

**PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ**  
**FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA**



PONTIFICIA  
**UNIVERSIDAD**  
**CATÓLICA**  
DEL PERÚ

DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN MÓDULO EDUCATIVO  
DE DEMOSTRACIÓN DE LANZAMIENTO PARABÓLICO MEDIANTE EL  
CONTROL DE MOTORES ELÉCTRICOS

Tesis para optar el Título de Ingeniero Electrónico, que presenta el bachiller:

**Arturo Segovia Cabezas**

ASESOR: Gustavo Kato Ishizawa

Lima, Enero del 2011

## RESUMEN

En el presente trabajo de tesis se diseñará e implementará un módulo educativo que mostrará la experiencia del lanzamiento parabólico de objetos. El sistema consiste en una barra acoplada a un motor eléctrico que hará que el proyectil, bola de acero, genere un movimiento circular. Al llegar la barra a cierto grado, esta es detenida y el proyectil realiza el movimiento parabólico. El módulo educativo tendrá un plano horizontal de forma circular sobre el cual impactará el proyectil. El módulo tendrá un diámetro de 1.6 metros y contará con un sistema de lanzamiento actuado por un motor de corriente continua y un motor a pasos a través de una interfaz vía computadora.

Para el desarrollo de la tesis se han planteado los siguientes objetivos: realizar el modelamiento matemático de las características estáticas y dinámicas del sistema, desarrollar la interfaz gráfica para el accionamiento, desarrollar los algoritmos de control, implementar el módulo, realizar las pruebas de evaluación y documentarlas.

El módulo educativo servirá para hacer demostraciones tanto de movimiento parabólico como demostraciones de control de motores.

## ÍNDICE

|  |    |
|--|----|
| INTODUCCIÓN .....  | 1  |
| CAPÍTULO 1   |    |
| INVESTIGACIÓN PRELIMINAR                                       |    |
| 1.1 Sistemas de control de motores .....                       | 2  |
| 1.1.1 Controlador .....  | 3  |
| 1.1.2 Driver .....   | 4  |
| 1.1.3 Actuador .....   | 4  |
| 1.2 Identificación de sistemas .....                           | 5  |
| 1.2.1 Métodos de identificación de sistemas .....              | 5  |
| 1.2.2 Proceso de identificación de sistemas .....              | 5  |
| CAPÍTULO 2   |    |
| ANÁLISIS Y DISEÑO DEL MÓDULO                                   |    |
| 2.1 Diseño general del módulo .....                            | 8  |
| 2.2 Cálculos preliminares .....                                | 9  |
| 2.3 Diseño del Hardware .....                                  | 10 |
| 2.3.1 Fuentes de alimentación .....                            | 10 |
| 2.3.2 Circuitos electrónicos .....                             | 12 |
| 2.4 Diseño del Software .....                                  | 16 |
| 2.4.1 Diseño del software en plataforma Visual Basic 6.0 ..... | 16 |

|   |    |
|---|----|
| 2.4.2 Diseño del software: Microcontrolador ATMEGA8 ..... | 19 |
| CAPÍTULO 3  |    |
| IMPLEMENTACIÓN DEL MÓDULO                                 |    |
| 3.1 Pruebas del motor DC en vacío .....                   | 23 |
| 3.2 Pruebas del motor DC con carga .....                  | 25 |
| 3.2.1 Pruebas con acople inicial .....                    | 25 |
| 3.2.1 Pruebas con acople modificado .....                 | 27 |
| CAPÍTULO 4  |    |
| PRUEBAS Y RESULTADOS                                      |    |
| 4.1 Resultado de las pruebas del motor DC .....           | 29 |
| 4.2 Resultado de las pruebas del motor a pasos .....      | 31 |
| CONCLUSIONES .....  | 32 |
| RECOMENDACIONES .....                                     | 33 |
| BIBLIOGRAFÍA .....  | 34 |
| ANEXOS .....  | 35 |

## INTRODUCCIÓN

Actualmente, para el estudio de la física, química y otras ciencias naturales en algunos colegios y universidades utilizan como medio de ensayos los denominados laboratorios virtuales. Estos laboratorios virtuales consisten en una aplicación desarrollada en algún software que permite simular distintos experimentos físico o químicos de tal forma que los estudiantes puedan experimentar de forma virtual los diferentes fenómenos físicos y químicos. Además, la operación de estos laboratorios virtuales se encuentra limitada por el comportamiento ideal del proceso. Dichos laboratorios virtuales no brindan a los alumnos una experiencia de comparación entre los fenómenos físicos reales y las teorías de los libros.

Por tal motivo, se ha considerado aplicar la electrónica en este campo de aprendizaje mediante la implementación de un módulo que basado en el control de motores eléctricos permita mostrar a los estudiantes un experimento físico real. Para el caso particular se diseñará un módulo para recrear experimentos de movimiento parabólico.

