



BENEMÉRITA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA
DE PUEBLA



FACULTAD DE CIENCIAS
DE LA ELECTRÓNICA

MÁQUINA DE TOMA DE MUESTRAS
EN EL ORDEN DE LOS MICROLITROS

TESIS

PARA OBTENER EL TÍTULO DE INGENIERÍA EN
MECATRÓNICA

PRESENTA

NELSON EDGARDO ARIAS MÉNDEZ

ASESORES

DR. SEVERINO MUÑOZ AGUIRRE
DR. EMILIO MIGUEL SOTO GARCÍA
M.C. NICOLAS QUIROZ HERNÁNDEZ

Agradecimientos

A Dios por permitirme la vida y haberme permitido realizar esta tesis la cual me ha ayudado a ser una mejor persona en el ámbito académico y posteriormente laboral.

A mis padres por haberme brindado su apoyo en las buenas y en las malas y haberme hecho alguien productivo para esta sociedad con sus enseñanzas y sabiduría.

A mis hermanas por haberme apoyado en toda mi carrera y ser alguien en quien confiar.

Y a todos mis amigos que me han apoyado.

1. Índice

1 Estudio del problema	6
1.1 Introducción a los sistemas de toma de muestra.	7
1.2 Estado del arte: Tipos de sistemas de toma de muestras automáticos.....	7
1.3 Cromatografía y sistemas de toma de muestras	9
1.4 Planteamiento del problema	10
1.5 Recursos	11
1.6 Justificación	12
1.7 Alcances y limitaciones	12
1.8 Objetivos	12
2 Motores y actuadores	14
2.1 Motor de escobillas de CD.	15
2.1.1 Modelo matemático de motor de escobillas	16
2.1.2 Diagrama a bloques y gráfica de comportamiento	17
2.2 Motores a pasos y sus características	21
2.2.1 Tipos de motores a pasos.....	22
2.2.2 Control del motor a pasos.....	25
2.3 Actuadores Lineales	25
2.3.1 Actuadores lineales eléctricos.....	26
3 Diseño del sistema	28
3.1 Diseño del prototipo número uno	29
3.2 Diseño del prototipo numero dos	29
3.3 Diseño del prototipo número tres	30
3.4 Diseño de las etapas de potencia.....	35
3.4.1 Diseño de la etapa de potencia del motor de escobillas	35
3.4.2 Etapa de potencia del motor a pasos y del motor correspondiente al actuador lineal con el puente H L298.....	37

3.5	Diseño de la etapa de control mediante el uso de microcontroladores.....	39
3.5.1	Diagrama de bloques del sistema	40
3.5.2	Control del motor de escobillas mediante el dsPIC30F4011	41
3.6	Sensores del sistema	46
3.6.1	Sensor de distancia Sharp GP2Y0A41SK0F.....	46
3.6.2	Sensor de contacto.....	47
3.6.3	Fototransistor	48
3.6.4	Sensor de distancia E18.....	49
3.7	Diseño de la interfaz de usuario.....	49
3.7.1	Interfaz gráfica en Visual C#.....	49
3.7.2	Comunicación PIC-PC	50
4	Fabricación del prototipo.....	58
4.1	Fabricación	59
5	Resultados y conclusiones.	66
5.1	Resultados	67
5.2	Conclusiones y trabajos futuros.....	73
6	Referencias.....	76

Índice de Figuras

Figura 1.1 Jeringa Hamilton.....	8
Figura 1.2 a) Jerin	8
Figura 1.3 Diferentes modelos de máquinas de toma de muestra existentes de la marca Agilent en la primera fila y Varian en la segunda	9
Figura 2.1 Motor de DC	16
Figura 2.2 Descripción del modelo matemático de un motor DC.....	16
Figura 2.3 Diagrama a bloques de un motor de CD	17
Figura 2.4 Gráfica de la FT. del motor obtenida.....	18
Figura 2.5 Modelo en Simulink.....	19
Figura 2.6 Grafica de respuesta en velocidad	19
Figura 2.7 Gráfica de respuesta en torque.....	20
Figura 2.8 Gráfica de respuesta en corriente.....	20
Figura 2.9 Funcionamiento de un motor a pasos	21
Figura 2.10 Funcionamiento de un motor a pasos de reluctancia variable.....	22
Figura 2.11 Motor a pasos de imán permanente.....	23
Figura 2.12 Motor a pasos de reluctancia variable	23
Figura 2.13 Motor a pasos hibrido	24
Figura 2.14 Motor a pasos Nema 17	24
Figura 2.15 Secuencia de un motor a pasos bipolar	25
Figura 2.16 Actuador Hidráulico.....	25
Figura 2.17 Actuador neumático de simple efecto y retorno por muelle.....	25
Figura 2.18 Actuador lineal Xcorpion vista A	
Figura 2.19 Actuador Lineal Xcorpion vista B [14]	26
Figura 2.20 Composición interna de un actuador eléctrico lineal	26
Figura 3.1 Actuadores lineales de la marca SMC para la construcción del robot cartesiano	29
Figura 3.2 Vista frontal del prototipo número 2	
Figura 3.3 Vista aérea del prototipo.....	30
Figura 3.4 Husillo 6 mm. por hilo	31
Figura 3.5 Motor MCG.....	31
Figura 3.6 Mesa transportadora con guía hembra, baleros, guía con cola de Milano macho y tapas de sujeción	32
Figura 3.7 Sistema de toma de muestras.....	32
Figura 3.8 Sistema lineal de carga.....	33
Figura 3.9 Tapa de la base con barreno para la cámara de refrigeración, Indexadora y cámara térmica	34
Figura 3.10 Vista frontal y lateral de la maquina	34
Figura 3.11 MOSFET canal P saturado por un BJT.....	35
Figura 3.12 MOSFET canal N y P saturado con un opto acoplador	36
Figura 3.13 Puente H con MOSFET y etapa de protección con opto acopladores.....	36

Figura 3.14 Driver puente H L298-Motor a pasos.....	37
Figura 3.15 Tarjeta de desarrollo puente H L298.....	38
Figura 3.16 Puente H L298 para motor dc cortesía de circuitstoday.....	38
Figura 3.17 Diagrama a bloques del sistema	40
Figura 3.18 Control PD	41
Figura 3.19 Algoritmo de control PD.....	42
Figura 3.20 Algoritmo del PIC18F4550.....	44
Figura 3.21 Sensor Sharp GP2Y0A41SK0F	47
Figura 3.22 Curva de respuesta voltaje-distancia del sensor Sharp. Para mayor exactitud en los datos refiérase la hoja de datos del sensor [10]	47
Figura 3.23 Tipos de final de carrera.....	47
Figura 3.24 Tipos de final de carrera.....	48
Figura 3.25 Conexión del final de carrera	48
Figura 3.26 Fototransistor y led emisor de luz infrarroja.....	48
Figura 3.27 Fototransistor como interruptor óptico.....	48
Figura 3.28 Diagrama de conexión del sensor E18	49
Figura 3.29 Interfaz de usuario en estado inicial	50
Figura 3.30 Interfaz de usuario en estado de alerta	50
Figura 3.31 Diagrama de estados del sistema.....	52
Figura 3.32 Interfaz realizando la toma de muestras	53
Figura 3.33 Posición de casa del sistema de toma de muestras	53
Figura 3.34 Posición de casa de la indexadora(vista aerea).....	54
Figura 3.35 Indexadora en posición de toma de muestra	54
Figura 3.36 Sistema en posición de toma de muestras	55
Figura 3.37 Máquina durante la toma de muestras.....	55
Figura 3.38 Inyección de la muestra nótese que el embolo ha bajado	56
Figura 3.39 Posición de casa del sistema de toma de muestras durante la toma de muestra.....	56
Figura 3.40 Posición de inyección	56
Figura 4.1 Comparación modelo real y simulación	59
Figura 4.2 Implementación de los finales de los finales de carrera.....	60
Figura 4.3 Sistema lineal en conjunto con el actuador lineal.....	60
Figura 4.4 Engranajes módulo 1 hechos de naylamid con relación de 1:3.....	61
Figura 4.5 Parte frontal del sistema de toma de muestras.....	61
Figura 4.6 Sensor de distancia analógico implementado en el sistema de toma de muestras.	62
Figura 4.7 Acoplamiento de la señal mediante amplificadores operacionales.	63
Figura 4.8 Indexadora implementada en la tapa de la cámara térmica	63
Figura 4.9 Puente H del actuador y del motor a pasos	64
Figura 4.10 Tarjeta de desarrollo del PIC y del dsPIC.....	64
Figura 4.11 Puente H del Motor del husillo	65
Figura 4.12 Caja portadora de circuitos electrónicos	65
Figura 5.1 Estado inicial de la interfaz.....	67
Figura 5.2 Interfaz de usuario.	68

Figura 5.3 Interfaz realizando la toma de muestras	68
Figura 5.4 Respuesta del sensor durante la toma de muestras.....	69
Figura 5.5 Respuesta del sensor en la inyección.....	69
Figura 5.6 Vial en la báscula	71
Figura 5.7Medición de 1 μ l.....	72
Figura 5.8 Medición de 5 μ l.....	73

CAPÍTULO

1 Estudio del problema



1.1 Introducción a los sistemas de toma de muestra.

A lo largo del tiempo el ser humano ha buscado cuantificar todo lo que posee. Esto se hace debido a que se puede tener un mayor control en la medición. Es por ello que, en la medicina, en laboratorios químicos y laboratorios biológicos existen diversos instrumentos con graduación en cantidades volumétricas, ya sea en litros, mililitros o en nuestro caso microlitros. Esta práctica de obtener un líquido en diversas porciones ha ayudado en estas áreas, por ejemplo, en la medicina a encontrar curas para enfermedades como la viruela, la polio, el sarampión y en el caso del área química ha ayudado a crear compuestos que nos sirven en la vida cotidiana. Un claro ejemplo es el shampoo, la penicilina, los insecticidas, la píldora anticonceptiva, mencionando solo algunos.

Cuantificar las sustancias es de suma importancia debido a que, haciendo las combinaciones adecuadas, se pueden obtener compuestos que nos pueden ser de gran utilidad.

La toma de muestras en pequeñas cantidades es un tema del cual se trata a diario en la cromatografía de líquidos y gases. Esta práctica se dificulta por el tipo de líquido o gas del cual se esté tomando la muestra, ya que si es un líquido o gas volátil es posible que la muestra no sea tan exacta si dicha toma de muestra no se efectúa rápidamente.

A la fecha, ya existen sistemas automáticos para realizar la toma de muestras. Estos cuentan con husillos y motores de alta velocidad que toman muestras en estas cantidades, sin embargo, no hay ninguno que sea específico para realizar la caracterización de sensores que reaccionan a compuestos volátiles orgánicos. En el presente capítulo se realizará una revisión general de este tipo de sistemas.

1.2 Estado del arte: Tipos de sistemas de toma de muestras automáticos.

Actualmente existen diversos tipos de sistemas de toma de muestras automáticos en cantidades micrométricas. La marca más reconocida que fabrica jeringas para estos sistemas es la compañía *Hamilton Syringes*. Dichas jeringas fueron desarrolladas por *Clark Hamilton* en 1947 y con ello se habilitó el desarrollo de la cromatografía de gases. Antes de esto no había manera conveniente de inyectar microlitros (o incluso cantidades más pequeñas) de volúmenes de líquidos en un cromatógrafo de gases [1].

En la Figura 1.1 se visualiza una jeringa y sus características. Existen varios tipos de jeringas, las más destacadas son las compactas para cromatografía de gases de las series 1000, 1700, 1800 y súper jeringas como las mostradas en la Figura 1.2 (a-d), respectivamente.

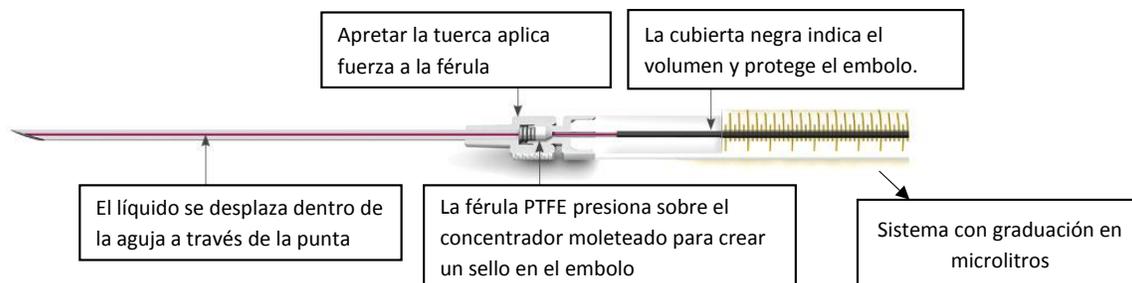


Figura 1.1 Jeringa Hamilton

Las jeringas herméticas de gas, son ideales para dispensar líquidos y gases. La punta del émbolo hecha de PTFE (Tipo de polímero especial para las jeringas) ajustada con precisión crea un sello a prueba de fugas. Con este ajuste apretado, la punta limpia esencialmente el interior de la jeringa. Esta característica es particularmente útil con muestras heterogéneas, reduciendo la posibilidad de que dicha muestra se cristalice o que se adhiera a la pared interior de vidrio provocando que el émbolo se atore.

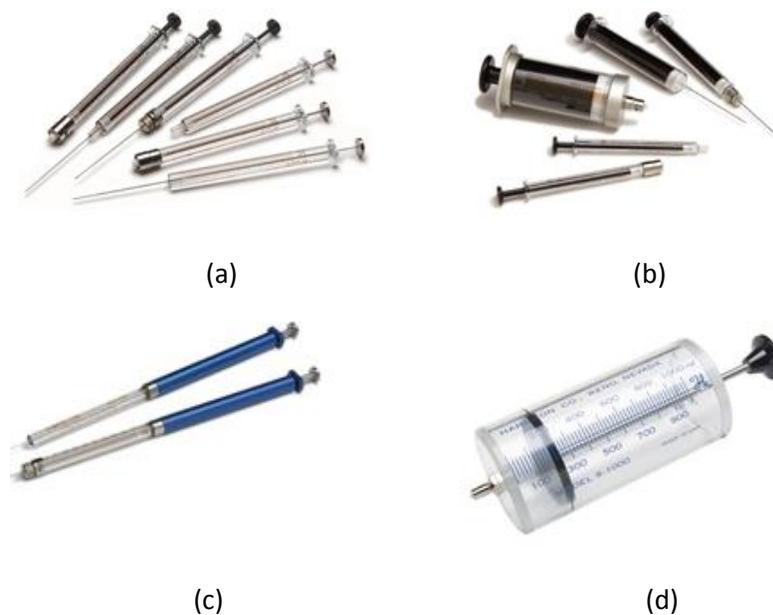


Figura 1.2 a) Jeringas compactas para gas serie, b) Jeringas compactas para gas serie 1000, c) Súper jeringas Hamilton d) Jeringas compactas para gas serie 1800

1.3 Cromatografía y sistemas de toma de muestras

La cromatografía es un método físico de separación, en el que los componentes que se han de separar se distribuyen en dos fases, una de las cuales está en reposo (fase estacionaria, F.E.) mientras que la otra (fase móvil, F.M.) se mueven en una dirección definida [2].

También es usada para medir la proporción de los componentes de una mezcla (finalidad analítica) en este caso, las cantidades de material empleadas suelen ser muy pequeñas.

El sistema se enfocará en esta última ya que el objetivo primordial no es separar los componentes, sino medir una cantidad de muestra [3].

Algunos sistemas que se dedican a automatizar este proceso son de la marca Agilent y Varian autosampler como se observa en la Figura 1.3.



Figura 1.3 Diferentes modelos de máquinas de toma de muestra existentes de la marca Agilent en la primera fila y Varian en la segunda

1.4 Planteamiento del problema

El área de caracterización de sensores del laboratorio de Electrónica y Optoelectrónica de la Facultad de Ciencias Físico Matemáticas de la Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, desea implementar un sistema para la toma de muestras de compuestos orgánicos volátiles (VOC, por sus siglas en inglés) en el orden de los microlitros. Estos serán inyectados en una cámara de medición para su uso en la caracterización de sensores que reaccionan este tipo de compuestos.

La máquina debe realizar la toma de muestras lentamente debido que se requiere de mucha precisión, de no ser así se generarían burbujas y con ello un error. Para la precisión de la toma de muestras, se utilizan jeringas graduadas de 10, 20 y 50 μl , respectivamente.

Otro aspecto importante es que la inyección de los VOC debe ser rápida, ya que el líquido puede subir por la aguja de la jeringa debido a su pequeña concentración de volumen y al fenómeno de capilaridad, obteniendo así un error indeseable en las muestras.

El sistema desarrollado en este trabajo emplea técnicas de dosificación utilizadas en las máquinas descritas anteriormente, y además es capaz de realizar inyecciones de compuestos orgánicos volátiles en su mayoría alcoholes, siendo estos los líquidos que van a ser puestos en interacción con cristales de cuarzo. Estos cristales están siendo caracterizados mediante pruebas dinámicas y estáticas y solo se usará la jeringa graduada de 25 μl para realizar estas pruebas.

Uno de los aspectos que también se desea es reducir el tiempo invertido en esta actividad realizándola de modo autónomo y haciéndola de fácil manejo para el operador.

Pruebas dinámicas

Este tipo de pruebas sirven para caracterizar sensores de forma dinámica. Aquí se aplica un escalón de gas mediante un flujo de aire, el cual contiene el compuesto orgánico. La respuesta del sensor se analiza y a partir de esto se obtiene un modelo aproximado del comportamiento transitorio del sensor.

Pruebas estáticas

Estas pruebas son las que serán automatizadas. En este caso se aplica una concentración constante al sensor y se mide su respuesta cuando el sistema alcanza el equilibrio bajo condiciones ambientales controladas de temperatura, humedad relativa, y presión barométrica.

En el caso de los sensores que se están desarrollando, se mantienen a una temperatura controlada mediante una cámara medición y un baño térmico. La cámara de medición es donde son inyectadas las muestras tomadas de los viales que contienen los componentes orgánicos, en este caso alcoholes. Una vez depositada la muestra se espera un tiempo para registrar el comportamiento del sensor, lo que otorga un valor constante en frecuencia ante la respuesta de interactuar con el componente orgánico y estabilizarse en cierto tiempo.

1.5 Recursos

Para realizar todo este proyecto se cuenta con los siguientes recursos:

a) Materiales

- Aluminio
- Naylamid
- Motor DC
- Sensor de distancia
- Interruptor óptico de distancia
- Finales de carrera
- Fuentes de alimentación
- Tarjetas de potencia
- Tarjeta de control con PIC y dsPIC
- Cables y/o alambre
- Dispositivos electrónicos diversos

b) Medios

- Laboratorio (osciloscopio, multímetro, cautín, etc.)
- Torno y fresa para maquinar.
- Computadora
- Software SolidWorks
- Software Visual Studio
- Software PIC C compiler.
- Software Matlab
- Recursos financieros

1.6 Justificación

La precisión humana para tomar muestras de forma manual en pequeñas cantidades es muy inexacta y poco precisa. Este sistema ayudará a tener cierta repetitividad en comparación a una persona la cual su precisión puede cambiar debido a sus condiciones físicas.

Es por ello que se investigará, diseñará, e implementará a lo largo de esta tesis, un sistema que realice este proceso de forma automática para un mayor índice de repetitividad en las muestras tomadas por el usuario.

1.7 Alcances y limitaciones

Este proyecto planea la construcción de una máquina que tome muestras únicamente de hasta 15 μl . Si se desea más se tendría que hacer una repetición para la cantidad extra, también se planea que este proyecto pueda ser útil posteriormente para laboratorios o en la industria.

1.8 Objetivos

Objetivo general

- Diseñar y construir un sistema mecatrónico de adquisición de muestras de componentes orgánicos en el orden de los microlitros.

Objetivos Específicos

- Analizar sistemas de toma de muestras en el mercado.
- Diseñar el sistema mediante (CAD).
- Diseñar los planos eléctricos y mecánicos.
- Construir la máquina de adquisición de muestras orgánicas.
- Implementar un controlador digital utilizando un microcontrolador.
- Implementar una interfaz de usuario en visual C#.
- Realizar pruebas del funcionamiento del sistema.

Teniendo los objetivos como punto de partida se procedió a comenzar la investigación de todos los componentes que conforman la máquina, como primer objetivo los electro-mecánicos porque estos son los que harán que el sistema pueda moverse.

CAPÍTULO

2 Motores y actuadores



Actualmente la mayoría de sistemas automáticos cuentan con motores de corriente alterna (CA) o de corriente directa (CD), (en esta tesis no se hablará de los motores CA debido a que no serán utilizados). En cuanto a los motores de CD existen diversos tipos, el más usual es el de escobillas, este tipo de motores no son fáciles de controlar debido a que requieren cierta teoría, ya que es necesario un lazo cerrado de control obtenido mediante sensores de posición y un controlador. De igual manera para que el usuario pueda controlarlos necesita tener un nivel medio avanzado de electrónica y un nivel avanzado de programación. Una característica particular es que otorgan altas velocidades y solo poseen dos terminales para su funcionamiento y la inversión de sentido de giro.

Existen también los motores a pasos, este tipo de motores a diferencia del motor de escobillas, fáciles de usar y son muy comúnmente usados en la industria. Basan su control en un lazo abierto (una señal de entrada da una posición deseada sin la necesidad de retroalimentación) son considerados como motores de CA controlados a partir de una red DC en el caso particular de los motores a pasos bipolares.

