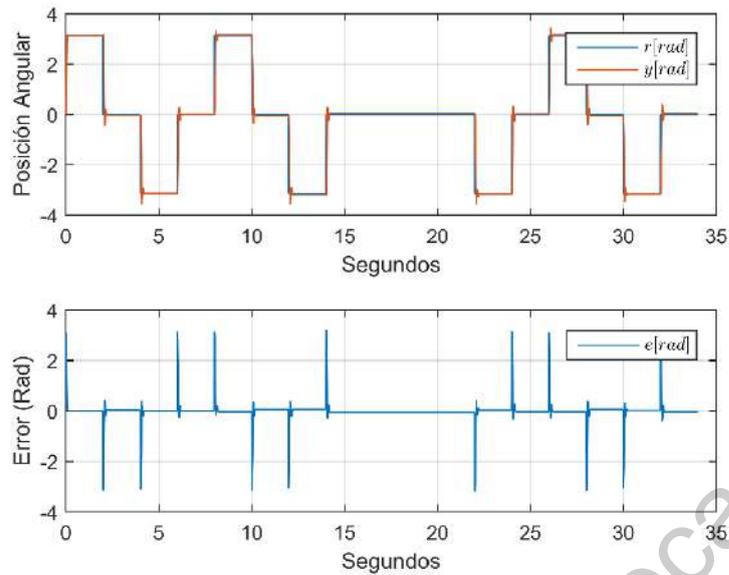


Figura 22. Respuesta del sistema.

3.6 Análisis de resultados.

Con base en los resultados obtenidos en la fase de pruebas se determinó si era necesario realizar algún tipo de cambio o corrección de diseño los cuales fueron:

- Corrección de diseño en los agujeros para los tornillos de sujeción.
- Corrección de 25 unidades en la sintonización del controlador PID en el parámetro integral.

CAPÍTULO 4. Resultados y Conclusiones

Resultados y conclusiones

4.1 Resultados

A lo largo de este tema de tesis se desarrolló un sistema capaz de posicionar una válvula neumática de perilla giratoria a través de un motor de corriente directa con la ayuda de un controlador PID de posición con una retroalimentación por encoder de cuadratura.

Se estudio las propiedades de la válvula neumática para con esto junto con las necesidades de los actuadores neumáticos en general de acuerdo a la velocidad necesaria de control para que este sea un sistema estable se determinó el uso de un microcontrolador, esto lo hace una herramienta útil para el control de flujo no solo de motores neumáticos, sino que es posible su aplicación en cilindros también.

La manera de evaluar la efectividad del proyecto consistió en determinar si se cumplieron los objetivos y especificaciones planteadas al inicio, así como las necesidades mínimas de los actuadores que va a controlar el sistema desarrollado

En cuanto a tiempo de respuesta se refiere. Lo anterior dio como resultado que la herramienta desarrollada posee las capacidades necesarias en cuanto a las siguientes funciones:

- Capacidad de comunicarse con prácticamente cualquier dispositivo ya sea esclavo o maestro.
- Al ser programado en MPLAB es fácil ajustar el código de acuerdo a necesidades específicas.

- Se cumplió con el requerimiento de una respuesta rápida ya que da una vuelta de 360° en 300 milisegundos con solo 8% de sobrepaso.
- Tamaño reducido.

En la figura 23 se aprecia la respuesta obtenida del sistema desarrollado, donde la ordenada es la posición angular en radianes y la abscisa es el tiempo denotado en segundos, obteniendo una respuesta de 0.3 segundos con un sobrepaso del 8% del valor de referencia. En la figura 24, donde al ordenada es el voltaje en volts y la abscisa es el tiempo en segundos, se presenta el comportamiento del voltaje de la respuesta de la figura 23, se aprecia que no llega al máximo de 12v por la restricción puesta en el programa del microcontrolador.