En muchos colegios, se tomaron los laboratorios virtuales debido al alto costo de tener módulos educativos para la realización de experimentos. Este desarrollo pretende demostrar que es posible implementar módulos simples y de bajo costo para la realización de experimentos.

Esta tesis busca investigar el control de motores para la implementación de un módulo de aplicación específica. La tesis presenta todos los aspectos que se tomaron en cuenta para el desarrollo del módulo y está dividida en 4 capítulos. El capítulo 1 expone los aspectos teóricos tomados en cuenta para el desarrollo del módulo. En el capítulo 2 se presenta el análisis de los requerimientos y características del sistema a controlar; y además se desarrolla el diseño del módulo. El capítulo 3 muestra y explica las etapas de implementación del módulo. Y finalmente, en el capítulo 4 se presentan las pruebas de operación realizadas al módulo y se evalúa el error para todo el rango de operación.

## CAPÍTULO 1

### INVESTIGACIÓN PRELIMINAR

#### 1.1 SISTEMAS DE CONTROL DE MOTORES

El objetivo de un sistema de control de motores eléctricos es poder controlar la dirección de giro, la velocidad y la aceleración del motor. En la actualidad existen varias tecnologías que permiten el control de motores, la diferencia entre estas radica en el grado de precisión, el nivel de procesamiento necesario y las herramientas disponibles para implementar los sistemas de control en cuestión. Estos se pueden clasificar en dos grupos sistemas: de lazo abierto y de lazo cerrado.

En los sistemas de control de lazo abierto, como se puede observar en la figura 1.1, únicamente es necesaria una señal de referencia para operar el sistema. Dicha señal será procesada por el controlador, y se envían señales de control al driver. El driver alimentará al actuador y el actuador afecta el proceso. La limitación de los sistemas de lazo abierto radica en que estos solo funcionarán correctamente bajo condiciones de operación fijas. Es decir, no son robustos ante perturbaciones. Además deben ser calibrados constantemente ya que no habrá forma de detectar una falla de calibración durante la operación del sistema.

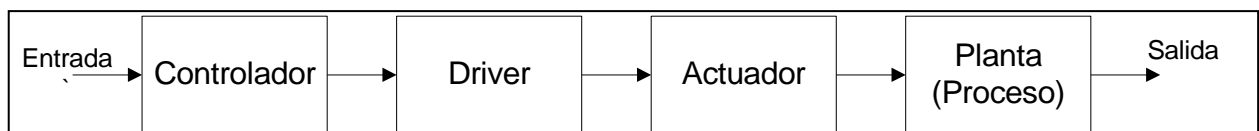


Figura 1.1: Diagrama de bloques de un sistema de control de lazo abierto

Por otra parte, un sistema de control de lazo cerrado como el que se observa en la figura 1.2 mantiene la misma estructura básica de un sistema de lazo abierto, con la diferencia de que este presenta elementos de sensado los cuales envían señales eléctricas al controlador en base a la variación de los parámetros físicos que están

siendo controlados en el proceso, esto permite que en el controlador se implemente un control realimentado. Dicha implementación permite que el sistema sea más preciso y se pueda adaptar a cambios externos como perturbaciones aleatorias, sin embargo se debe verificar que el sistema no sea vuelva inestable.

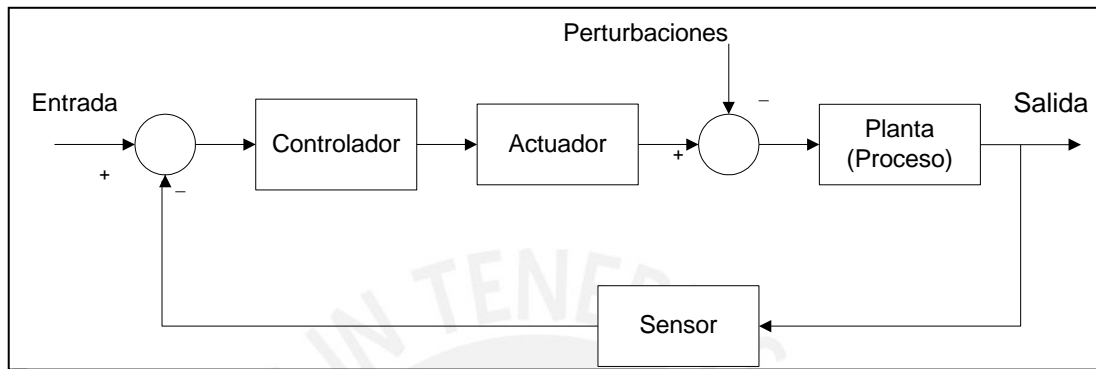


Figura 1.2 Diagrama de bloques de un sistema de control de lazo cerrado

A continuación se explicará el funcionamiento de las partes de los sistemas de control antes presentadas.