Otro tipo de motores que destacan en los motores de corriente continua son los brushless, que al igual que los motores a pasos son controlados mediante pulsos en lazo abierto, pero también en estos es posible un lazo cerrado. A diferencia de los motores a pasos es de tres fases y con una conexión en delta. Son considerados a veces de CA a partir de una red DC (como los motores a pasos) y es mayormente utilizado para ejercer altas velocidades, en el caso más común es utilizado para ejercer movilidad a las aspas de los drones.

2.1 Motor de escobillas de CD.

Para ejercer el giro del husillo del sistema de toma de muestras y controlar su posición, se tiene la necesidad de implementar un motor de corriente continua para que la inyección y la toma de muestra se realicen de forma óptima. Se seleccionó un motor de escobillas, debido a que posee los requerimientos de la máquina en cuanto a torque y velocidad.

Los motores de escobillas a menudo son operados con una fuente de CD convertida de una red de CA. Una característica estructural de estos motores es que tiene un colector de cobre y unas escobillas de metal o carbón. Un motor de corriente directa tal como se aprecia en la Figura 2.1, basa su funcionamiento en la fuerza producida en un conductor a causa de la presencia de un campo magnético sobre una intensidad de corriente eléctrica. El colector es básicamente un conmutador sincronizado con el rotor, que conmuta sus bobinas provocando que el ángulo relativo entre el campo del rotor y el del estator se mantenga al margen de si el rotor gira o no, permitiendo de esta forma que el par motor sea independiente de la velocidad de giro de la máquina [3].

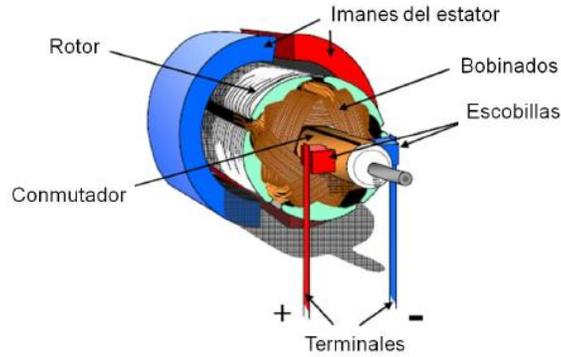


Figura 2.1 Motor de DC

2.1.1 Modelo matemático de motor de escobillas

Para examinar el comportamiento del motor se procede a obtener su modelo matemático por lo que es necesario saber cómo está compuesto internamente. Se debe conocer sus características eléctricas: su resistencia de armadura R_a y su bobina interna L_a , y sus características mecánicas: su fuerza contra electromotriz E_a , su momento de inercia J y su coeficiente de fricción viscosa B . En conjunto todos estos elementos permiten su funcionamiento como elemento electromecánico Figura 2.2.

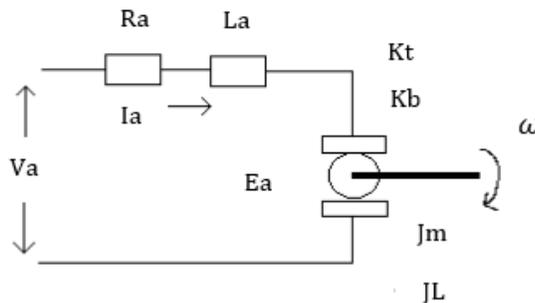


Figura 2.2 Descripción del modelo matemático de un motor DC

La parte eléctrica del modelo puede ser representada mediante la ley de voltajes de Kirchhoff y la parte mecánica con ecuaciones de torque, mediante la ley de Newton donde la suma de las fuerzas es igual a cero.

$$V_a = V_{La} + V_{Ra} + E_a \quad \text{Ec.1.1}$$

$$V_a = L_a \frac{dI_a}{dt} + I_a R_a + E_a \quad \text{Ec.1.2}$$

En cuanto a la parte mecánica se tiene:

$$T_{mec} = T_{acel} + T_{perd} + T_l \quad \text{Ec. 1.3}$$

$$T_{mec} = J \frac{d\omega}{dt} + B\omega + T_l \quad \text{Ec. 1.4}$$

Donde el elemento T_l presenta la siguiente igualdad:

$$E_a = T_l \quad \text{Ec. 1.5}$$

A su vez ambos elemento E_a y T_l satisfacen la ecuación 1.6:

$$K_b i_a = K_m \omega \quad \text{Ec. 1.6}$$

2.1.2 Diagrama a bloques y gráfica de comportamiento

El diagrama a bloques mostrado en la Figura 2.3 describe el comportamiento del motor incluyendo todos los parámetros descritos con anterioridad. Se aplica un voltaje E_a constante en la entrada y se obtiene una salida en velocidad $\omega(s)$.

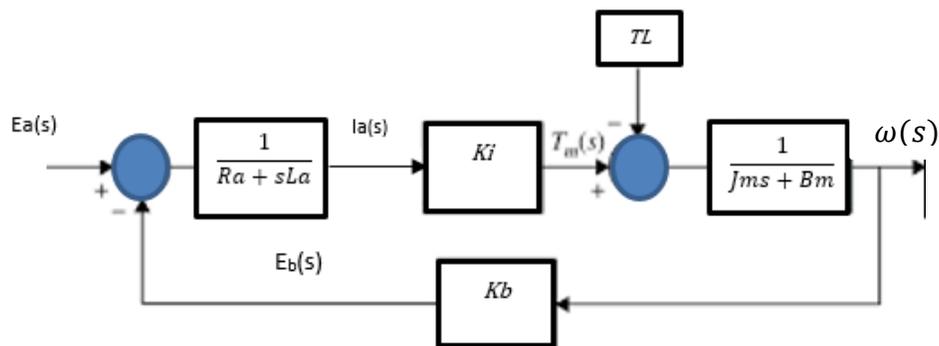


Figura 2.3 Diagrama a bloques de un motor de CD

En el caso particular del motor que será implementado sus parámetros son:

$$R_a = 2.4080$$

$$L_a = 0.0364$$

$$J_m = 0.00003742$$

$$B_m = 0.000041253$$

$$K_b = K_m = 0.04325$$

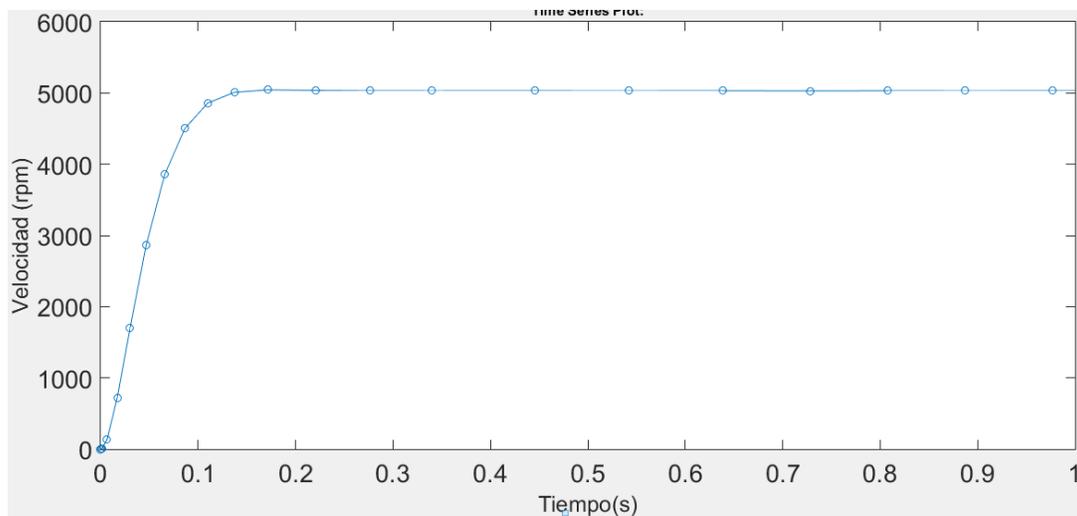


Figura 2.4 Gráfica de la FT. del motor obtenida

Para obtener todos estos parámetros se realizaron pruebas físicas con el motor que no serán descritas debido a su complejidad, y solo se usarán para saber su comportamiento y obtener el torque óptimo. Su grafica de respuesta en velocidad trabajando a un voltaje nominal de 24 V se muestra en la Figura 2.4 teniendo una velocidad final de 5100 rpm, a un voltaje constante de 24 V siendo estos parámetros los necesarios para la máquina.

Para obtener la frecuencia del voltaje que será ingresado al motor para el control, se realiza un barrido de frecuencia en el modelo simulado en Simulink (Figura 2.5) y se obtiene la frecuencia optima a la cual trabajará el PWM que controlará el torque del motor. Esta es la primera frecuencia de un barrido de frecuencias de menor a mayor que se aproxima en las componentes de torque corriente y velocidad del motor al ingresarle la mitad del voltaje nominal (12 V), la respuesta de esta frecuencia otorga las siguientes gráficas.

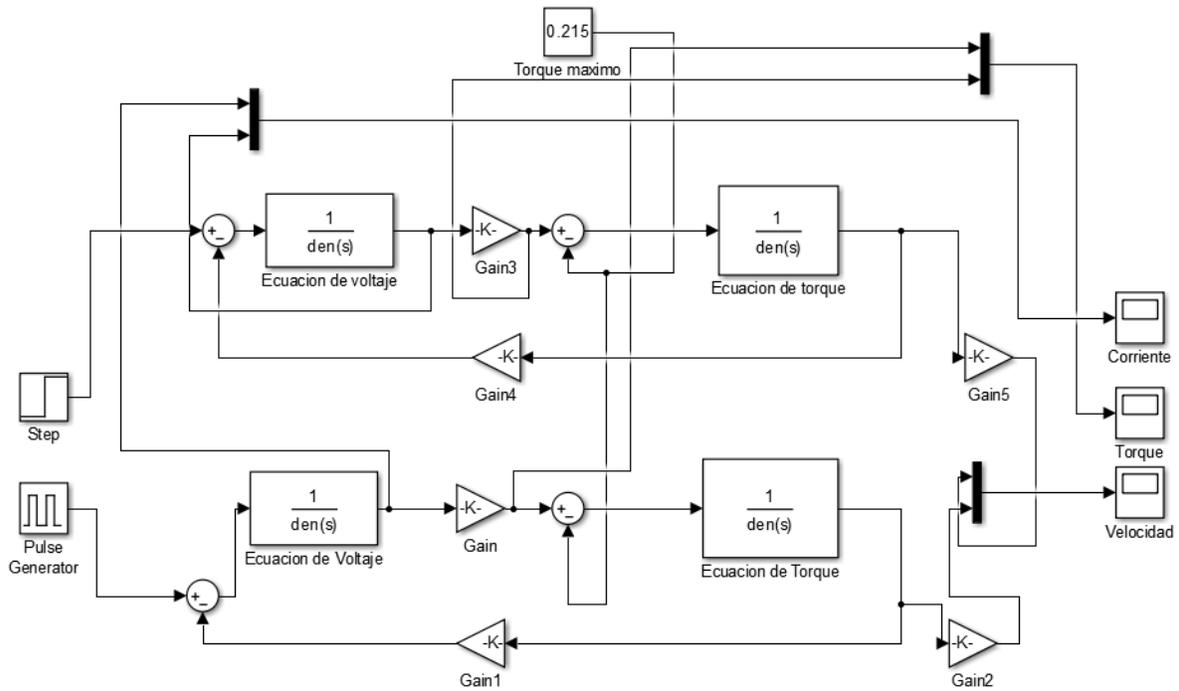


Figura 2.5 Modelo en Simulink

Lo que da como respuesta las gráficas presentadas en las Figuras 2.6, 2.7, 2.8.

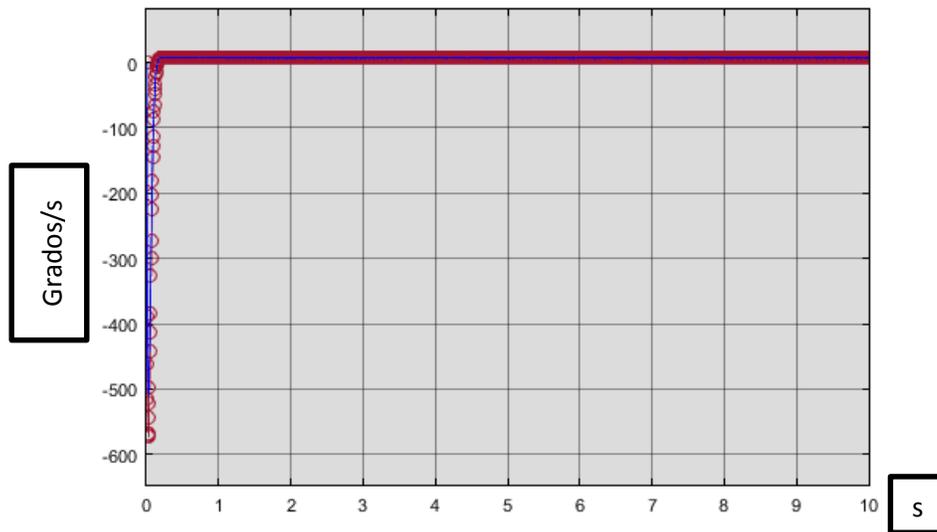


Figura 2.6 Grafica de respuesta en velocidad

En la Figura 2.6, la línea azul es la correspondiente a la señal de velocidad a la mitad del voltaje nominal de 6 V y la morada es la de una señal cuadrada a una frecuencia de 150 Hz.

Y debido a que ambas curvas coinciden, podemos asumir que el torque a esta frecuencia se comporta de forma lineal.

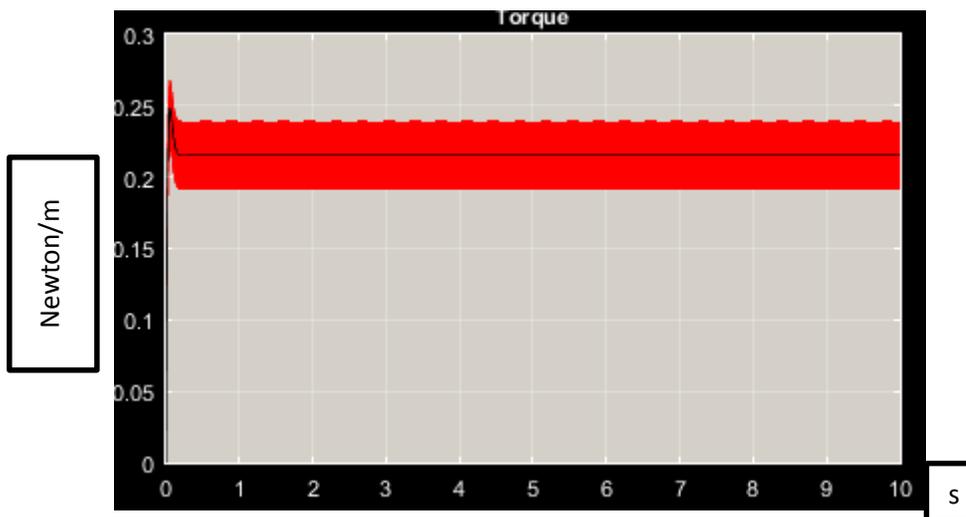


Figura 2.7 Gráfica de respuesta en torque

Con respecto a la Figura 2.7, la señal roja es la correspondiente al torque. Se puede observar que a la mitad del voltaje nominal se obtiene la mitad del torque con la señal cuadrada. Por lo tanto, podemos corroborar la afirmación arriba mencionada. Finalmente, para la señal de corriente (Figura 2.8) se puede observar la corriente consumida por el motor a ese torque, la cual fue de 5 A.

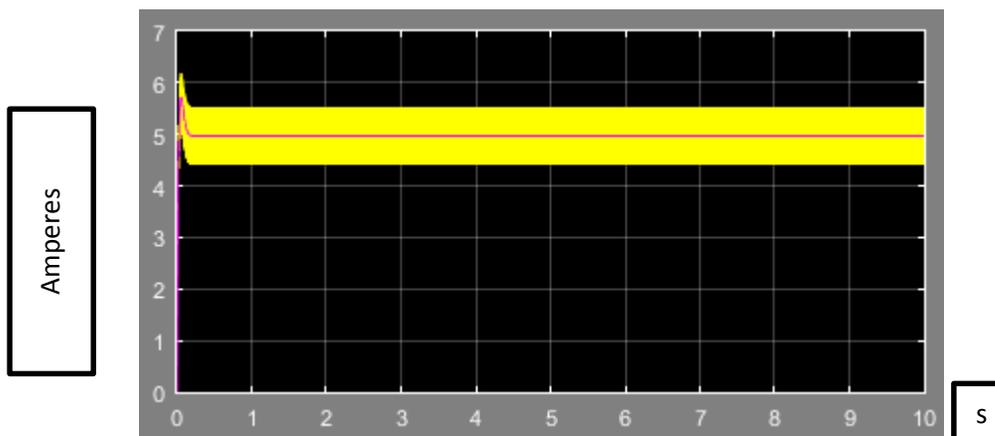


Figura 2.8 Gráfica de respuesta en corriente

2.2 Motores a pasos y sus características

Los motores a pasos son ampliamente usados en la industria debido a que pueden ser controlados mediante una computadora o un microcontrolador. Su mayor característica es que rota en intervalos de ángulo discretos (pasos), moviéndose un pequeño ángulo cada vez que un comando de pulso es recibido por el driver de potencia que a su vez energiza sus bobinas [4]. El uso más común de estos motores es en impresoras 2D, 3D y en máquinas de control numérico (CNC).

Su funcionamiento se basa en que cuando un número finito de pulsos ha sido suministrado a las correspondientes bobinas, el rotor girará moviéndose un ángulo conocido, y este comportamiento es conocido como control en lazo abierto. En base a una señal de entrada se puede asegurar una posición de salida sin necesidad de retroalimentación. Los motores a pasos son similares a los motores convencionales, como una guía general se asume que el torque y la potencia de un motor a pasos será parecida a la de un motor convencional. Los ángulos de paso van desde los 1.8° hasta los 90° , con torques desde $1\mu\text{Nm}$ hasta 40 Nm . En un motor de 15 cm de diámetro adecuado para un maquinado de herramientas, se logran alcanzar hasta las 500 revoluciones por minuto sin perder torque. En la Figura 2.9 se observa el diagrama de control de un motor a pasos, en el que se suministra pulsos al driver de potencia para hacer girar al rotor.

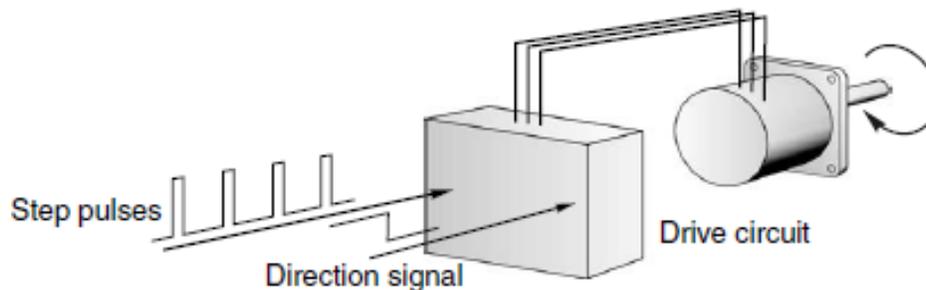


Figura 2.9 Funcionamiento de un motor a pasos

El principio en el cual operan estos motores es muy simple, se tienen varias bobinas posicionadas en ángulos distribuidos equitativamente. Al ser energizada una bobina se puede ejercer un flujo magnético sobre ella y esto hará que el rotor se alinee con la bobina energizada haciendo girar el rotor un ángulo. Un caso en particular se observa en la Figura 2.10 nótese cómo están alineadas las bobinas en ángulos de la misma magnitud (30°) para que funcione de manera adecuada. Para dar una secuencia correcta se debe conmutar cada bobina de forma correcta, que en este caso sería ACBA y para el sentido contrario sería ABCA, este tipo de motor es llamado de reluctancia variable descrito posteriormente.

2.2.1 Tipos de motores a pasos

En general existen 2 tipos de motores a pasos: bipolar (4 cables) y unipolar (5 o más cables). Donde en uno la corriente fluye por dos sentidos y en el otro solo por uno. El motor unipolar puede ser configurado como bipolar debido a que cuenta con sus bobinas la mayoría de veces separadas. En este apartado se hablará de los motores a pasos de imán permanente, reluctancia variable e híbridos.

Motores a pasos de imán permanente

Este tipo de motores a paso tienen como particularidad que el rotor tiene un imán permanente y puede llegar a tener desde dos o más polos. Los polos están dados en número par debido a que tiene un norte y un sur, si se desea aumentar la resolución es posible hacerlo aumentando los polos, o por otro lado aumentando el número de fases, siendo que el rotor gira al energizar cada fase. [5]

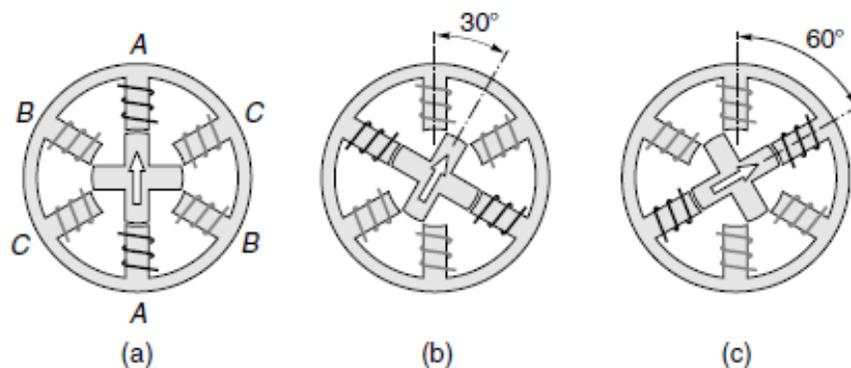
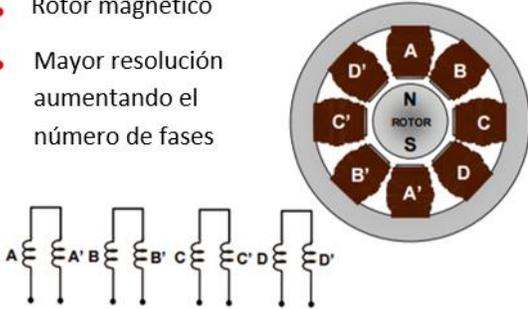


Figura 2.10 Funcionamiento de un motor a pasos de reluctancia variable

Motor a pasos de imán permanente

- Rotor magnético
- Mayor resolución aumentando el número de fases



Motor a pasos de imán permanente

- Rotor magnético
- Mayor resolución aumentando los pares de polos.