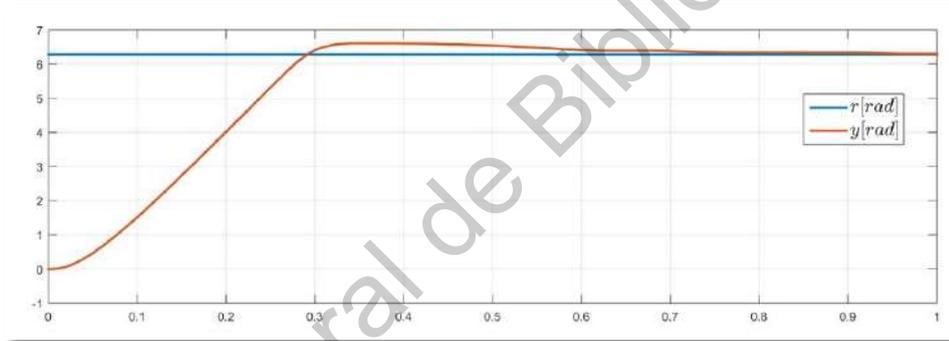


Figura 23. Respuesta de Control

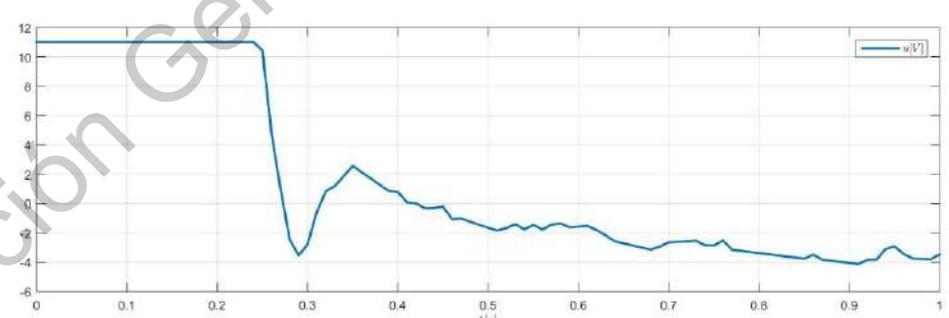


Figura 24. Respuesta de Voltaje

Gracias a las características del microcontrolador usado es posible controlar dos actuadores simultáneamente, lo cual abre la oportunidad para trabajos futuros y mejoras a este sistema.

4.2 Conclusiones

Como conclusión, el presente proyecto, ha sido, para el autor, el proyecto más importante hasta el momento, le dio la oportunidad de juntar varias ramas de la automatización aprendidas durante los 5 años de carrera con el fin de crear el dispositivo que se presenta. Cumpliendo con las metas y requisitos establecidos. Se espera que esta tesis sirva como punto de partida para futuros proyectos y el dispositivo que aquí se presenta sirva para bien en el desarrollo de nuevas tecnologías por parte de la universidad.

Dados los resultados obtenidos, comparados con los objetivos planteados al inicio, se determina que estos se cumplieron satisfactoriamente, era necesario un sistema de posicionamiento lo suficientemente rápido para tener un sistema estable, con el tiempo de respuesta obtenido de .3 segundos se determina que es suficiente para cumplir este objetivo, esto ayudado por un controlador PID.

La estructura diseñada para el acoplamiento ente motor y válvula cumple con el objetivo de ser posible su impresión en 3D, a demás de tener un tamaño reducido.

Por los resultados obtenidos se puede decir que el uso del sistema es viable para su uso en actuadores neumáticos tanto rotativos, donde la regulación de flujo ayuda a controlar la velocidad de rotación del actuador, como de su posición, así como también se puede aplicar en actuadores de vástago, en aplicaciones donde es necesario variar la velocidad de extensión y retracción del vástago durante su carrera.

El sistema obtenido cuenta con una gran área de oportunidad para trabajo a futuro, como lo es la adición de otro motor y válvula controlados por el mismo microcontrolador ya usado.