### 1.1.1 Controlador

En la actualidad existe una gran variedad de controladores aplicables al control de motores eléctricos, siendo los microcontroladores los más comúnmente usados debido a su versatilidad. El microcontrolador es un circuito integrado que incluye en su interior las tres unidades funcionales de una computadora: CPU, Memoria y Unidades de E/S, es decir, se trata de un computador completo en un solo circuito integrado [1].

Una etapa importante en el diseño del sistema de control es la selección del controlador adecuado, este se debe escoger en base a una serie de funcionalidades que harán a un controlador adecuado para cada aplicación específica. Entre dichas características tenemos capacidad de procesamiento, cantidad de puertos de entrada y salida tanto analógica como digital, métodos de comunicación externa y atributos de programación interna.



### 1.1.2 Driver

El driver o interfaz de potencia de motores es un circuito electrónico que permite que un motor de corriente continua gire en ambos sentidos, horario y anti horario. Es comúnmente utilizado en robótica e incluso en procesos industriales [2].

El diseño o selección del driver se realiza una vez que se tienen identificadas las características eléctricas de las señales de control, las cuales son generadas por el controlador previamente seleccionado, y las características eléctricas de operación de los actuadores presentes en el sistema. Es recomendable realizar esta etapa posteriormente a la culminación del hardware de control para evitar la necesidad de utilizar etapas de acondicionamiento de señales entre el hardware de control y el driver.

### 1.1.3 Actuador

En la figura 1.1.3 se aprecia un bloque de “actuador”, el cual puede representar cualquier elemento activo que requiera el control del proceso como un motor eléctrico, una electroválvula, etc. Es una máquina electromecánica cuya función es la de transformar energía eléctrica en energía mecánica, esto se realiza a partir de la interacción entre un campo magnético giratorio que proviene del estator y los bobinados del rotor [2].

Con respecto a los motores se deben tener en cuenta una serie de factores para dimensionar el motor adecuado para cada aplicación, estos criterios son: velocidad, ruido, costo, y relación torque – potencia consumida. Además se debe tener en cuenta que estos factores cambiarán no solo con el modelo de motor escogido sino con la tecnología o tipo de motor que se seleccione, los cuales se muestran en la tabla 1.1.

Tabla 1.1 Presentación de las tecnologías a utilizar



1.2 I  
D

| Tipo de Motor      | Ventajas  | Desventajas  | Aplicaciones   |
|--------------------|---|--|--|
| Corriente Continua | Amplio rango de velocidad, bajo ruido, resistente a vibraciones, alto torque de arranque. | Requiere control preciso.  | Sistemas de tracción, sistemas que requieran vencer inercia. |
| Paso a paso        | Baratos, fáciles de controlar, pueden operar en lazo abierto, buen torque de arranque.    | No aplicable a cargas variables, sacrifica torque por velocidad, resuena al funcionar. | Posicionamiento, micro-stepping.                             |

### IDENTIFICACION DE SISTEMAS

La identificación de sistemas consiste en obtener experimentalmente un modelo que represente un proceso que se quiera controlar. Dicho modelo deberá representar de forma exacta el comportamiento dinámico del sistema para las condiciones de la aplicación específica que se desea. Con el modelo obtenido se podrán realizar las pruebas necesarias para generar los factores de ajuste necesarios para la calibración.

#### 1.2.1 Métodos de identificación de sistemas

Los modelos que se pueden obtener se clasifican en modelos paramétricos y modelos no paramétricos. Los modelos paramétricos como su nombre lo sugiere se basan en modelos matemáticos preestablecidos a partir de ecuaciones diferenciales para el modelamiento de sistemas continuos. Mientras que los modelos no paramétricos expresan sus resultados en gráficos, los cuales describirán el comportamiento de las variables de interés. Si es que se necesitará trabajar con estos modelos se puede obtener su curva aproximada y trabajarlos a partir de esta como un modelo predeterminado para la aplicación en cuestión.

Cabe resaltar que también se puede modelar un sistema de forma teórica, en base al manejo de las ecuaciones físico-químicas que describan el proceso que se quiere modelar en el ámbito de la estática, dinámica o de energía. Sin embargo la limitación de este método radica en que el modelo estará dado para condiciones ideales, ya que al no utilizar datos experimentales existirán algunos factores a los cuales no se les podrá asignar algún valor y se tendrán que despreciar.

## 1.2.2 Proceso de identificación de sistemas

### a) Toma de datos

Consiste en la aplicación de una señal conocida al sistema y de la captura de los datos de salida, es decir de la variable a controlar. A fin de que los datos tomados sean validos las mediciones deberán hacerse más de una vez verificando que las señales de entrada no varíen, que la frecuencia de muestreo sea la adecuada para el comportamiento dinámico del sistema y se debe verificar además que el sistema de adquisición de datos a utilizar funcione de forma óptima.