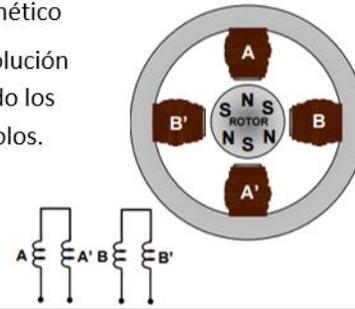


Figura 2.11 Motor a pasos de imán permanente

Motores a pasos de reluctancia variable

Este tipo de motor a diferencia de los motores a pasos de imán permanente, no posee un imán para mover el rotor. Cuenta con un rotor hecho de acero suave y basa su avance en el número de dientes con los que cuenta el rotor, las bobinas deben ser conectadas en serie a diferencia del motor a pasos de imán permanente. [5]

Motor a pasos de reluctancia variable

- Sin rotor magnético
- La resolución aumenta con un mayor número de dientes.
- Normalmente tiene 3 o 5 devanados en el estator.

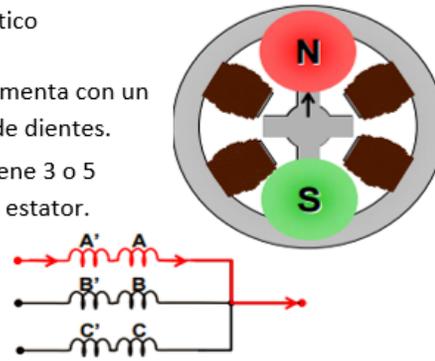


Figura 2.12 Motor a pasos de reluctancia variable

Motores Híbridos

Similar al motor a pasos de reluctancia variable este tipo de motor es una combinación de un motor de reluctancia variable y motor de imán permanente. Un motor a pasos híbrido tiene dientes colocados en el rotor imantados en posición longitudinal al eje, que es altamente magnetizado y produce un flujo unipolar. Las líneas magnéticas que genera el imán son guiadas por dos cilindros acoplados a los extremos de cada uno de sus polos (norte y sur). Construidos generalmente por láminas de material ferro magnético y dentados, que forman los polos del rotor. [5] El motor híbrido produce un par por fuerza de reluctancia, igual que el motor de reluctancia variable. La diferencia entre ambos es el tipo de excitación utilizado. En el motor de reluctancia variable, la excitación es producida únicamente por medio del bobinado, mientras que en el motor híbrido la excitación es conjunta entre el bobinado y el imán.

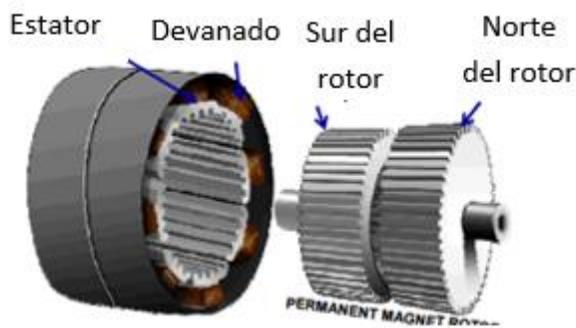


Figura 2.13 Motor a pasos híbrido

Características del motor a utilizar

El motor a utilizar será un motor tipo nema 17 (Figura 2.14). Este motor tiene como fin mover la indexadora de muestras orgánicas descrita en el capítulo 3.

Las características principales de este motor son:

1. 4 Kg-cm de torque.
2. Motor bipolar.
3. Motor híbrido de resolución de hasta 200 pasos por vuelta.
4. Tamaño reducido.
5. Usado comúnmente en impresoras 3D.
6. 2 A de consumo de corriente.
7. 3.6 V de voltaje nominal.



Figura 2.14 Motor a pasos Nema 17

2.2.2 Control del motor a pasos

Para realizar el accionamiento de las bobinas del motor a paso, (al ser un motor a pasos bipolar) se debe considerar la secuencia de conmutación de cada bobina (como se muestra en la Figura 2.15) para que el motor rote de manera correcta [6]. Donde VCC es un voltaje de 3.6 V que será otorgado por la etapa de potencia al motor.

Nº de Pasos	1a	1b	2a	2b
Paso 1	+Vcc	GND	+Vcc	GND
Paso 2	+Vcc	GND	GND	+Vcc
Paso 3	GND	+Vcc	GND	+Vcc
Paso 4	GND	+Vcc	+Vcc	GND

Figura 2.15 Secuencia de un motor a pasos bipolar

2.3 Actuadores Lineales

Los actuadores lineales son dispositivos que transforman la energía neumática, hidráulica o eléctrica en un movimiento lineal. Cabe destacar que este tipo de mecanismo por sus características es muy utilizado en la industria. En las Figuras 2.16 y 2.17 se muestra las características de un actuador tanto neumático como hidráulico [7]. En general pueden ser movidos por fuerzas eléctricas, neumáticas e hidráulicas. Sin embargo, estos dos últimos tipos requieren otros componentes que dificultan su implementación como el uso de válvulas, compresores y bombas, por lo tanto, en este trabajo se utiliza un actuador eléctrico.

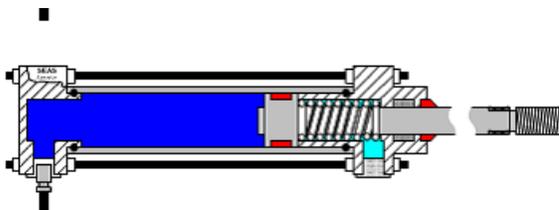


Figura 2.16 Actuador neumático de simple efecto y retorno por muelle

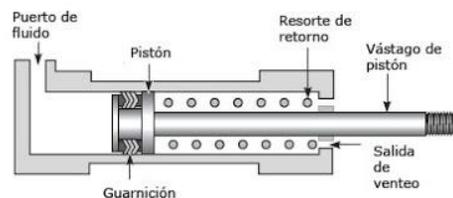


Figura 2.17 Actuador Hidráulico

2.3.1 Actuadores lineales eléctricos

Estos actuadores tienen un motor de escobillas con una caja de engranes y un tornillo sinfín, su uso es simple ya que solo deben ser alimentados con una fuente DC, poseen dos finales de carrera, que al ser accionados impiden que el tornillo siga haciendo mover la tuerca que hace que se extienda hasta destruir la base del husillo. En particular el actuador utilizado es alimentado con un voltaje de DC de 12 V con un consumo máximo de hasta 3.8 amperes y una carga máxima de hasta 45 kg con un avance lineal de 18 mm por segundo.

Para controlar este motor es posible hacerlo de igual forma al motor de escobillas modelado anteriormente, pero debido a su lentitud se consideró hacer su control de posición

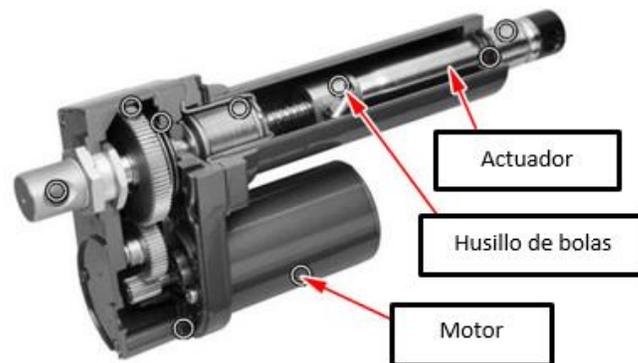


Figura 2.18 Composición interna de un actuador eléctrico lineal



Figura 2.19 Actuador lineal Xcorpion vista A
vista B [14]



Figura 2.20 Actuador Lineal Xcorpion

mediante sensores de accionamiento mecánico (Final de carrera) y accionamiento infrarrojo, que permiten conocer su posición. Estos motores solo tienen dos entradas en las

terminales del motor con las que se puede cambiar el sentido de giro usando +/- 12 V para que el actuador entre o salga. A este tipo de control también se le considera control todo o

nada. En la Figura 2.18 se observa su composición interna y, en la 2.19 y 2.20 algunos actuadores existentes en el mercado.

Una vez definidos todos los componentes que se utilizarán, en el capítulo 3 se verá cómo se implementan en conjunto el uno con el otro mediante piezas maquinadas en aluminio y acero diseñadas en SolidWorks.

CAPÍTULO

3 Diseño del sistema



En esta sección se analizará el sistema de toma de muestras que fue implementado mediante actuadores eléctricos. Se estudiará cada prototipo sus ventajas y desventajas ante el que fue elegido.

3.1 Diseño del prototipo número uno

En un principio se decidió realizar una maquina cartesiana debido a que es la más fácil de construir por su movimiento lineal. Se planteaba comprar actuadores lineales de la marca SMC tal como el que se observa en la Figura 3.1

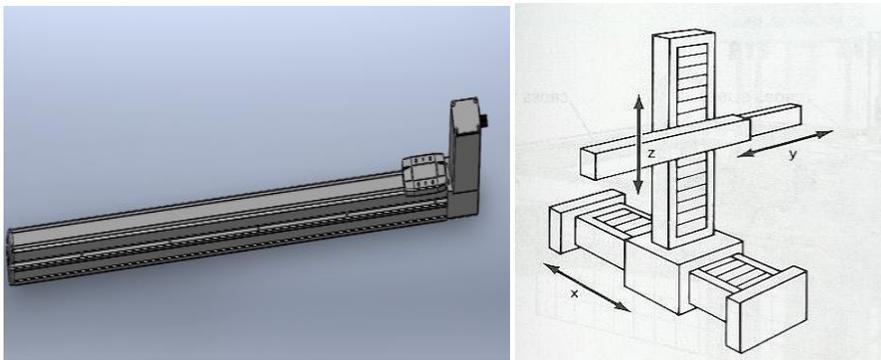


Figura 3.1 Actuadores lineales de la marca SMC para la construcción del robot cartesiano

Estos actuadores poseen las características necesarias debido a que otorgan una velocidad de 2000mm/s. Sin embargo, para ser implementados se debían realizar algunas modificaciones para su correcto funcionamiento (maquinado de piezas). Estos actuadores poseen también una etapa de potencia proveída por el fabricante y ambos son de origen japonés. El tiempo aproximado para adquirir uno es de 3 meses desde su compra.

Debido al alto costo de estos actuadores, el tiempo de entrega y las modificaciones que debía hacerse se decidió omitir esta opción, un dato curioso es que cada actuador oscilaba en \$50,000.00. pesos en aquel tiempo y posiblemente su costo ha aumentado debido a la devaluación que sufre el peso el día de hoy.

3.2 Diseño del prototipo numero dos

Se realizó un segundo prototipo a un menor costo que el primero, se planeaba utilizar un pistón neumático para realizar la inyección y un motor a pasos para realizar la toma de muestra lentamente.

Este segundo prototipo tenía características que lo hacían mucho más económico y más versátil que el primero, se puede visualizar en las figuras 3.2 y 3.3. Posee un actuador eléctrico, dos neumáticos y dos motores a pasos. El sistema se basa en hacer rotar una indexadora que contiene las muestras y estas a su vez son tomadas por una indexadora de 3 jeringas de 10, 25 y 50 μl . Una vez alineada la muestra y la indexadora de jeringas, se realiza la toma de muestras con un actuador neumático que sale y toma el émbolo de la jeringa, en este punto se activa un actuador eléctrico que permite que el émbolo suba hasta la cantidad deseada. Una vez tomada la muestra, el actuador neumático regresa y la indexadora de jeringas sube para posteriormente girar y posicionarse en la cámara de

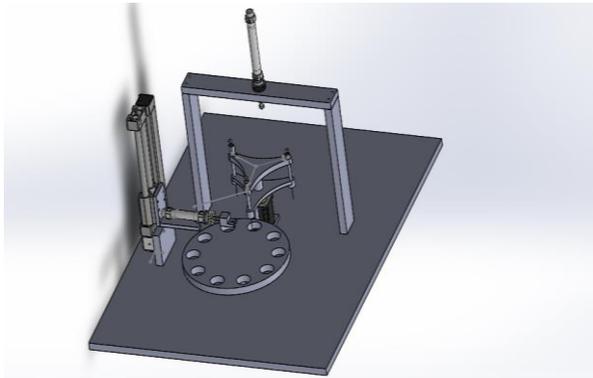


Figura 3.2 Vista frontal del prototipo número 2

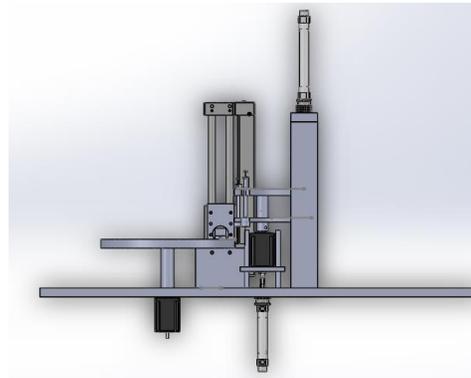


Figura 3.3 Vista aérea del prototipo

medición que contiene los sensores, posteriormente el líquido orgánico es inyectado a gran velocidad por el actuador neumático.

Este prototipo es viable para construir y puede ser implementado, pero debido a que se utiliza un sistema neumático es necesario implementar componentes extra como un compresor válvulas, una unidad de mantenimiento, mangueras, etc., aunando también al ruido generado por el sistema y la contaminación que sus componentes generan.

3.3 Diseño del prototipo número tres

Finalmente, después de analizar las ventajas y desventajas de cada sistema mencionado con anterioridad, se procedió a realizar un tercer diseño el cual difiere en su construcción del primero y del segundo. El sistema fue acondicionado a la cámara de medición donde se depositan las muestras por lo que se redujeron los costos comparándolo con los sistemas anteriores y se mejoró su desempeño.

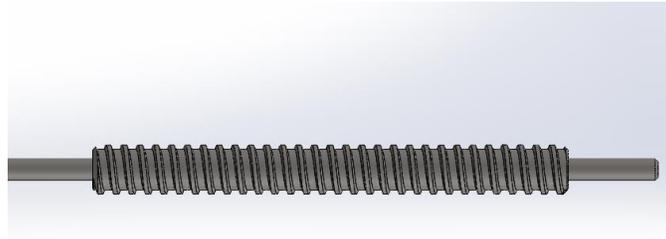


Figura 3.4 Husillo 6 mm. por hilo

Debido a que la inyección se debe hacer rápidamente (al decir rápido se dice que en un segundo el émbolo debe recorrer una distancia de **7.3 cm.**) y la toma de muestra lenta, se construyó un sistema de toma de muestras conformado por un husillo ACME (Tornillo con forma trapezoidal usado comúnmente en la industria para realizar movimientos lineales mediante el mecanismo tuerca tornillo, Figura 3.4). Para realizar el desplazamiento del émbolo de la jeringa. Este husillo tiene la función de hacer que el émbolo se desplace linealmente mediante un mecanismo husillo-tuerca, donde la tuerca es parte de un bloque llamado mesa transportadora del émbolo. El husillo se adaptó para obtener un avance lineal de 7cm/s sobre la mesa. Se adquirió un motor de escobillas mencionado en el capítulo 2, otorga una velocidad de 5100 rpm a un voltaje nominal de 24 V entregando un torque de 2 kg-cm (Figura 3.5). Debido a la alta velocidad y el bajo torque del motor, se diseñó un reductor con una relación de 1:3 reduciendo así la velocidad a 1700 rpm y aumentando el torque en 6 kg-cm. Se consideró una velocidad de 1500 rpm ya que se produce fricción en los engranes sumando la fricción del sistema, reduciendo con ello la velocidad. Para obtener el desplazamiento se eligió un husillo con un avance de 6 mm por hilo (en una vuelta avanza 6 mm) y se calculó el desplazamiento lineal por segundo (teniendo la velocidad de 1500 rpm), convirtiendo esta velocidad a revoluciones por segundo mediante la siguiente ecuación:

$$\textit{Avance angular por segundo} = \frac{1500\text{rpm}}{60 \text{ s}} = 25 \frac{\text{revoluciones}}{\text{segundo}}.$$

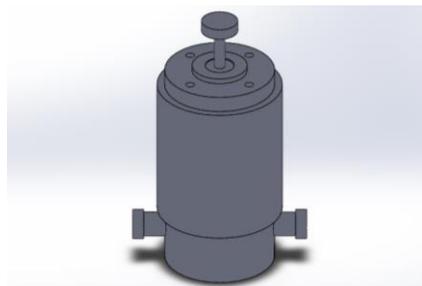


Figura 3.5 Motor MCG

Se sabe que en una vuelta el husillo avanza 6 mm por lo que si en un segundo rota 25 veces se obtiene un desplazamiento lineal de $25 \times 6 \text{ mm} = 150 \text{ mm/s} = 15 \text{ cm/s}$ que es lo necesario para realizar la inyección.

Una vez efectuado el diseño del husillo y la selección del motor, se fijó mediante baleros (Fig. 3.6b) y dos tapas (Fig. 3.6 d)), en conjunto con la mesa transportadora del émbolo (Fig. 3.6 a)), esta pieza fue diseñada con una cola de milano en la parte inferior y una tuerca en el interior permitiendo un desplazamiento lineal.

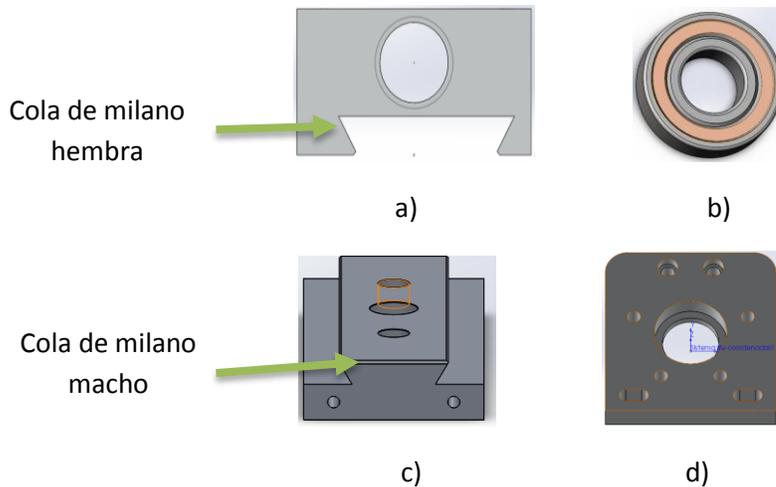


Figura 3.6 Mesa transportadora con guía hembra, baleros, guía con cola de Milano macho y tapas de sujeción

Para que la mesa no tuviera un juego mecánico se creó una guía (Fig. 3.6c) colocada bajo la mesa para que la cola de milano hembra de la mesa embone con la cola de milano macho de la guía y esto permita deslizar la mesa. Se hizo un soporte especial para la jeringa y para el émbolo, estos dos soportes permiten mantener la jeringa fija en la base del sistema de toma de muestras y el émbolo fijo en la mesa, haciendo así el movimiento para la inyección y toma de muestra.

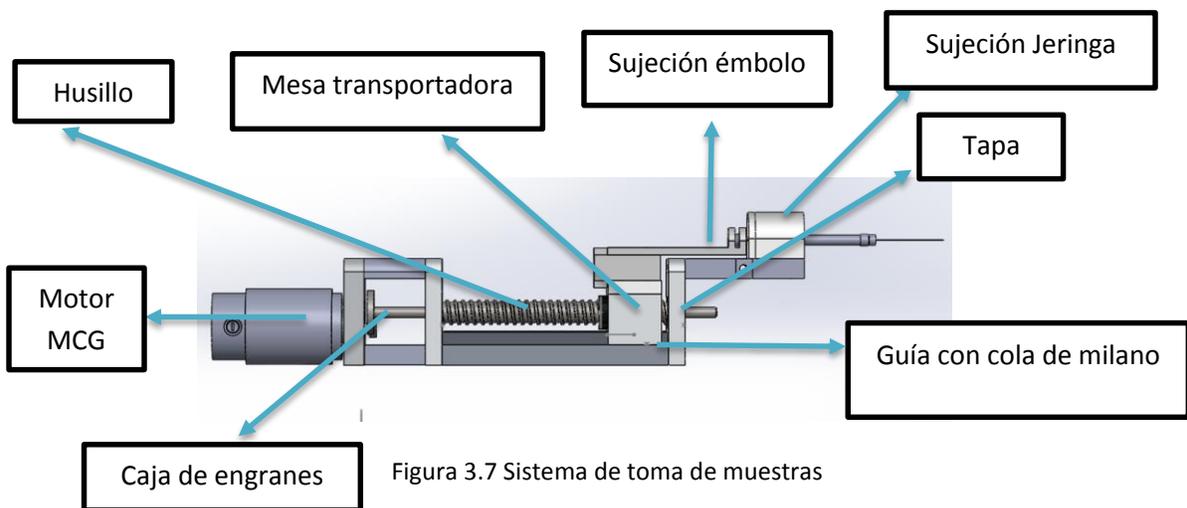


Figura 3.7 Sistema de toma de muestras

También se diseñó un sistema lineal de carga (Figura 3.8) dicho sistema posiciona al sistema de toma de muestras en los viales, en la posición de casa y en la de inyección. Sirve para tener un espacio libre y que el mecanismo no estorbe mientras no esté en uso, por lo que permanece arriba sin tener la necesidad de quitar la jeringa. Este sistema es el que posiciona a la jeringa en los viales que contienen los componentes orgánicos o en la cámara de medición.