- Jamian, S., Salim, S. N. S., Kamarudin, M. N., Zainon, M., Mohamad, M. S., Abdullah, L., & Hanafiah, M. A. M. (2020). Review on controller design in pneumatic actuator drive system. *Telkomnika*, 18(1), 332-342.
- Bora, T. A., Rajput, K. S., Vikhe, S. J., Shaikh, I. M., & Shinde, S. B. (2019). A Review on Pneumatic Operated Train Door System.
- Brooks, N. P. (2019). U.S. Patent Application No. 15/635,514.
- Delgado, J. A. P., Arreguín, J. M. R., Soto, G. I. P., & Hurtado, E. G. (2018). Diseño, modelo cinemático y simulación de un robot neumático de 4 dof (design, kinematic model and simulation of a 4 dof pneumatic robot). *Pistas Educativas*, 40(130).
- Fan, C., Hong, G. S., Zhao, J., Zhang, L., Zhao, J., & Sun, L. (2019). The integral sliding mode control of a pneumatic force servo for the polishing process. *Precision Engineering*, 55, 154-170.
- He, X., Le Provost, M., An, X., & Williams, D. R. (2019). Unsteady Roll Moment Control Using Active Flow Control on a Delta Wing. In *Active Flow and Combustion Control 2018* (pp. 19-32). Springer, Cham.
- Huang, H., Lin, J., Wu, L., Fang, B., & Sun, F. (2019). Optimal control scheme for pneumatic soft actuator under comparison of proportional and PWM-solenoid valves. *Photonic Network Communications*, 1-11.
- Li, Y., Feng, L., & Wang, Y. (2019). A cascade control approach to active suspension using pneumatic actuators. *Asian Journal of Control*.
- Ramos-Arreguin, J. M., Pedraza-Ortega, J. C., Gorrostieta-Hurtado, E., de Jesus Romero-Troncoso, R., Vargas-Soto, J. E., & Hernandez-Hernandez, F. (2008). Pneumatic Fuzzy Controller Simulation vs Practical Results for Flexible Manipulator. In *Automation and Robotics*. IntechOpen.
- Ramos-Arreguin, J. M., Ortega, J. C. P., Gorrostieta, E., & de Jesus Romero-Troncoso, R. (2008, October). Artificial intelligence applied into pneumatic flexible manipulator. In *2008 Seventh Mexican International Conference on Artificial Intelligence* (pp. 339-345). IEEE.
- Saba, D. B., Massioni, P., Bideaux, E., & Brun, X. (2019). Flatness-Based Control of a Two Degrees-of-Freedom Platform With Pneumatic Artificial Muscles. *Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control*, 141(2),

021003.

Spindler, M. P., & Tsiberidis, K. (2019). U.S. Patent Application No. 16/068,002.

Wu, Y., Xu, J., Wang, Y., Ge, Z., & Lu, Y. (2019). Fuzzy sliding mode control of 3-dof shoulder joint driven by pneumatic muscle actuators. Kai Liu. *International Journal of Robotics and Automation*, 34(1).

Zhao, L., Liu, X., & Wang, T. (2019). Trajectory tracking control for double-joint manipulator systems driven by pneumatic artificial muscles based on a nonlinear extended state observer. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 122, 307-320.

Das, K. R., Das, D., & Das, J. (2015, October). Optimal tuning of PID controller using GWO algorithm for speed control in DC motor. In *2015 International Conference on Soft Computing Techniques and Implementations (ICSCTI)* (pp. 108-112). IEEE.

J. V. Wallbank, S. Singh and S. Walters.(2017). An introduction to the implementation of digital control — Leading to the control of electrical power systems, *52nd International Universities Power Engineering Conference (UPEC)*, Heraklion, 2017, pp. 1-5.

Situm, Z., Pavkovic, D., & Novakovic, B. (2004). Servo pneumatic position control using fuzzy PID gain scheduling. *J. Dyn. Sys., Meas., Control*, 126(2), 376-387.

Buenache Vega, A. J. (2010). *Tecnología neumática: teoría, diseño y simulación de componentes y circuitos para la docencia interactiva vía web* (Master's thesis).

Hernandez-Guzman, V. M., Silva-Ortigoza, R., & Carrillo-Serrano, R. V. (2013). *Control Automatico: Teoria de Diseno. Construccion de Prototipos, Modelado, Identificacion y Pruebas Experimentales*, Coleccion CIDETEC-IPN, Mexico City, Mexico.

Festo Pneumatic. (2018). Válvulas de estrangulación. Abril de 2020, de Festo Sitio web: https://www.festo.com/cat/en-gb_gb/data/doc_ES/PDF/ES/GRLO-VFFS_ES.PDF

Pololu. (2019). Metal Gearmotor 25D mm with 48 CPR Encoder. Abril de 2020, de Pololu Sitio web: <https://www.pololu.com/file/0J1634/25d-metal-gearmotor-dimension-diagram.pdf>

Microchip Technology Inc. (2011). dsPIC33FJ64MCX02/X04. Abril de 2020, de

Microchip

Sitio

web:

<http://ww1.microchip.com/downloads/en/devicedoc/70291f.pdf>

Dirección General de Bibliotecas UAQ