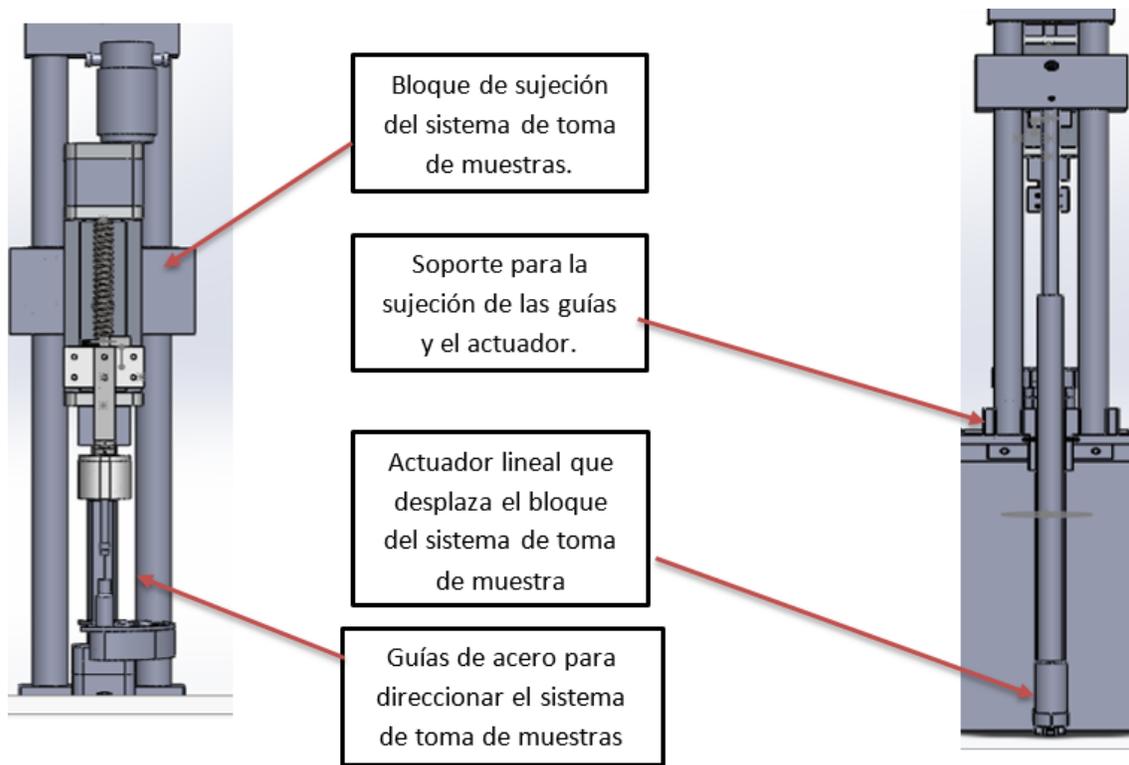


Figura 3.8 Sistema lineal de carga

Se implementó en el sistema una tapa Figura (3.9a), la cual permite que la indexadora de muestras permanezca fija, posee un hueco para colocar la cámara de medición (Fig.3.9c) que es donde se situarán los sensores a caracterizar. Cabe destacar que esta tapa puede ser quitada para que se pueda utilizar de manera independiente la cámara de medición y el baño térmico. Para tener diferentes tipos de muestras, se diseñó una indexadora de muestras que contiene los viales como se visualiza en la Figura 3.9b.

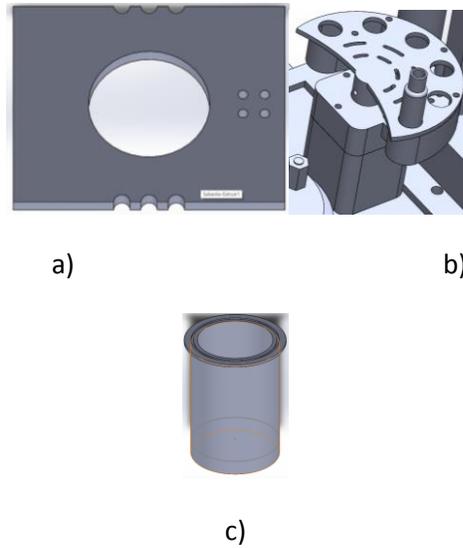


Figura 3.9 Tapa de la base con barreno para la cámara de refrigeración, Indexadora y cámara térmica

Finalmente uniendo todos los subcomponentes, se puede observar el diseño del prototipo con cada una de las etapas en Figura 3.10 conformando la máquina de toma de muestras

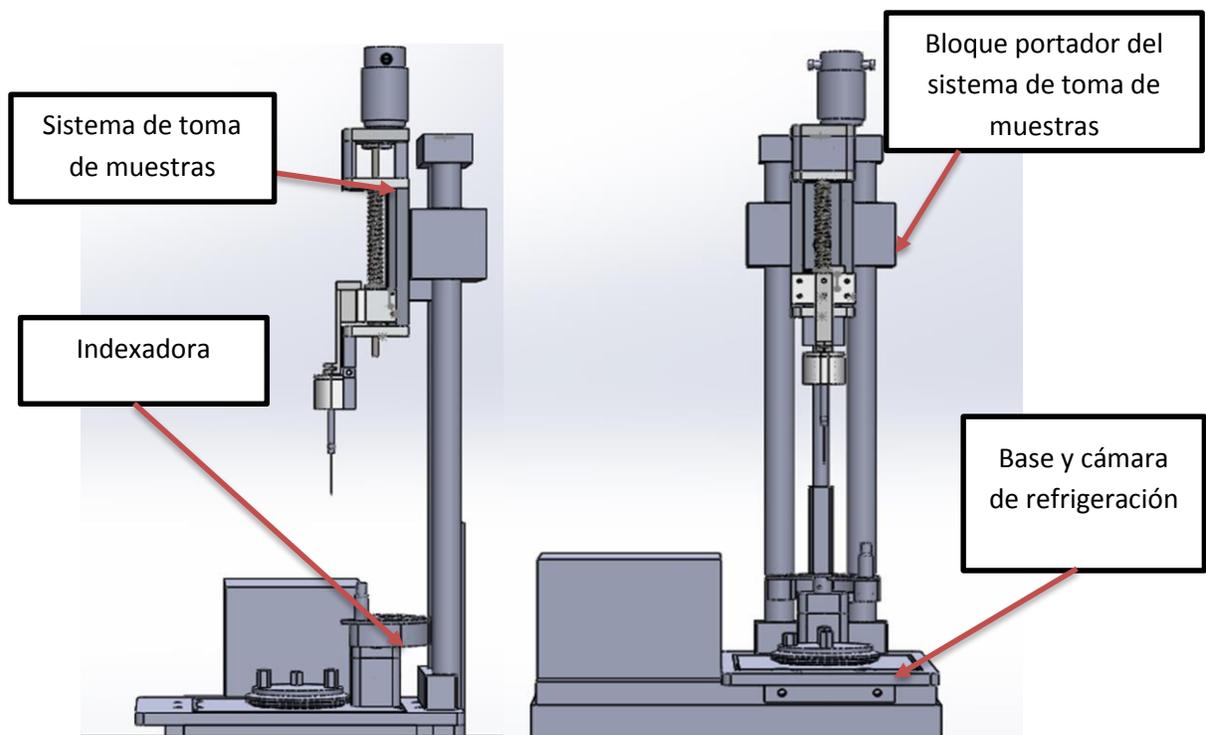


Figura 3.10 Vista frontal y lateral de la maquina

3.4 Diseño de las etapas de potencia

En esta sección se analizará la construcción de la etapa de potencia de cada actuador, debido a que es necesario amplificar la señal proveniente de los microcontroladores para energizar los motores y con ello mover el sistema.

3.4.1 Diseño de la etapa de potencia del motor de escobillas

Para que el motor de escobillas funcionara fue necesario diseñar y construir una etapa de potencia que es activada mediante la señal proveniente de la etapa de control, por lo que se implementaron transistores de potencia *MOSFET* (Metal Oxide Silice Field Electric Transistor) tipo canal N y P. Fueron utilizados este tipo de transistores debido a que tienen bajas pérdidas de voltaje en la carga (motor) a comparación de los transistores *BJT*. Este tipo de transistores son aptos para conmutar altas frecuencias. Con estas características del transistor se usa una fuente de DC fija sin la necesidad de compensar el voltaje perdido en los transistores, esto en el caso que fueran *BJT*.

El circuito de la Figura 3.11 es la configuración para que un transistor *MOSFET* canal P se sature. Se realiza un arreglo de resistencias para que voltaje de *Gate-Source* menos el voltaje de umbral sea menor que el voltaje *Drain-Source* (ecuación 3.1) cabe destacar que

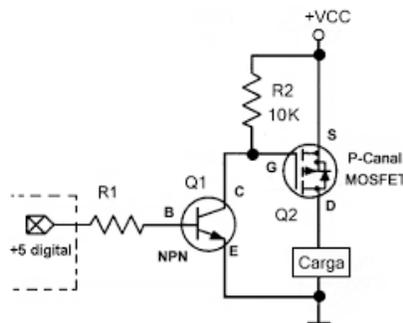


Figura 3.11 MOSFET canal P saturado por un BJT

esto ocurre cuando se satura el transistor de baja potencia *BJT* con la señal que recibe del dsPIC.

$$V_{GS} > V_t \text{ y } V_{DS} > (V_{GS} - V_t) \dots\dots\dots \text{Ec.3.1}$$

El circuito de la Figura 3.12 es una forma mejorada del circuito 3.11, ya que en vez de tener un transistor *BJT* para conmutar el transistor de potencia MOSFET canal N y P, se utiliza un opto-acoplador. Un aspecto importante es que a diferencia del circuito anterior es que se satura también un *MOSFET* canal N. El optoacoplador sirve para aislar la parte de potencia con la parte de control, evitando así en caso de un corto circuito que el dsPIC se vea dañado.

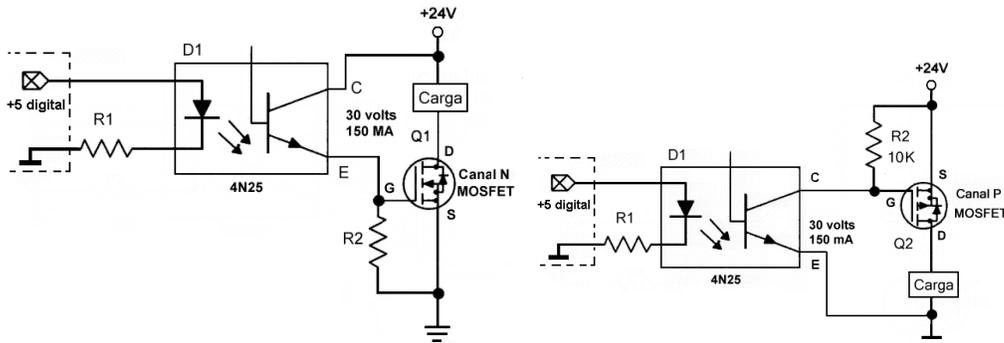


Figura 3.12 MOSFET canal N y P saturado con un opto acoplador

Al combinar estas dos configuraciones se construyó un puente H (Figura 3.13) con *MOSFET* de matrícula IRFZ44N (Canal N) e IRF5305 (Canal P), se colocaron diodos de protección para que en caso de una sobrecarga debido a un retorno de corriente que pueda surgir del

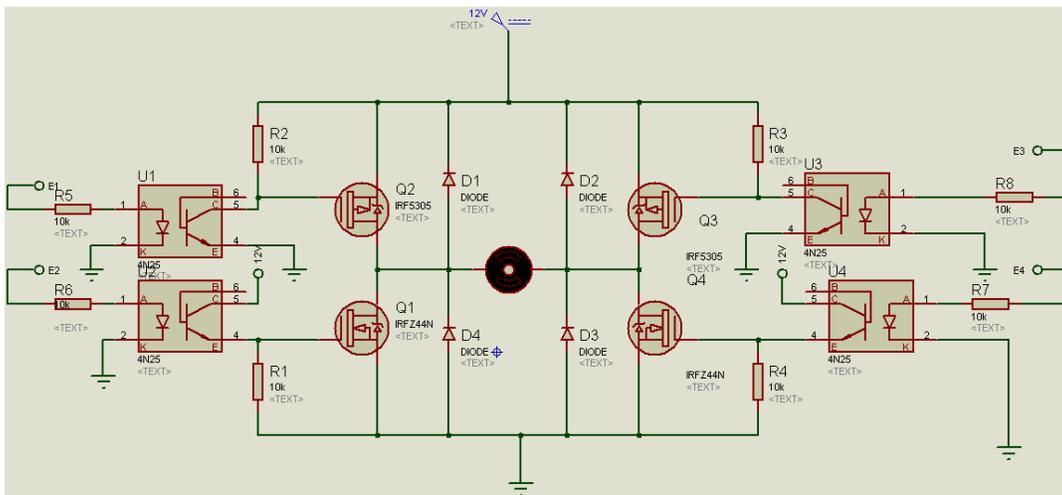


Figura 3.13 Puente H con MOSFET y etapa de protección con opto acopladores

motor, los transistores puedan ser protegidos de esta corriente parasita.

Ambos *MOSFET* tienen un voltaje máximo admitido en **Gate** de 20 V, el voltaje de alimentación del motor no debe exceder este límite si no los transistores podrían dañarse, debido a que el motor y los transistores son alimentados con el mismo voltaje de la fuente. Otro aspecto a considerar es el sentido de giro del motor el motor, ya que para que pueda

girar hacia un lado el eje del motor se deben activar el transistor Q2 y Q4 sucede lo mismo con los transistores Q3 y Q1 para girar en sentido opuesto. Como nota importante nunca deben activarse al mismo tiempo Q1 y Q2 o Q3 y Q4 debido a que se provocaría un corto circuito al fluir la corriente directamente por los transistores (esto es evitado vía software).

3.4.2 Etapa de potencia del motor a pasos y del motor correspondiente al actuador lineal con el puente H L298

Para realizar el accionamiento de las bobinas del motor a pasos y hacer la secuencia para que el motor gire, se compró un puente H L298 que posee dos puentes H en el mismo circuito integrado y 4 pines de habilitación IN1, IN2, IN3, IN4, así como también 4 salidas OUT1, OUT2, OUT3 y OUT4, que van conectadas hacia las salidas del motor a pasos. La Figura 3.14 es el diagrama del puente H con diodos de protección y sus respectivas fuentes

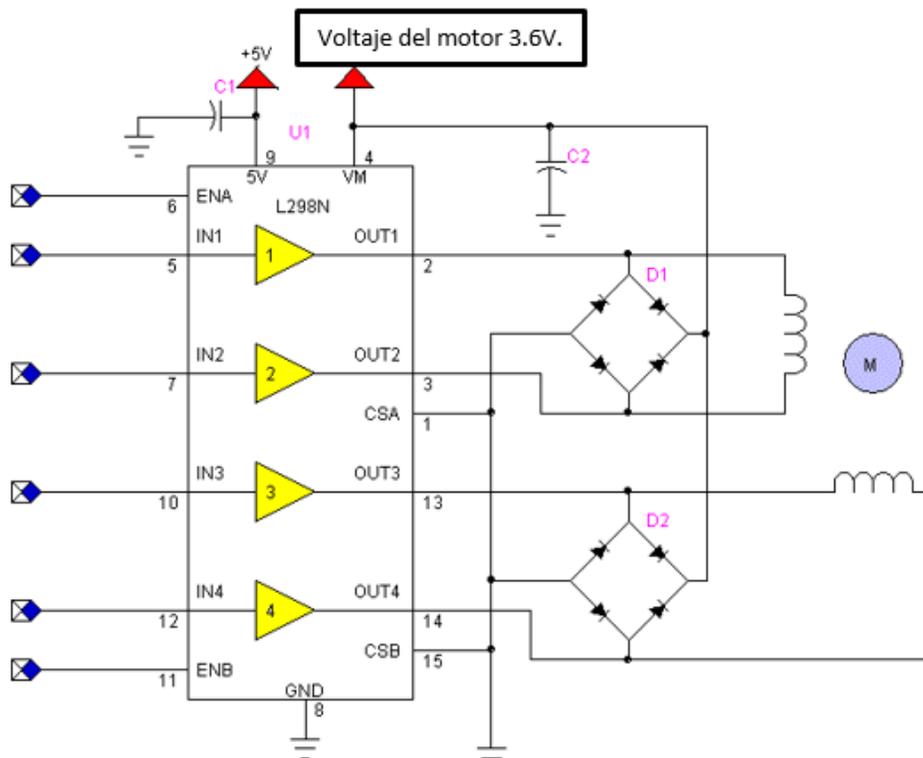


Figura 3.14 Driver puente H L298-Motor a pasos

de alimentación, debido a que estos drivers son muy utilizados, actualmente son vendidos en tarjetas por lo que únicamente se implementó la tarjeta de la Figura 3.15.

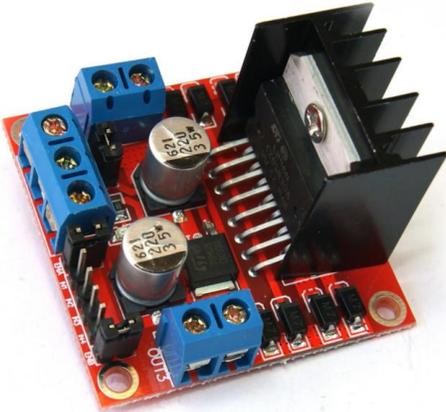


Figura 3.15 Tarjeta de desarrollo puente H L298

Para controlar el sentido de desplazamiento del actuador se utilizó de igual manera un puente H L298, debido a la facilidad de manejo. Su diagrama de conexión se muestra en la Figura 3.16. Solo fue utilizado medio puente H ya que es un motor de escobillas y para este trabajo solo es necesario invertir el giro y deshabilitar su movimiento.

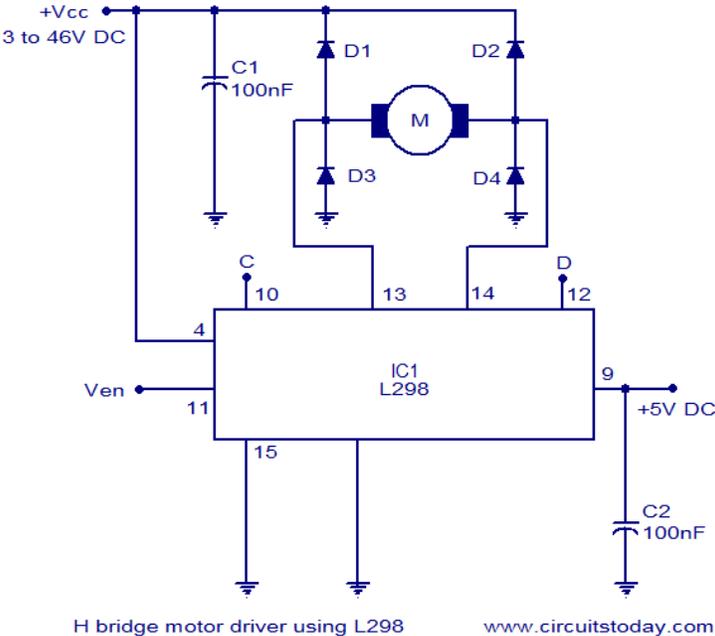


Figura 3.16 Puente H L298 para motor dc cortesía de circuitstoday

Una vez diseñadas las etapas de potencia de cada actuador es posible realizar el control de cada uno de ellos, el cual se verá en el siguiente apartado.

3.5 Diseño de la etapa de control mediante el uso de microcontroladores

Para controlar los motores que son activados mediante las etapas de potencia, es necesario una señal TTL, que puede ser adquirida directamente por una fuente de voltaje de CD, también puede ser suministrada por un circuito integrado que suministre señales lógicas como un temporizador 555, compuertas, el puerto paralelo de una PC etc. En esta ocasión se utilizarán dos microcontroladores de la marca *Microchip*, estos ayudarán a hacer el control de accionamiento de las etapas de potencia y a realizar la comunicación hacia la PC, estas son las ventajas de usar un microcontrolador a diferencia de usar únicamente compuertas, debido a que el microcontrolador puede ejecutar operaciones lógicas y ejecutar algoritmos.

3.5.1 Diagrama de bloques del sistema

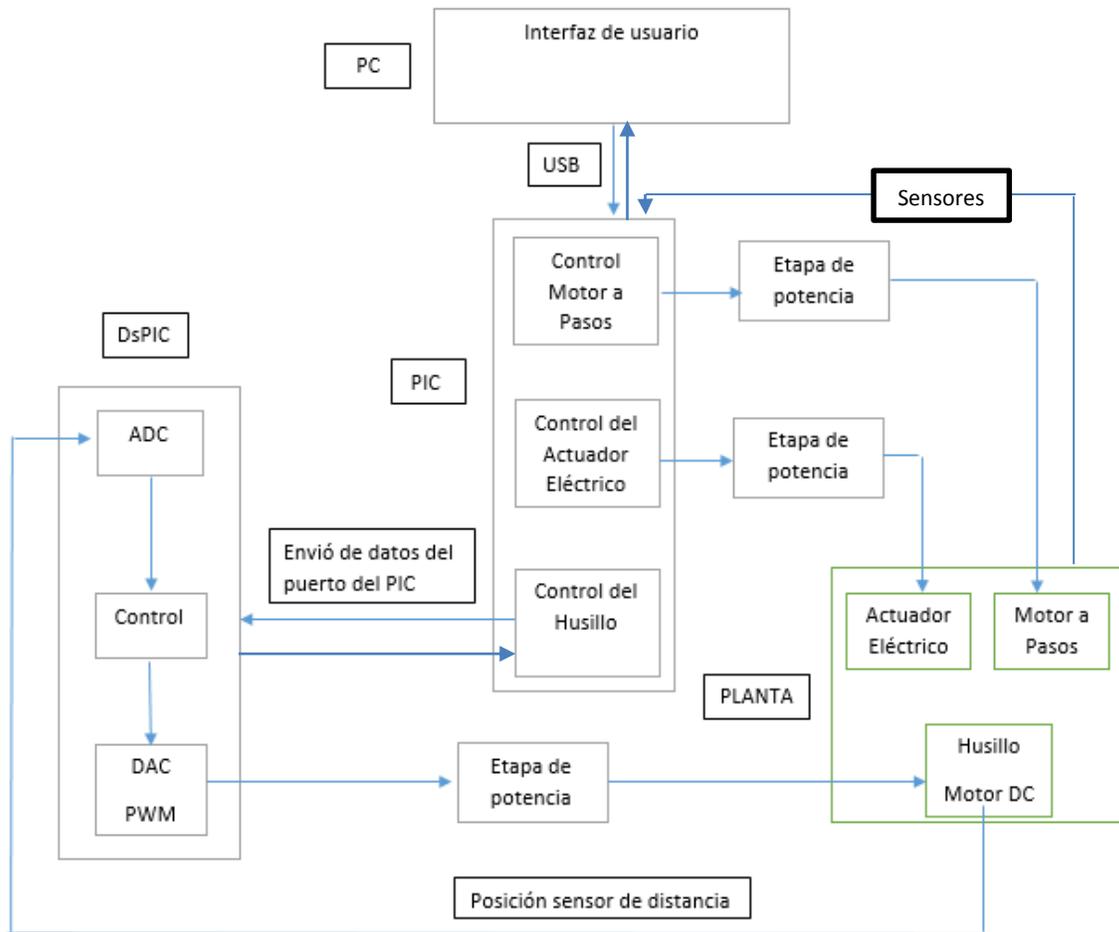


Figura 3.17 Diagrama a bloques del sistema

El diagrama a bloques de la Figura 3.17 muestra cómo se ejecutará el proceso de funcionamiento del sistema. Las etapas de control están implementadas en el PIC y el dsPIC, el PIC realizará el control del motor a pasos y del actuador, ya que estos no requieren de un lazo cerrado de control. El PIC a su vez obtendrá la señal de la mayoría de los sensores del sistema (finales de carrera, sensor de presencia y foto-receptor), también enviará la posición deseada en microlitros al dsPIC. Las instrucciones que realizará el PIC, serán recibidas vía USB mediante un programa en *Visual C#*. El dsPIC únicamente hará el control del motor de escobillas debido a que necesita mucha precisión en el posicionamiento, por lo que se requiere una amplia resolución en cuanto al ADC (Convertidor analógico digital) y la señal de salida analógica por PWM, también recibirá el *setpoint* mediante el puerto B del PIC, las señales de salida de control emitida por el PIC y el dsPIC son dirigidas hacia los actuadores mediante su respectiva etapa de potencia.

Antes de implementar el programa en los microcontroladores se realizó un algoritmo para posteriormente programarlo en los microcontroladores. Se comenzó con el algoritmo que

esta implementado en el dsPIC siendo que únicamente tiene como objetivo posicionar el motor de escobillas que mueve el husillo y a su vez el embolo de la jeringa. Cabe destacar que se utilizó un dsPIC30F4011 debido a su resolución en PWM y también sus características propias hacen que sea óptimo para control de motores de CD (refiérase a la hoja de datos).

3.5.2 Control del motor de escobillas mediante el dsPIC30F4011

Para controlar los motores de escobillas es necesario un encoder que permite cerrar el lazo y obtener su velocidad y posición.

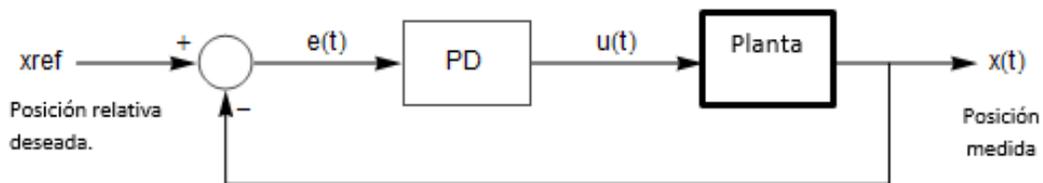


Figura 3.18 Control PD

Para controlar la posición del husillo se implementó un controlador PD discreto en el dsPIC30F4011 [8] tal como se aprecia en la Figura 3.18. Como se observa x_{ref} es la cantidad deseada en microlitros, $x(t)$ es la posición en la cual se encuentra actualmente la mesa, $e(t)$ es la diferencia entre la posición donde se encuentra la mesa y donde se desea que llegue, la señal de error llega al controlador PD donde se hace el cómputo y a partir de esto se envía la señal de salida en voltaje hacia el husillo que es la planta [9].

Cuando es implementado este control en el dsPIC, se debe realizar un algoritmo que ejecuta esta función (Figura 3.19). Donde $e(t)$ el error de posición, K_p la ganancia proporcional del control, K_d la ganancia derivativa $u(t)$ la señal de salida, para [10] activar el control del motor se realiza vía software debido a que no es necesario mantenerlo funcionando en todo momento por ser un husillo que mantiene la posición.

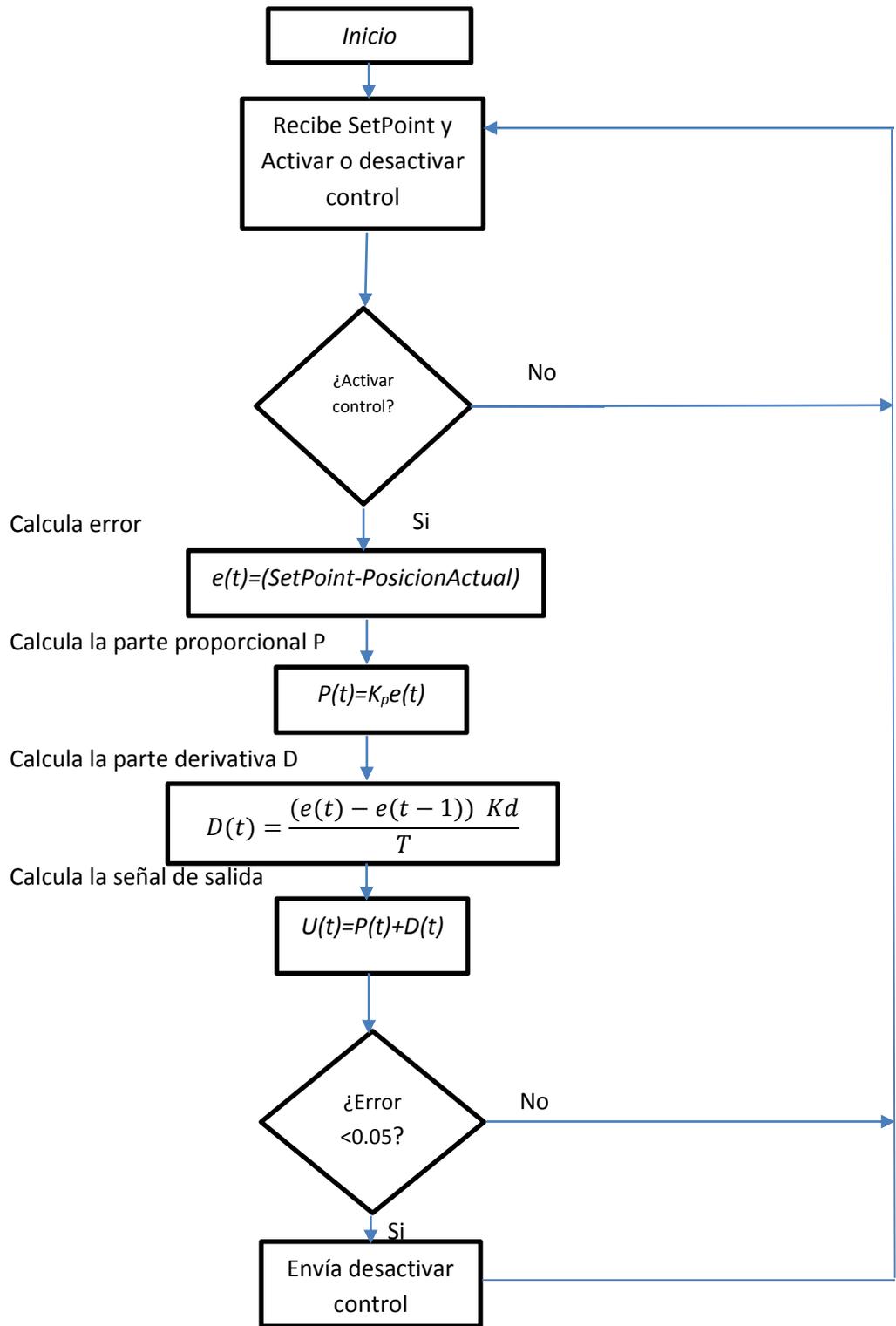


Figura 3.19 Algoritmo de control PD

Cuando el controlador implementado en el dsPIC está listo, se envía una señal al PIC si es 0 que significa que aún no está posicionado y si es 1 quiere decir que el PIC puede proseguir con el programa debido a que se ha puesto en posición y se desactivará el control. El dsPIC únicamente realiza la función de control PD no se anexará la función en este apartado, pero puede ser vista en el apéndice.

Cabe mencionar que los parámetros k_p y k_d fueron elegidos de forma experimental, donde se utilizaron los siguientes:

Para la inyección: $k_p=2.0$, $K_d=0.003$ y para la toma de muestras: $k_p=2.0$, $K_d=0.003$. y $T = 0.01$

3.5.2.1 Control del sistema mediante el PIC18F4550

Otra de las etapas es la del PIC18F4550 [11], esta es una de las más importantes debido a que el PIC18F4550 permite la comunicación del sistema con la interfaz de usuario mediante comunicación USB. El PIC es el que funge como maestro hacia el dsPIC, pero a su vez también funciona como esclavo hacia la PC. El PIC le envía al dsPIC la posición deseada en la que se posicionará el husillo realizando una conversión microlitros-posición que se desean (*Setpoint*), estos datos son enviados y recibidos en forma paralela mediante el puerto B del PIC y el puerto E del dsPIC. El PIC tiene implementadas varias funciones, dos funciones para el motor a pasos (una de inicio y otra de posición) y una función para el actuador. El lenguaje de programación de este algoritmo fue en PIC C y el algoritmo implementado se muestra en la Figura 3.20.

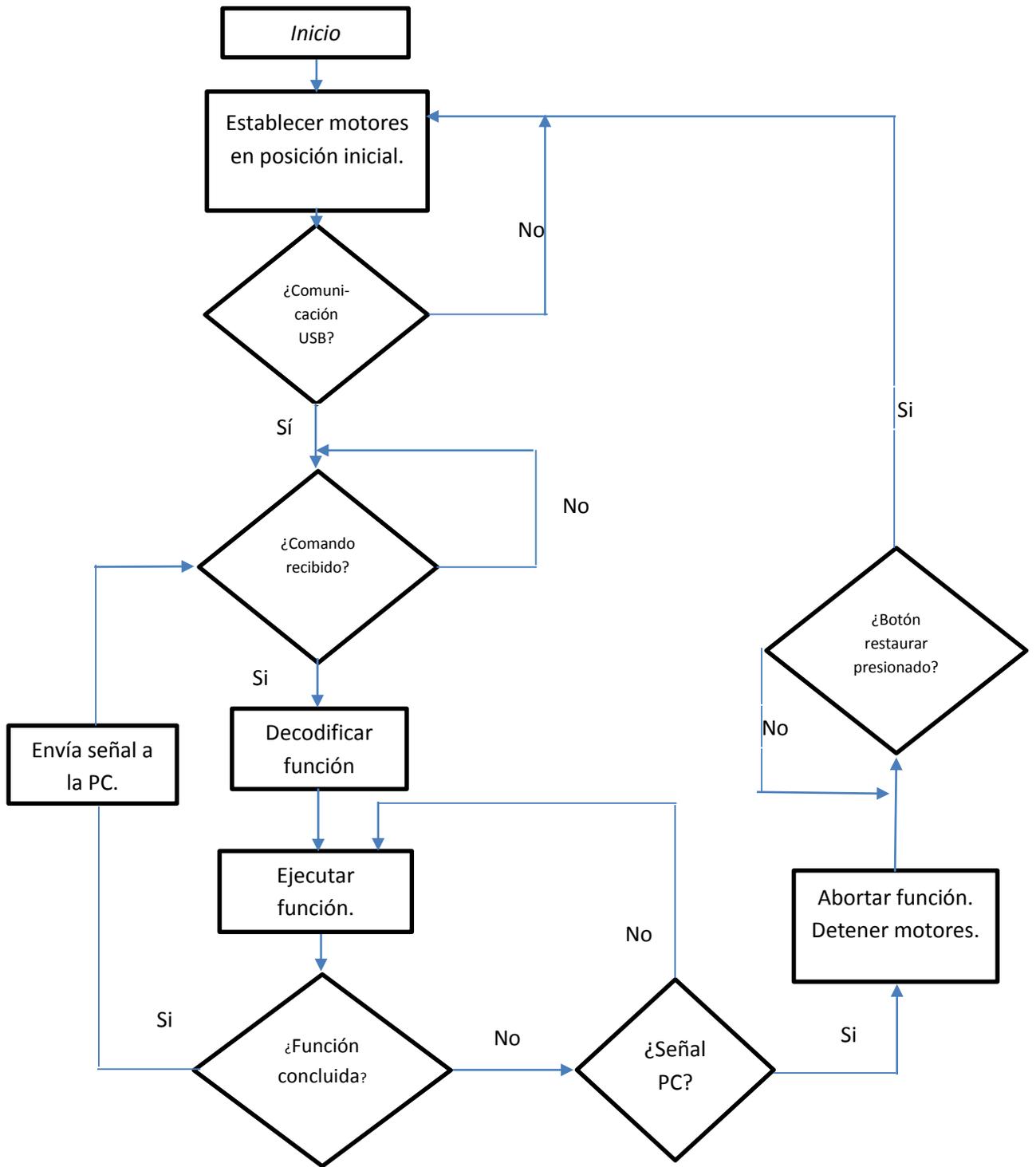


Figura 3.20 Algoritmo del PIC18F4550

Como se observa en la Figura 3.20 el PIC inicializa de manera inmediata todos los motores al ser conectado a la alimentación. Una vez hecho esto el PIC espera la comunicación USB.

Al comenzar la recepción de datos el PIC codifica el dato recibido desde la PC y según el dato será la función que ejecutará. Cada función al ser completada envía un dato de retorno hacia la PC, este dato señala que el PIC ha concluido la tarea indicada y se encuentra listo para realizar una nueva. Según el dato recibido será la función que se ejecutará en el PIC, las funciones que realiza para hacer una tarea son las siguientes:

Función 1: *void iniciar(int re)*

La función iniciar, sitúa al motor a pasos en su punto de origen, que al detectar el fototransistor con el diodo emisor de luz infrarroja se establece el cero desde el cual se procede a hacer el número de pasos.

Función 2: Posicionar el motor a pasos en la muestra (*void paso(int p)*)

La finalidad de la función es dar una cantidad de pasos en específico, estos pasos están en relación con la muestra que se desea.

Función 3: Posicionamiento del actuador lineal (*void pos_act(int sa)*)

El objetivo de esta función es mover al actuador a sus tres posibles posiciones: la superior que es la de estado inicial o de casa, la media que es donde se toma la muestra y la inferior que es la de inyección.

Función 4: Posicionamiento del embolo en la cantidad de microlitros deseada (*void set_point(int sp1)*)

Esta función establece el valor deseado en microlitros en el dsPIC mediante el Puerto D.

Función 5: Posicionamiento del émbolo concluido (*void PID_Listo()*)

Esta función revisa si el dsPIC ha llegado al valor deseado.

Estas son las funciones primordiales que se ejecutan en el PIC para hacer funcionar todo el sistema, el programa tiene otras funciones, pero son propias del PIC, como la de ADC y la selección de entrada y salida en los puertos, PWM etc.

Otro aspecto importante es que se ejecuta una parte de una función en un ciclo y se pregunta si se desea abortarla, esto es en caso de darse un accidente se detengan todos los motores y si esto no sucede se continua con la recepción de datos vía USB.

3.5.2.2 Funciones en el PIC para la comunicación USB

Una de los aspectos más importantes para la comunicación USB son las funciones internas que se implementaron en el PIC para el envío y recepción de datos. Estas funciones son propias del compilador en el que se desarrolló el programa y son útiles para que el PIC funcione como intermediario entre los actuadores y la interfaz de usuario.

A continuación, se muestran estas funciones:

```
usb_init();
```

Función encargada de iniciar el periférico USB.

```
usb_task();
```

Esta función habilita periférico USB e interrupciones

```
usb_wait_for_enumeration();
```

Con esta función se espera hasta que el PIC-USB sea configurado por el host

```
usb_get_packet(1, recibir, 9);
```

La función toma el paquete de tamaño 9 bytes del EP1 y almacenamos en recibir, cabe destacar que recibir es un arreglo entero de 8 bits definido de la forma *Int8 recibir[9]*.

```
usb_put_packet(1, enviar, 9,USB_DTS_TOGGLE);
```

Esta función tiene como objetivo enviar datos del PIC a la PC y al igual que la función anterior se envía un arreglo de 9 datos de un tamaño de 8 bits cada dato de la forma *Int8 enviar[9]*.

3.6 Sensores del sistema

Este apartado tiene como finalidad mostrar las características de los sensores que se ocuparán y actuarán en conjunto con los microcontroladores por ello es que se hablará de ellos en este capítulo.

3.6.1 Sensor de distancia Sharp GP2Y0A41SK0F

El sensor GP2Y0A41SK0F es un sensor que mide distancia de forma analógica, está compuesto de una combinación PSD (Detector sensitivo de posición), un LED-IR (Diodo emisor de luz infrarroja) y un circuito de procesamiento de señales. La diferente reflectancia del objeto, la temperatura ambiente y el tiempo de operación no influye en la detección de distancia porque se adopta un método de triangulación.

La salida de voltaje de este dispositivo corresponde a la distancia de detección, por lo tanto, este sensor puede ser usado como sensor de proximidad.



Figura 3.21 Sensor Sharp GP2Y0A41SK0F

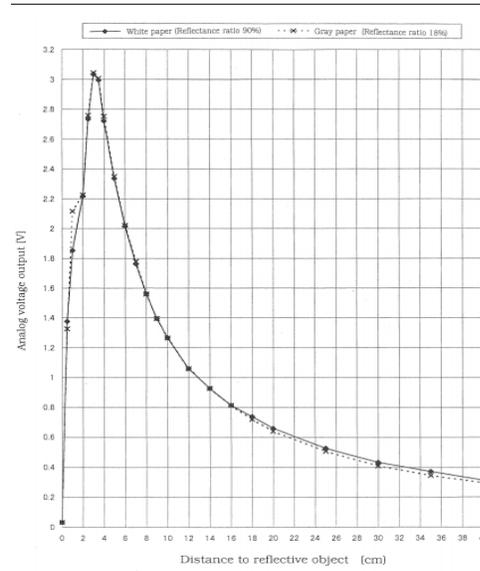


Figura 3.22 Curva de respuesta voltaje-distancia del sensor Sharp. Para mayor exactitud en los datos refiérase la hoja de datos del sensor [10]

Características

- El sensor de medición de distancia está unido con el detector sensitivo de posición, al LED de luz infrarroja y también al circuito de procesamiento de señales.
- Ciclo corto de medida de 16.5 ms.
- Rango de distancia de 4-30 cm.
- Tamaño de 29.5 mm × 13.0 mm × 13.5 mm.
- Salida de tipo analógica.

En las figuras 3.21 y 3.22 se muestra el sensor y su curva de respuesta descritas por el fabricante.

La curva de respuesta es no lineal, por lo que se planea trabajar en la zona lineal para evitar problemas en el control. También su señal es de muy bajo voltaje por lo que se utilizó un amplificador un acoplamiento para que el dsPIC procesara los datos adquiridos por el sensor.

Se diseñó un filtro pasa bajas para eliminar un ruido generado por el sensor, este ruido oscila entre los 1000 Hz.

3.6.2 Sensor de contacto

Conocido vulgarmente por final de carrera, son pulsadores accionados mecánicamente de formas muy diversas. Tiene la misión de conectar y/o desconectar circuitos auxiliares o de

gobierno, sirviendo para el mando de contactores, señalización, ascensores, etc., estos pueden ser de desconexión o de desconexión doble.

Este tipo de interruptores poseen dos estados abierto y cerrado, existen tres tipos el normalmente abierto (NA), normalmente cerrado (NC), y el que cuenta con ambos, para este caso se usará el que tiene ambas (Figura 3.25a) usando la terminal normalmente abierta con una resistencia de $10k\Omega$ (Figura 3.24.), que tiene la funcionalidad que en la

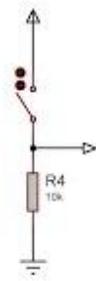


Figura 3.24 Conexión del final de carrera

Interruptor a)	
NC b)	
NA c)	

Figura 3.25 Tipos de final de carrera

entrada del PIC para obtener un 1 lógico cuando el interruptor está cerrado.

3.6.3 Fototransistor

Para el desarrollo de este sistema se implementó un fototransistor [12], que en vez de ser activado por corriente como los transistores convencionales, este es habilitado mediante un haz de luz. Por lo regular este tipo de luz es infrarroja. En la Figura 3.26 se observa que posee 3 pines de conexión que son base, colector y emisor, aunque la terminal de la base usualmente no es utilizada ya que es por donde se detecta la luz.

El fototransistor es utilizado en modo saturación para que funcione como un interruptor por lo que se le hace incidir un haz de luz proveniente de un LED infrarrojo a su máxima capacidad para conmutar el fototransistor, en la Figura 3.27, se observa el fototransistor y el LED emisor de luz infrarroja.

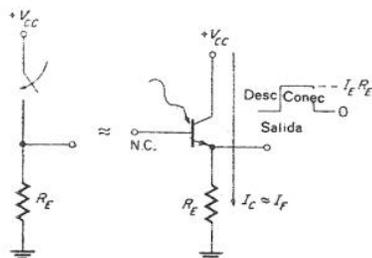


Figura 3.26 Fototransistor como interruptor óptico

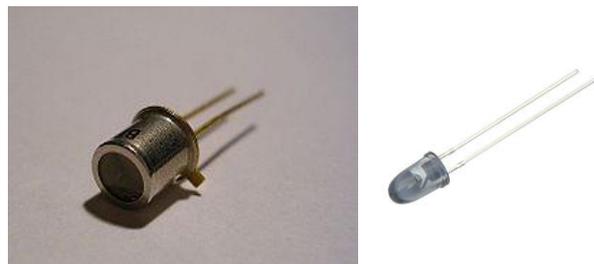


Figura 3.27 Fototransistor y led emisor de luz infrarroja

Este sensor es útil para obtener la posición inicial del motor a pasos. Al ser un motor que otorga posición en lazo abierto se debe indicar cuál es su posición inicial para saber el ángulo en el que se encuentra.

3.6.4 Sensor de distancia E18

El sensor E18 [13] es un sensor de proximidad que detecta rangos de distancia de 3 a 80 cm, posee un diodo emisor infrarrojo y un fototransistor que funciona como un interruptor evitando con ello un desgaste mecánico en comparación a cuando se usa un final de carrera. Comparándolo con el sensor Sharp que mide una distancia analógica, este solo mide voltajes lógicos de 0-5 V. Posee un tornillo el cual ajusta la distancia en que se desea conmute el interruptor para que otorgue un 1 lógico hacia el PIC. Está acoplado para enviar su señal directamente al PIC. El sensor junto con el diagrama de conexión se muestra en la Figura 3.28 donde el cable amarillo es la señal, rojo voltaje de alimentación de 5 V y negro tierra, también cuenta con dos tuercas para ajustar el sensor a una base.



Figura 3.28 Diagrama de conexión del sensor E18

3.7 Diseño de la interfaz de usuario

3.7.1 Interfaz gráfica en Visual C#.

Para realizar la interfaz de usuario y comunicar la PC con el PIC18F4550 fue necesario crear un programa en visual C# que accede a las funciones implementadas en el

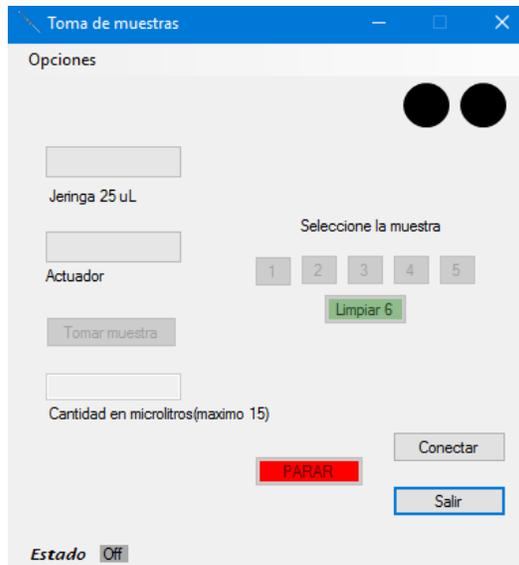


Figura 3.29 Interfaz de usuario en estado inicial

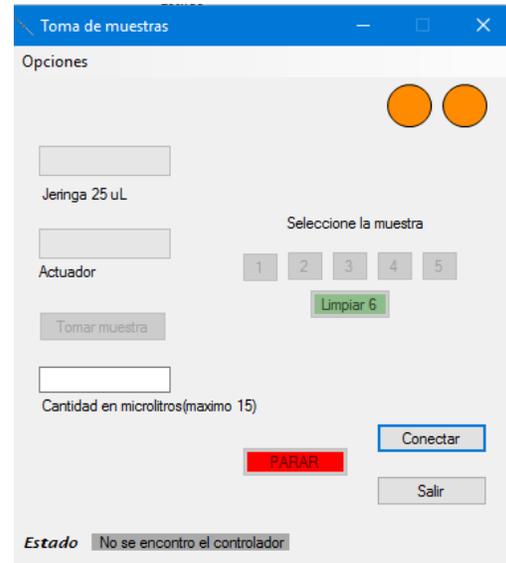


Figura 3.30 Interfaz de usuario en estado de alerta

microcontrolador. Esta interfaz de usuario fue creada de manera gráfica para hacerla amigable con el usuario, posee 9 botones, dos cajas de texto y dos barras de estado, como se aprecia en la Figura 3.29.

En la Figura 3.30 se pueden observar las 5 muestras disponibles en la indexadora y el botón limpiar, además se tiene una caja de texto que permite ingresar la cantidad a inyectar en microlitros. Este valor será recibido por el dsPIC. Se visualiza el botón conectar el cual hace que comience la comunicación y en caso de que esta no exista, debido a que el dispositivo no esté conectado o haya algún problema, se notifica al usuario que no es posible conectar por medio del texto *Estado* y los focos notificadores del programa ubicados en la parte superior derecha.

Otra característica de la interfaz es la visualización de la posición del actuador y del émbolo de la jeringa mediante dos barras de estado. También posee un botón de paro de emergencia que detiene al sistema sin importar en el estado en que se encuentre, esto es para que en caso de algún accidente el sistema no siga en marcha.

3.7.2 Comunicación PIC-PC

La interfaz de usuario se comunica con el PIC18F4550 mediante una librería llamada USBAPI. Esta librería contiene funciones para que se establezca la comunicación USB ya que interactúa con librerías de la PC para comunicarse mediante el protocolo USB.

A continuación, se describen las funciones que se utilizan:

```
public void OpenPipes()
```

Esta función es la encargada de abrir la comunicación al enlazar el product identifier device (PID) y vendor identifier device (VID) del PIC y se utiliza cada vez que se desea recibir o enviar datos.

```
public void ClosePipes()
```

Al terminar la comunicación siempre se debe cerrar el protocolo y esto se realiza con esta función.

```
private void SendPacket(byte* SendData, DWORD SendLength)
{
    uint SendDelay = 1000;

    DWORD SentDataLength;

    OpenPipes();
    _MPUSBWrite(myOutPipe, (void*)SendData, SendLength, &SentDataLength,
SendDelay);
    ClosePipes();
}
```

La función SendPacket(byte* SendData, DWORD SendLength) se utiliza para enviar un paquete de datos, que se muestra en la parte superior. En esta se define el dato que se desea enviar y su tamaño, e internamente hace referencia a otra función _MPUSBWrite. Esta función a su vez, hace mención al tamaño del dato y un tiempo de retardo si no se da una comunicación entre el PIC y la PC. Y como se mencionó con anterioridad se puede ver la función ClosePipes() al terminar la comunicación.

```
public void ReceivePacket(byte* ReceiveData, DWORD* ReceiveLength)
{
    uint ReceiveDelay = 1000;

    DWORD ExpectedReceiveLength = *ReceiveLength;

    OpenPipes();
    _MPUSBRead(myInPipe, (void*)ReceiveData, ExpectedReceiveLength,
ReceiveLength, ReceiveDelay);
    ClosePipes();
}
```

La función ReceivePacket(byte* ReceiveData, DWORD* ReceiveLength) al igual que la función enviar tiene los mismos parámetros a excepción de que el dato a recibir es un puntero, el cual es un punto que destaca, debido a que si no se especifica dicho puntero no se podrán recibir datos.

Para que el sistema funcionara adecuadamente se diseñó una máquina de estados la cual se muestra en la Figura 3.31. Para poder pasar de un estado a otro se deben cumplir ciertas condiciones de entrada en el PIC por lo que se implementaron finales de carrera y un sensor

de distancia para saber en qué posición se encuentra el actuador, el motor a pasos y el motor de DC.

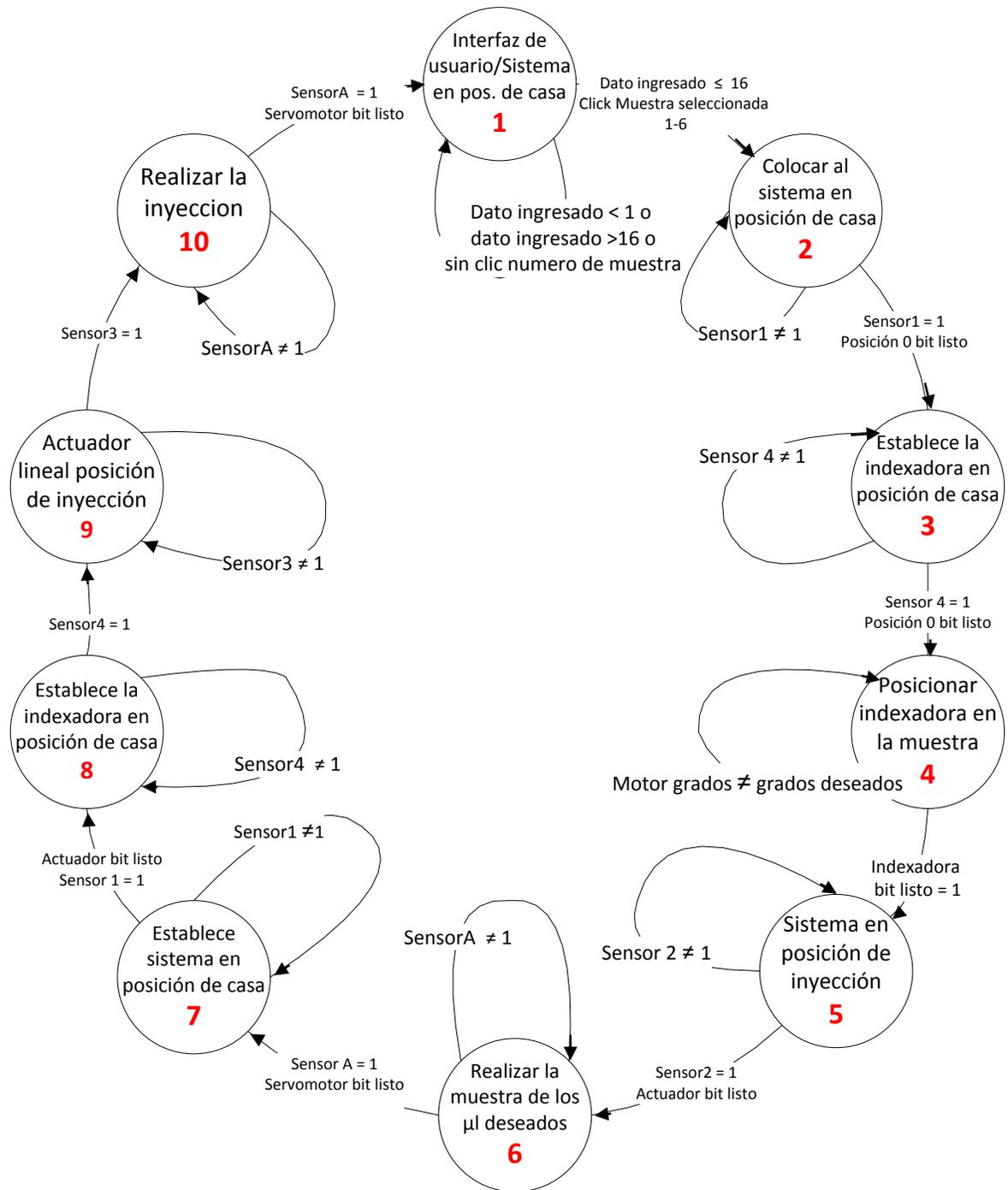


Figura 3.31 Diagrama de estados del sistema

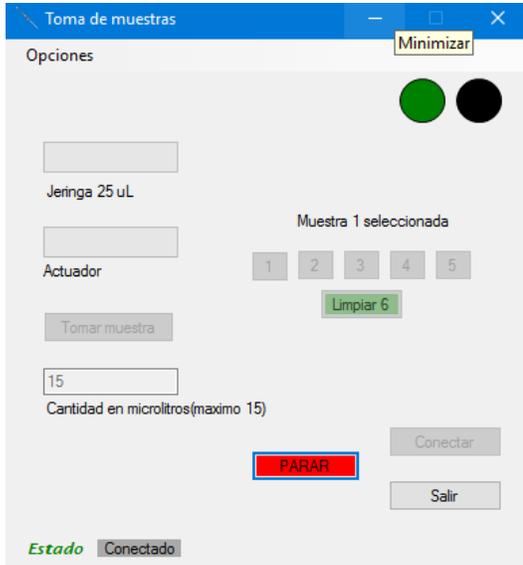


Figura 3.32 Interfaz realizando la toma de muestras

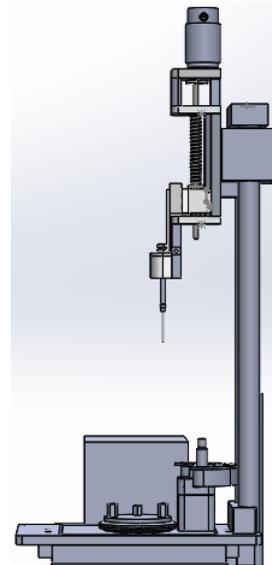


Figura 3.33 Posición de casa del sistema de toma de muestras

Este diagrama consta de 10 estados, donde en cada uno el PIC realiza las funciones que le sean ordenadas. A continuación, se presentan todos los estados y las actividades que se realizarán en cada uno.

Estado 1. El usuario debe ingresar el número de muestra y la cantidad en microlitros. El dato debe ser menor o igual a la cantidad admitida por la máquina que es de 16 μ l, como se muestra en la Figura 3.32 una vez ingresado y dando clic al número de muestra el sistema proseguirá con el segundo estado.

Estado 2. El actuador expulsa su émbolo para llevar el bloque de soporte, que carga al sistema de toma de muestras, a la parte superior (posición de casa) y con ello dejar libre la indexadora, como se muestra en la Figura 3.33. Para saber que este estado se ha cumplido el PIC enviará una señal proveniente de un final de carrera a la PC (sensor1) y con esto se sabe que la máquina se encuentra en la posición de casa, colocado en la parte superior. Una vez que esta señal es enviada a la PC se podrá avanzar al tercer estado (se hace esto en caso de que cuando el sistema se encienda y no esté en esta posición pueda establecer su posición inicial).

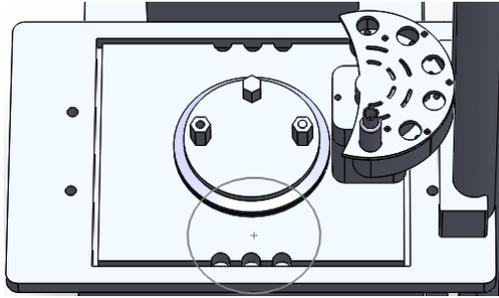


Figura 3.34 Posición de casa de la indexadora(vista aérea)

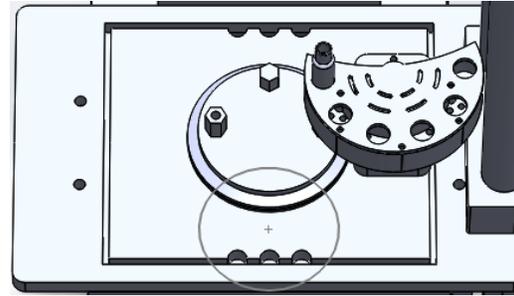


Figura 3.35 Indexadora en posición de toma de muestra

Estado 3. El motor a pasos acoplado a la indexadora puede estar en cualquier posición al iniciarlo, debido a que es un elemento que se controla en lazo abierto. Es por ello que en el estado 3 la posición inicial del motor a pasos se obtendrá mediante un fototransistor y un fotodiodo (sensor 4). El motor a pasos rotará hasta alcanzar dicha posición (Figura 3.34), conseguida la posición de casa de la indexadora o inicial se enviará un 1 lógico del PIC a la PC para poder acceder al estado siguiente.

Estado 4. El motor a pasos rota los grados donde encuentra la muestra deseada para que la jeringa quede en una posición coincidente con el vial (Figura 3.35). Una vez que el PIC termine de enviar la secuencia de pasos requeridos, el sistema pasará al estado

5 mediante un bit enviado a la PC que indica que se ha alcanzado los grados deseados y con ello se ha cumplido el estado actual.

Estado 5. El actuador lineal se activa para que el sistema de toma de muestras baje y se posicione para la toma de muestra. Mediante el sensor de proximidad E18 se sabe que se ha completado este estado, por lo que es enviada una señal al PIC conseguida la posición de inyección. Esto se puede observar en la Figura 3.36.

Estado 6. Se envía el *setpoint* de los microlitros deseados al dsPIC desde el PIC. El dsPIC activa el control del motor del sistema de toma de muestras mediante un bit de control proveniente del PIC. También el dsPIC recibe mediante otro bit qué tipo de control ejecutará, que en este caso es el control con parámetros de ganancia bajos correspondiente a la toma de muestras lenta. Una vez que el motor haya llegado a la posición como se muestra en la Figura 3.37, el dsPIC mediante la señal analógica el

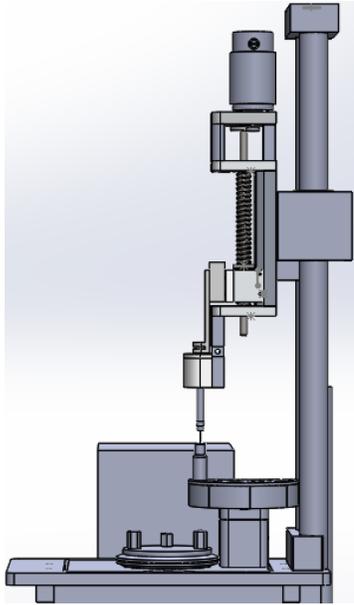


Figura 3.36 Sistema en posición de toma de muestras

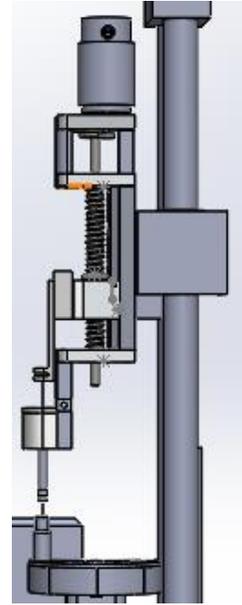


Figura 3.37 Máquina durante la toma de muestras

sensor de distancia, enviará un dato al PIC y a su vez este un dato a la PC para pasar al siguiente estado.

Estado 7. Se desactiva el control del motor del sistema de toma de muestras debido a que no es necesario mantener energizado al motor por la naturaleza del husillo que mantiene la posición, por lo que se establece nuevamente el sistema de toma de muestras en la posición de casa (Figura 3.38). Una vez completada esta función el sistema prosigue con el estado 8.

Estado 8. La indexadora retorna nuevamente a su posición de casa para que el sistema pueda bajar a la posición de inyección (Ver Figura 3.34).

Estado 9. El actuador posiciona al sistema de toma de muestras, pero esta vez en la posición de inyección para que la jeringa llegue al contenedor de sensores. Dicha posición es conseguida mediante un segundo final de carrera situado en la parte inferior del actuador como se muestra en la Figura 3.39. Activado este interruptor se notifica a la PC que se ha conseguido completar este estado para avanzar al siguiente.

Estado 10. Se activa nuevamente el motor del sistema de toma de muestras, pero esta vez con un parámetro de control que aumenta su velocidad para realizar la inyección en la cámara de medición a una velocidad de aproximadamente 15 cm/s (Figura 3.40) para posteriormente regresar al estado 1.

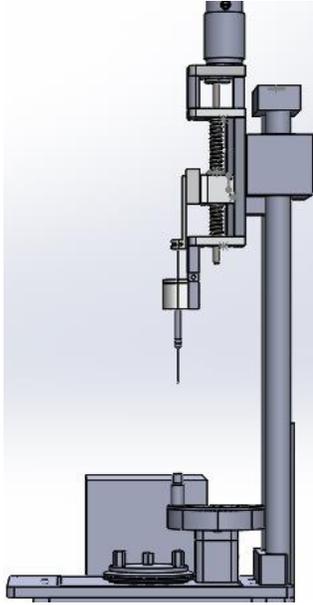


Figura 3.38 Posición de casa del sistema de toma de muestras durante la toma de muestra

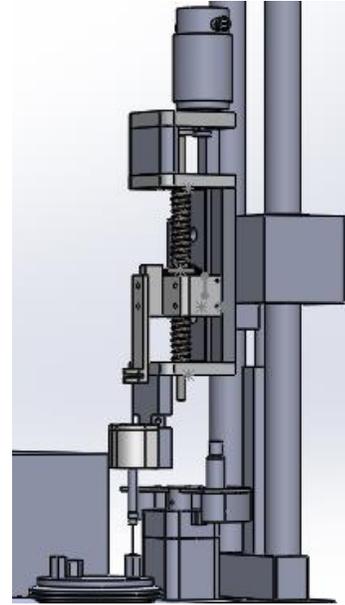


Figura 3.39 Posición de inyección

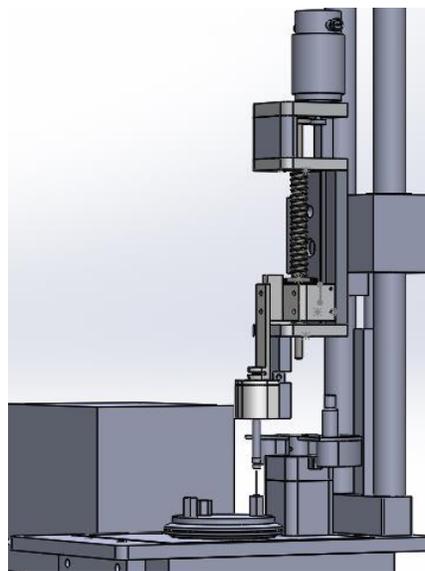


Figura 3.40 Inyección de la muestra
nótese que el embolo ha bajado

En cada estado a excepción del primero, la PC espera a que el PIC le indique que se encuentra listo para la siguiente función, este se considera un estado intermedio donde lo

único que hace la PC es esperar. Esto se hace por si se desea detener el sistema en caso de emergencia y la computadora no se mantenga ciclada.

Definidos tanto los actuadores, el diseño y los sensores a utilizar, solo queda la construcción definitiva del sistema, maquinando en piezas de aluminio y mediante impresiones en 3D, que se mostrara en el siguiente capítulo.

CAPÍTULO

4 Fabricación del prototipo



La siguiente etapa después de haber realizado el diseño de la etapa mecánica, la de potencia, el algoritmo de control y el diagrama de estados, fue la implementación de todos ellos en la máquina de manera física. Todo el prototipo se maquinó según el modelo diseñado en SolidWorks. La Figura 4.1 es la vista general del sistema, mostrando después cada uno de sus componentes por separado.

4.1 Fabricación

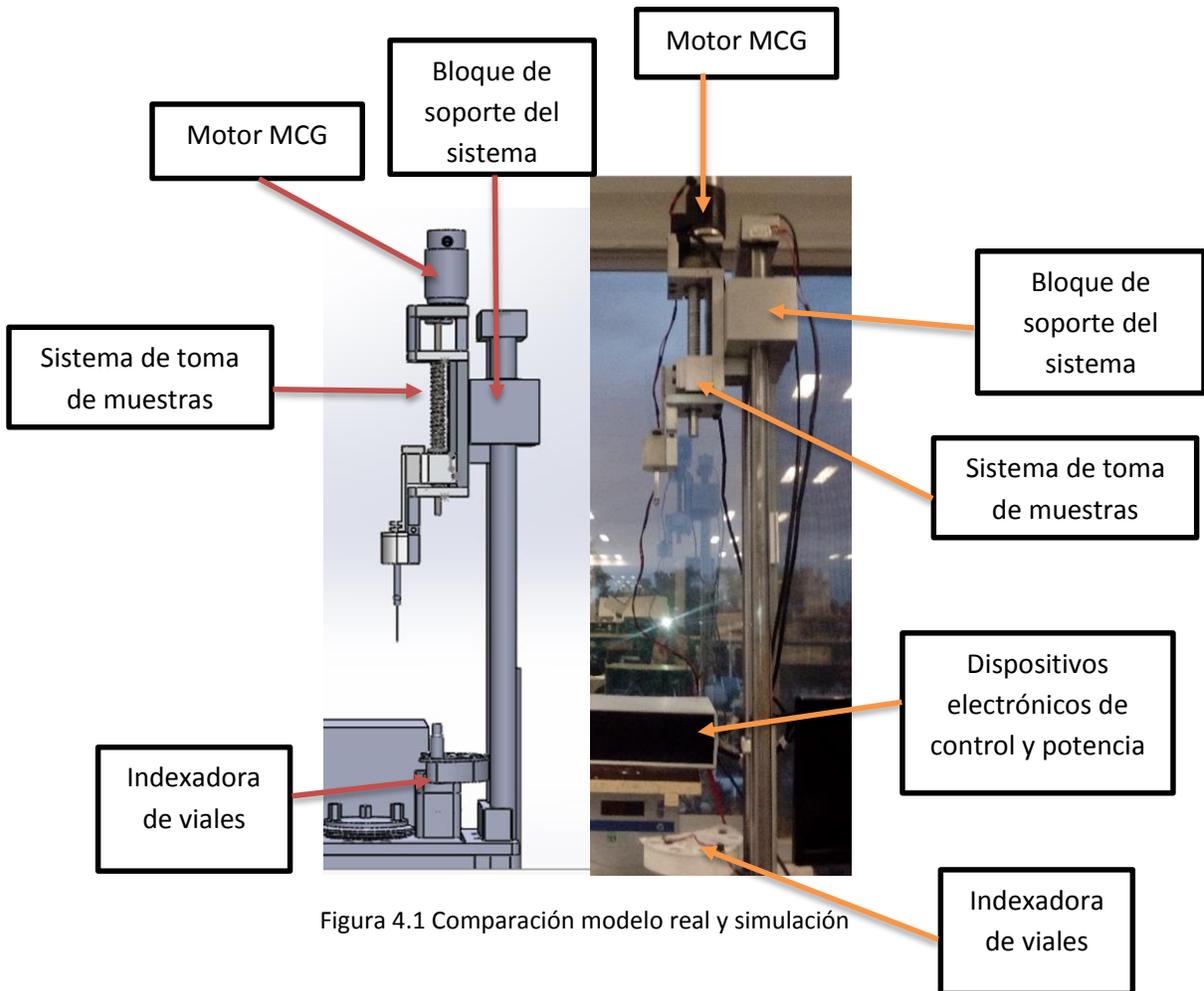


Figura 4.1 Comparación modelo real y simulación

Para posicionar el sistema de toma de muestras, fue necesario utilizar un bloque de aluminio sólido. Como se ha mencionado con anterioridad, carga el sistema de toma de muestras y posee un acoplamiento que va hacia el actuador lineal, permitiendo situarlo en la posición de casa, en la de toma de muestra y en la de inyección. Todo el bloque, como se muestra en la Figura 4.2, corre a través de unas guías de acero mediante dos baleros lineales.

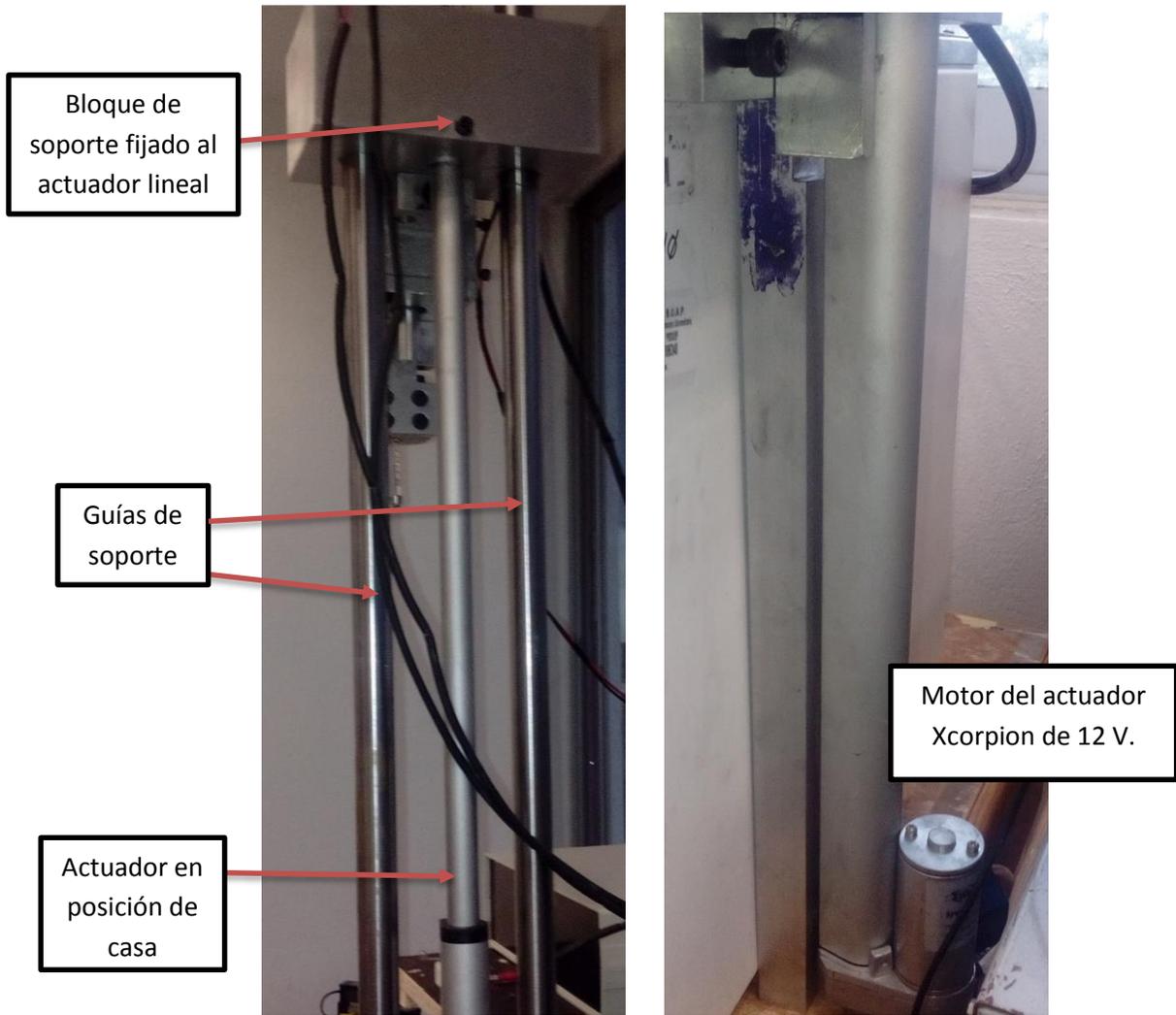


Figura 4.3 Sistema lineal en conjunto con el actuador lineal

Los finales de carrera son los que indican al PIC que el sistema se encuentra en la posición deseada, en la Figura 4.3 se muestra uno de ellos.



Figura 4.2 Implementación de los finales de los finales de carrera.

También fueron maquinados los engranes (Figura 4.4) mencionados con anterioridad en naylamid, estos son de modulo uno (relación del diámetro primitivo y numero de dientes) debido a que se utilizó la norma milimétrica. El pequeño posee 12 dientes y el grande 36 que al ser acoplados se obtiene una reducción de 3:1. En la vista de la Figura 4.5 se visualiza



Figura 4.4 Engranes módulo 1 hechos de naylamid con relación de 1:3.

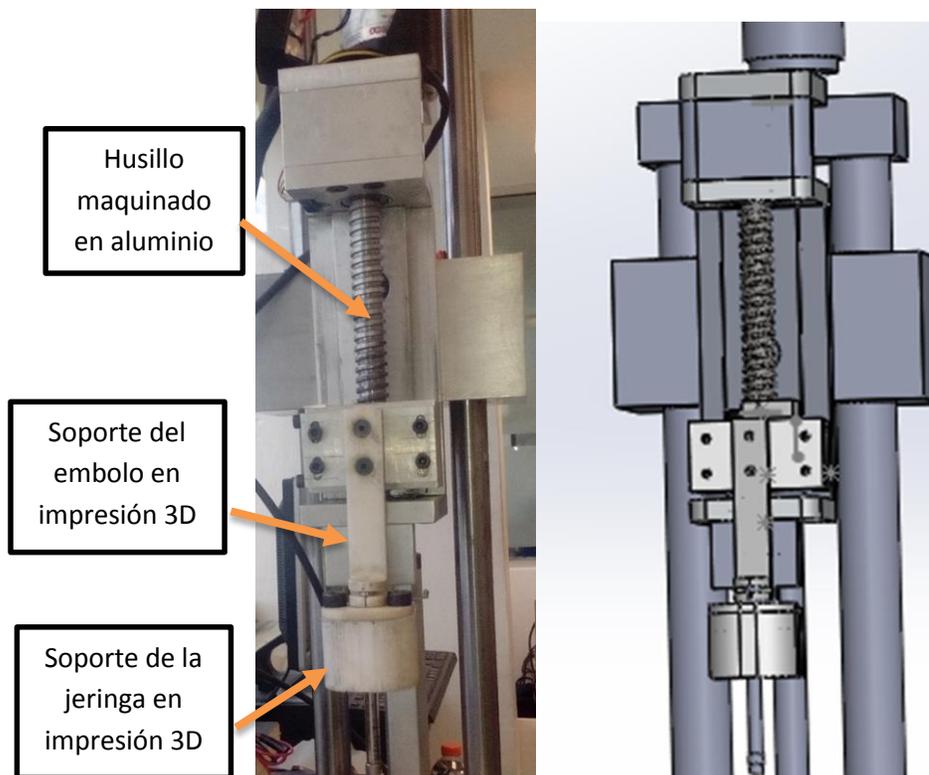


Figura 4.5 Parte frontal del sistema de toma de muestras

la parte frontal del husillo y el soporte de la jeringa, así como también el soporte del émbolo. Como se nota ambas piezas fueron hechas en impresión 3D.

Para realizar el soporte de la jeringa se midió su émbolo para tener una exactitud en el punto final al que el émbolo llega y evitar con ello que la jeringa se destruya por exceder la carrera maxima.

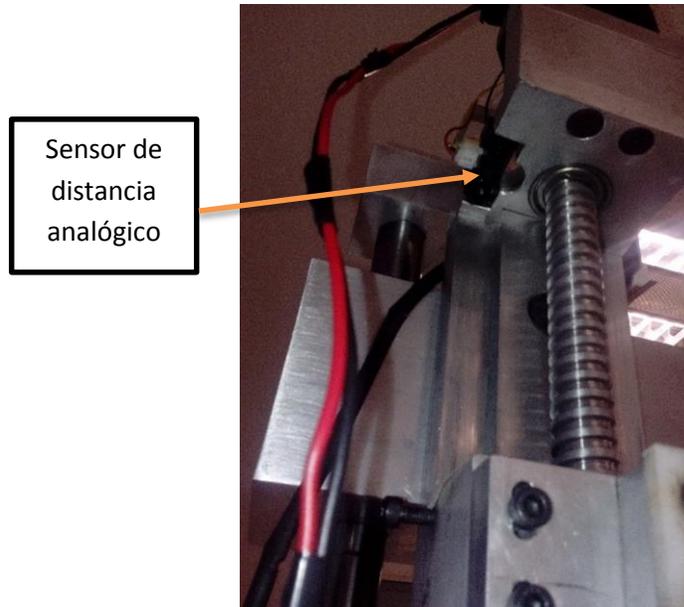


Figura 4.6 Sensor de distancia analógico implementado en el sistema de toma de muestras.

Una parte importante en el sistema es el sensor analogico de distancia (sharp GP2Y0A41SK0F), que fue colocado de tal forma que pudiera medir el desplazamiento del carro, quedando fijo en una de las tapas donde se encuentra el balero que hace que rote el husillo mostrado en la Figura 4.6. Un aspecto importante del sensor es que se tuvo que acoplar su señal con una etapa de filtrado y amplificación, para tener un rango de resolución mayor en la señal adquirida por el dsPIC. Donde en primera instancia se implementó un amplificador restador y después de este un circuito pasa bajas para eliminar el ruido que el sensor posee por defecto, que es de aproximadamente 12 Khz. El sensor posee un ruido extra al anterior, al exceder la resolución admitida comienza a oscilar en los rangos menores a los que puede medir, por lo que se eligió la frecuencia de corte del filtro de 7 Hz para eliminar ambos ruidos. Este filtro se realizó mediante la ecuación 4.1:

$$f_c = \frac{1}{2\pi RC} \rightarrow \frac{1}{7(2\pi)} = RC \dots\dots\dots 4.1$$

Donde C= 1 μF, y R=22 kΩ

Para obtener el voltaje simétrico de +/- 6 V desde una fuente de 12 V, se tuvo que dividir en dos la fuente mediante un arreglo de dos resistores y dos capacitores, en un futuro próximo se desea realizarlo con transistores y un circuito impreso, el circuito fue hecho en una placa perforada como se muestra en la Figura 4.7.

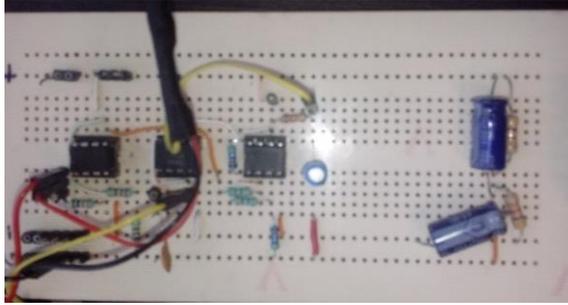


Figura 4.7 Acoplamiento de la señal mediante amplificadores operacionales.

La etapa de selección de muestras que se observa en la Figura 4.8, fue implementada mediante una indexadora circular con barrenos posicionados en ángulos iguales, fue hecha en impresión 3D, esto redujo el peso para que el motor no se forzara al rotar. Puede notarse a diferencia de la simulación sobresalen unos cables, estos cables van a un fototransistor que al rotar queda emparejado con el led emisor de luz infrarroja, el PIC interpreta la señal como el punto inicial de la indexadora (posición de casa).



Figura 4.8 Indexadora implementada en la tapa de la cámara térmica

En cuanto a la parte de control mediante el PIC18F4550 y el dsPIC30F4011 se implementó la tarjeta de desarrollo genérica creada por académicos de la BUAP, estas tarjetas son muy útiles por que poseen varios pines para la salida de los puertos, LEDs superficiales, modulo USB, puertos para PWM y lectura analógica, dos pulsadores, un *master clear* y zócalos para hacer comunicación I2C y son utilizadas tanto para el dsPIC, como para el PIC. Siendo esta

tarjeta diseñada solo para el PIC18F4550, se realizaron algunos ajustes para que trabajara con el dsPIC30F4011, ambas tarjetas se visualizan en la Figura 4.9.

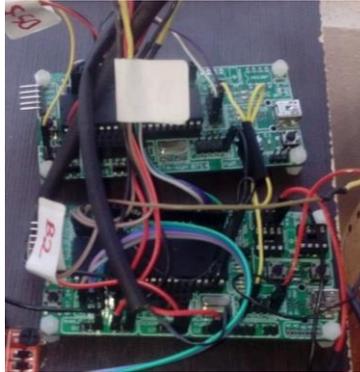


Figura 4.9 Tarjeta de desarrollo del PIC y del

En cuanto la etapa de potencia como se mencionó con anterioridad, se utilizaron dos puentes H (L298) para el actuador y para el motor a pasos, como se observa en la Figura 4.10. Uno de ellos fue alimentado con la alimentación del PIC y el otro mediante el regulador de voltaje interno que posee el mismo dispositivo.



Figura 4.10 Puente H del actuador y del motor a pasos

Otra de las etapas de potencia es la del motor de escobillas correspondiente al sistema de toma de muestras, que fue hecha con transistores *MOSFET*, diodos de protección, optoacopladores y disipadores como se aprecia a en la Figura 4.11.

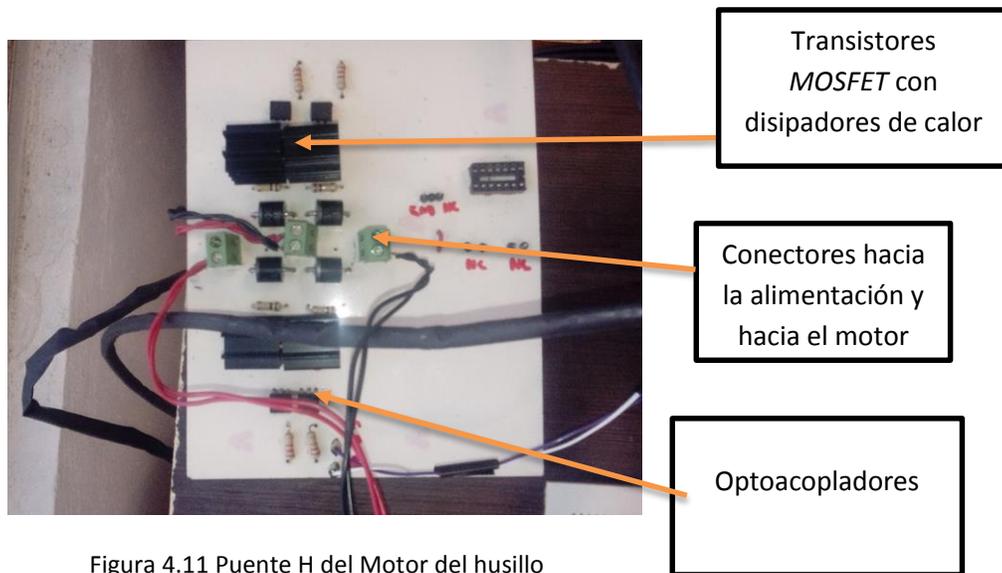


Figura 4.11 Puente H del Motor del husillo

Todas las tarjetas se construyeron de acuerdo a los diagramas mostrados en el capítulo 3. Debido a la gran cantidad de cables que se tiene de parte de los sensores, del motor, del PIC, de las etapas de potencia, se decidió colocar todos los componentes eléctricos en una caja especial Figura 4.12, donde se acomodó de tal forma que quedarán en un espacio reducido y no estorbara al usuario, también se situó ahí debido a que el sistema térmico trabaja con agua y con esto evita un corto circuito.



Figura 4.12 Caja portadora de circuitos electrónicos

CAPÍTULO

5 Resultados y conclusiones.



Una vez que el sistema de toma de muestras en complemento con la indexadora de viales y el sistema lineal fueron implementados de manera física, se iniciaron las pruebas para sintonizar el control y así obtener los microlitros requeridos por el usuario. Verificando los resultados con pruebas mostradas en esta sección.

5.1 Resultados

Efectuando los siguientes pasos el usuario puede adquirir la muestra que desee a partir de 1 hasta 16 μl .

La interfaz en principio se encontrará deshabilitada (Figura 5.1). Para activar la interfaz el usuario deberá iniciar la comunicación mediante el botón conectar. También se deben conectar las fuentes de alimentación del sistema, la fuente de 12 V correspondiente al motor a pasos y del actuador, la fuente de 18 V del motor de escobillas, la alimentación de 5 V USB para el dsPIC30F4011 y el PIC18F4550 y la fuente de 12 V independiente del sensor de posición analógico.

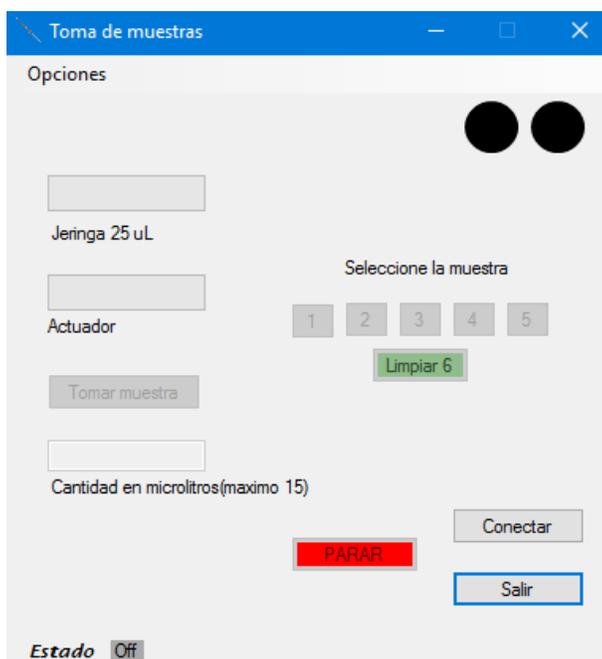


Figura 5.1 Estado inicial de la interfaz

Una vez que el sistema se ha conectado se habilitarán los botones en la interfaz. El usuario debe ingresar un valor valido desde 1 hasta 16 microlitros haciendo clic en el número de

muestra que se requiera, de lo contrario el sistema no tomara ninguna muestra (ver Figura 5.2, donde se muestra la pantalla cuando se ingresó un número mayor a 16).

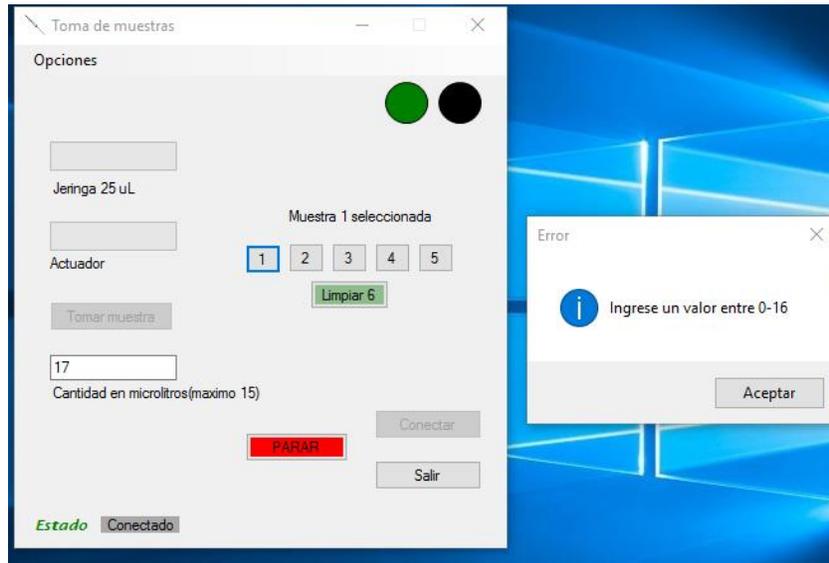


Figura 5.2 Interfaz de usuario.

Realizado esto, la interfaz comenzará con la secuencia del proceso, la cual iniciará en la posición de casa del sistema de toma de muestras, posicionará la indexadora en la muestra requerida, bajará para tomar la muestra de la indexadora, regresará a su posición de casa, retornará la indexadora en su punto inicial, bajará a la posición de inyección, realizará la inyección y regresará a su posición de casa nuevamente (refiérase al diagrama de estados Figura 3.22). Este es un proceso repetitivo para tomar una muestra de una cierta cantidad. Un aspecto importante de mencionar es que el sistema no estará habilitado para tomar otra muestra si se está realizando un proceso. Únicamente estará habilitado el botón *PARO* para que el sistema sea desactivado en caso de ocurrir un accidente y el botón *SALIR* tiene la misma función que el botón *PARO* aunado a la función que finaliza el programa.

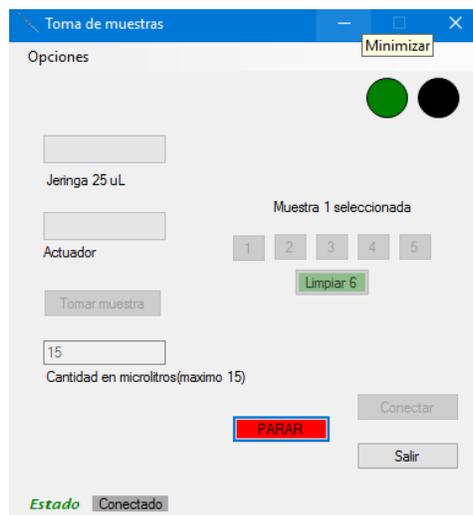


Figura 5.3 Interfaz realizando la toma de muestras

Una vez realizado todo este proceso el usuario obtiene una muestra dentro de la jeringa en microlitros. Para comprobar que realmente el usuario obtiene esta muestra, se realizaron dos experimentos, el primero mediante observación donde se revisa que el embolo de la jeringa llegue a la posición marcada por las divisiones que posee la jeringa y el segundo es pesando la muestra para saber su volumen dado en litros y en relación con su densidad.

La respuesta del sistema en la toma de muestra de 16 μl con una resolución de 2.5 V por cuadro en el osciloscopio hecha por el sensor de distancia se observa en la Figura 5.4.

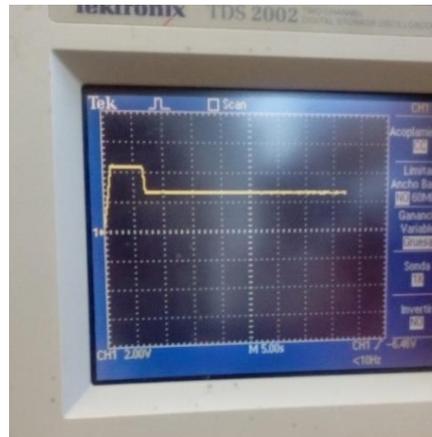


Figura 5.4 Respuesta del sensor durante la toma de muestras

Y la respuesta para la inyección con la misma resolución, pero para 5 μl , es la que se visualiza en la Figura 5.5:

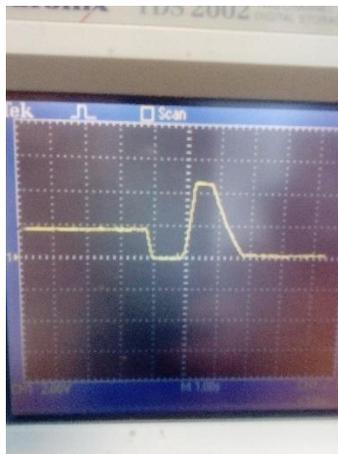


Figura 5.5 Respuesta del sensor en la inyección

La condición ambiental al hacer estas pruebas fue a una temperatura ambiente de 27 °C, una humedad menor al 90 %, tomando una muestra de alcohol etílico con una densidad de

0.8 g/ml y un vial cuyo peso es de 8339 mg. Estas mediciones fueron realizadas a partir de las 2:00 pm del día 27 de Julio del 2016.

Primera prueba de verificación del sistema

La tabla 5.1 muestra la cantidad en microlitros deseada (color naranja) y el número de prueba (color verde), dando como resultado la cantidad obtenida. Se verificó que el resultado fuera el correcto observando que el embolo llegara a la cantidad requerida, con un total de 160 pruebas (10 pruebas por microlitro) para comprobar el resultado. La resolución de la jeringa es de 0.25 μL por división, por lo que para la medida mayor se tiene un porcentaje de error del 1.5625% y para el menor se tiene un error del 25%. Sin embargo, la medida de 1 microlitro no será utilizada, sino a partir de 5 μl por lo que se tiene un error del 5% para este caso. Cabe señalar que este error mecánico se debe a la resolución del sensor analógico Sharp debido a que su resolución no es tan óptima para distancias menores a 1 mm En esos rangos aparece un ruido, es por ello que fue implementado el filtro mencionado en el capítulo 3, siendo casi eliminado por medio del dsPIC. Sin embargo, existen distancias en las cuales este ruido se hace presente y da como resultado dicho error, por lo que el usuario debe considerar revisar la muestra antes de tomarla para que en caso de que se dé esta toma errónea el usuario tome en cuenta realizar nuevamente la muestra. Dicho error puede evitarse utilizando un sensor con mayor resolución.

Cantidad en μl	Número de prueba(verde)-cantidad obtenida μL									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
2	2	2	2	1.75	2	2	2	2	2	2
3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4
5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	4.75
6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6
7	7	7	7	7	6.75	7	7	7	7	7
8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8
9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9
10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10
11	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11
12	12	12	12	12	12	12	11.75	12	12	12
13	13	13	13	13	13	13	13	13	13	13
14	14	14	14	14	14	14	14	14	14	14
15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15
16	16	16	16	16	16	16	16	16	16	16

Tabla 5-1 Primera prueba de verificación

Segunda prueba de verificación del sistema

Esta prueba requiere de un vial para medir el peso del componente, para cada medición el vial debe ser lavado con acetona. Fue necesario utilizar una báscula graduada en miligramos para obtener el volumen en μl . Debido que la masa es proporcional a la densidad es posible expresarla con la ecuación 4.1

$$m = \rho v \quad 4.1$$

Donde m es la masa, ρ es la densidad y v es el volumen. En el caso particular del alcohol etílico ρ es $0.0008\text{g}/\mu\text{l}$.

Se sabe que el vial tiene un peso y si se aplicara directamente la fórmula se tendría el peso del vial más el peso de la muestra obteniendo así un resultado erróneo, este peso no debe ser considerado. Un beneficio que tiene la báscula es que es posible reestablecer su referencia aun teniendo un objeto encima. Por tal motivo se estableció la referencia colocando el vial en la charola de la báscula sin la muestra, dando 0 mg con el vial arriba (ver Figura 5.6).



Figura 5.6 Vial en la báscula

Se hicieron mediciones para 1,2,3,4,5,10 y 15 μl siendo las necesarias para comprobar el funcionamiento.

Primero se hicieron 10 mediciones de 1 μl teóricamente obteniendo 8 mg de acuerdo a la ecuación 4.1 ($1 \mu\text{L} \times 0.0008 \text{ g}/\mu\text{l}$). En la tabla 5.2 se observa la cantidad de microlitros y el peso en miligramos de esa cantidad.

La Figura 5.7 muestra una medición de 8 mg correspondiente a una medición de 10 μl y la Figura 5.8 la correspondiente a una muestra de 5 μl .

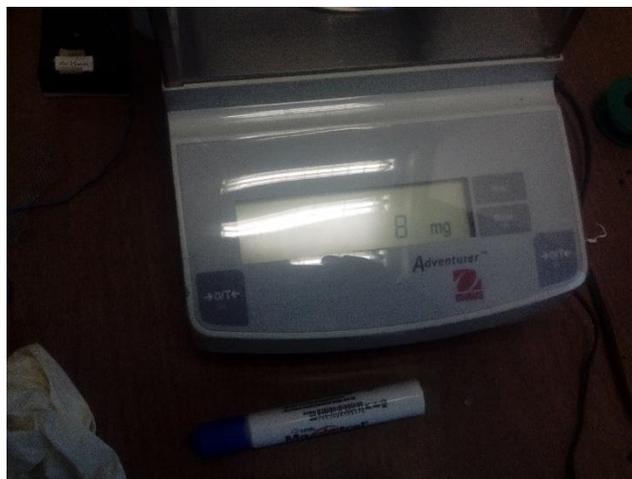


Figura 5.7 Medición de 1 μl

Recordando que la densidad es de **0.0008 g/ μl** , entonces tomando 10 muestras de 1 μl la suma sería **0.008 g** y de igual manera para 5 muestras de 2 μl dio como resultado **0.008 g**,

Número de muestra.										Relación en gramos.
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
1 μl	1 μl	1 μl	1 μl	1 μl	1 μl	1 μl	1 μl	1 μl	1 μl	0.008 g
2 μl	2 μl	2 μl	2 μl	2 μl						0.008 g
3 μl	2 μl	3 μl	2 μl							0.008 g
4 μl	4 μl	2 μl								0.008 g
5 μl	5 μl									0.008 g
10 μl										0.008 g
15 μl										0.012 g

así mismo sumando la cantidad 3 μl , 2 μl , 3 μl y 2 μl da como resultado **0.008 g**, y de manera subsecuente para los demás resultados vistos en la tabla 5.2

Tabla 5-2 Medición de la densidad



Figura 5.8 Medición de 5µl

En cuanto a la tabla 5.1 se observa que en tres ocasiones se obtuvo un resultado con un error de 0.25 µl, sin embargo, se considera aceptable, ya que en 160 muestras solo hubo 3 con ese error.

De la tabla 5.2 cabe destacar que la báscula tiene una precisión de 1 mg, no es posible medir con exactitud la resolución del sistema. Dentro de la prueba realizada se obtuvieron resultados satisfactorios, aunque se requiere realizar más mediciones para comprobar dicha resolución.

Siendo así, la máquina tiene un error de $100\% \frac{157}{160} \times 100 = 1.85\%$ en la toma de muestras también el operador puede considerar desechar esa muestra y tomar una nueva en caso de que requiera una precisión mayor al 5 %.

5.2 Conclusiones y trabajos futuros

En el presente trabajo se diseñó y construyó un sistema de toma e inyección de muestras de compuestos volátiles orgánicos en el rango de microlitros para la caracterización de sensores de gas.

Se diseñaron 3 prototipos, se analizaron las ventajas y desventajas de cada uno y como conclusión de ese análisis se implementó el tercero, eligiendo éste debido al costo de construcción y a la reducción de los componentes utilizados en comparación con los

anteriores. Este prototipo se diseñó de tal manera que el espacio de trabajo fuera el óptimo para evitar que estorbe al usuario en caso de no utilizarse. Se realizaron los planos mecánicos para poder construirlo y fue maquinado en torno y fresa, las guías fueron maquinadas en un torno, así como también el husillo con un paso de 6 mm por hilo para el avance requerido, también fueron maquinados la tuerca de la mesa y el barreno de la tapa de la base. En cuanto al soporte de las guías la tapa superior de las guías, el bloque que soporta el sistema de toma de muestras, la mesa, las tapas del sistema de toma de muestras, y sus piezas anexas fueron maquinadas en una fresadora.

Antes de la construcción se determinaron algunas características tales como el modelo matemático de un motor de corriente directa que proporciona parámetros importantes para ejecutar el control en el sistema mecánico. También se analizó el comportamiento de un motor a pasos que es controlado en lazo abierto, así como su funcionamiento para que pudiera ser implementado en la máquina. Otro tópico el cual fue de suma relevancia fue el estudio de los actuadores lineales ya que se implementó un actuador lineal eléctrico, que básicamente es un motor de CD con un reductor lineal.

También se realizaron impresiones en 3D del porta-jeringas, la indexadora de muestras, el soporte del émbolo y el soporte del motor a pasos. Dichas piezas son de plástico y fueron fijadas al sistema con tornillos M10 y M6.

Una vez construido el sistema, se armó toda la máquina de toma de muestras con tornillos de estándar milimétrico de 5 mm, 6 mm, 8 mm, también llamados M5, M6, M8 y M10 teniendo diferentes longitudes.

En cuanto a la parte de potencia se realizó un circuito impreso para montar el puente H que fue diseñado exclusivamente para el motor de escobillas. De igual manera para el motor a pasos y el motor del actuador se implementó una etapa de potencia hecha con el integrado L298.

Colocados todos los sensores se realizó el programa en el PIC para poder conectar cada uno de ellos. Se conectó la etapa de potencia del motor a pasos y la del actuador eléctrico lineal al PIC, en cuanto al motor de escobillas se conectó su etapa de potencia al dsPIC.

Teniendo conectado todo el sistema eléctrico y armado el sistema mecánico se procedió a realizar el control del sistema de toma de muestras, realizando una conversión entre voltaje medido y distancia-microlitros.

Se sintonizó el control de manera manual variando los parámetros K_p y K_d del control PD por lo que se realizaron pruebas hasta que el controlador llegara a la posición deseada, se sintonizaron dos ganancias de control para la toma de muestra e inyección.

Terminada la sintonización se procedió a realizar la comunicación del PIC y la PC para enviar y recibir datos mediante la interfaz de usuario por lo que se implementó un protocolo de comunicación BULK transfer USB mediante el PIC y la PC usando la librería USBAPI y el controlador USB mpusbapi.dll.

Una vez implementado el protocolo se realizó un diagrama de estados para realizar el proceso secuencial de toda la máquina para hacer la toma de muestra de un componente en específico y una cierta cantidad en microlitros de 1-16 μl .

Con el proceso secuencial en marcha para la toma de muestras e inyección se procedió a realizar las pruebas de funcionamiento, que fueron de dos tipos: verificación visual de la posición del émbolo en la toma de muestra e inyección de varias dosis y verificación del peso final de la muestra. En la primera prueba se observó que la mayoría de las veces se llegó al valor deseado con un error de 0.25 μl en 4 de 160 mediciones lo cual nos da una reproducibilidad del 97.5 %. Esto se corroboró con la segunda prueba, en donde el peso obtenido estuvo en concordancia con los valores esperados. Por lo tanto, se puede decir que esto es un gran avance para haber sido el primer prototipo creado para este tipo de actividades.

Se observó que es posible tomar muestras en cantidades pequeñas con una alta resolución y que es suficiente por el momento para el laboratorio de desarrollo de sensores de la Facultad de Físico Matemáticas de la BUAP.

En un futuro se planea mejorar el control para aumentar la precisión del sistema, también se planea construir un mecanismo más pequeño, aunque con las mismas funcionalidades, realizando un análisis de los requerimientos del microcontrolador y del software se puede utilizar solo uno en lugar de los dos que actualmente se tienen dos.

6 Referencias

- [1] Hamilton Syringes, «Syringe and Needle Catalog,» 31 Julio 2016. [En línea]. Available: <http://www.hamiltoncompany.com/products/syringes-and-needles>. [Último acceso: 31 Julio 2016].
- [2] UCLA, «UCLA,» 1 Abril 2016. [En línea]. Available: <http://www.chem.ucla.edu/~bacher/General/30BL/gc/theory.html>. [Último acceso: 31 Julio 2016].
- [3] J. J. TAFOYA SANCHEZ, «Dspace,» [En línea]. Available: <http://itzamna.bnct.ipn.mx/dspace/handle/123456789/10320>. [Último acceso: 31 7 2016].
- [4] A. Hughes, Electric Motors and Drives Fundamentals Types and applications, Grain Britain: Newnes, 2006.
- [5] M. M. McComb, «Microchip,» 2007. [En línea]. [Último acceso: 31 Julio 2016].
- [6] «Todorobot,» [En línea]. Available: <http://www.todorobot.com.ar/tutorial-sobre-motores-paso-a-paso-stepper-motors/>. [Último acceso: 31 7 2016].
- [7] LINAK, «LINAK,» [En línea]. Available: <http://www.linak.es/about/?id3=4283>. [Último acceso: 31 7 2016].
- [8] M. T. Incorporated, dsPIC30F4011/4012, USA: Microchip, 2005.
- [9] K. Ogata, Ingenieria en control moderna, Madrid: Pearson, 2010.
- [10] «sharp-world,» Sharp, 23 11 2016. [En línea]. Available: http://www.sharp-world.com/products/device/lineup/data/pdf/datasheet/gp2y0a41sk_e.pdf. [Último acceso: 23 11 2016].
- [11] Microchip, PIC18F2455/2550/4455/4550 Data Sheet, USA: Microchip Technology Incorporated, 2009.
- [12] itlalaguna, «itlalaguna,» [En línea]. Available: http://www.itlalaguna.edu.mx/academico/carreras/electronica/opteca/optopdf2_archivos/unidad2tema4.pdf. [Último acceso: 31 7 2016].
- [13] hetpro-store, «hetpro-store,» [En línea]. Available: <http://hetpro-store.com/TUTORIALES/sensor-de-distancia-e18-d50nk/>. [Último acceso: 31 7 2016].

[14] Xcorpion, «Xcorpion,» [En línea]. Available: <http://www.xscorpion.com.mx/>. [Último acceso: 31 7 2016].

[15] Pololu, «Pololu,» [En línea]. Available: <https://www.pololu.com/product/2464>. [Último acceso: 31 7 2016].