### b) Manejo previo de los datos obtenidos

Los datos obtenidos de los ensayos experimentales no estarán inmediatamente listos para su análisis, debido a esto se debe considerar corregir perturbaciones a fin de contar con datos listos para la obtención del modelo requerido. Dichas perturbaciones consisten en la presencia de ruido en la señal (discreta) obtenida de los ensayos experimentales, de un nivel de offset (nivel de voltaje continuo) común a toda la señal y de la posible aparición de datos erróneos en el muestreo.

### c) Selección del modelo y cálculo de los parámetros

Se busca calcular los parámetros del modelo que mejor se ajuste al comportamiento del proceso, se elegirá un modelo en caso se busque la identificación de un modelo paramétrico. Finalmente para cualquier caso ya sea identificación paramétrica o no paramétrica se debe buscar obtener los parámetros del modelo a utilizar de modo que la simulación del modelo obtenido difiera en lo menos posible de los datos obtenidos de la respuesta real del sistema implementado físicamente.

### d) Validación del modelo

En esta etapa se determina si la diferencia entre el modelo obtenido y la respuesta real del proceso permite realizar el control requerido sobre dicho proceso. Algunas causas para que la estimación del modelo del sistema falle son las siguientes:

- El tiempo de muestreo utilizado para recoger datos no es el óptimo ya que el proceso presenta una respuesta demasiado rápida como para ser observada con la frecuencia de muestreo utilizada.
- El ajuste matemático del modelo no permite una interpolación adecuada de los valores requeridos, ya que el error presente es mayor a la resolución deseada
- En caso de ser un modelo paramétrico, el modelo escogido no permite modelar el proceso adecuadamente.

La figura 1.3 muestra el diagrama de flujo para la aplicación de la metodología de identificación de sistemas.

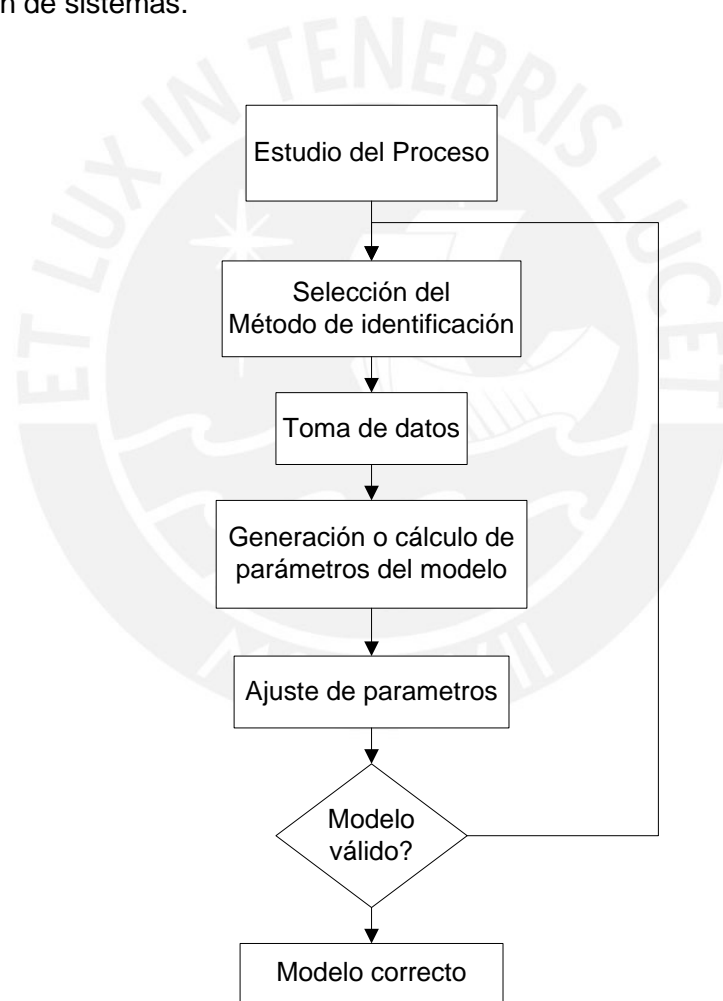


Figura 1.3: Metodología de identificación de sistemas

## CAPÍTULO 2

### ANÁLISIS Y DISEÑO DEL MÓDULO

#### 2.1 DISEÑO GENERAL DEL MÓDULO

A continuación se presenta el diseño físico de los diferentes elementos que conforman el módulo. Para este diseño se considera que el sistema es capaz de realizar un lanzamiento en cualquier dirección y que el área de lanzamiento es parte del módulo para lograr una mejor medición de la posición final de lanzamiento.

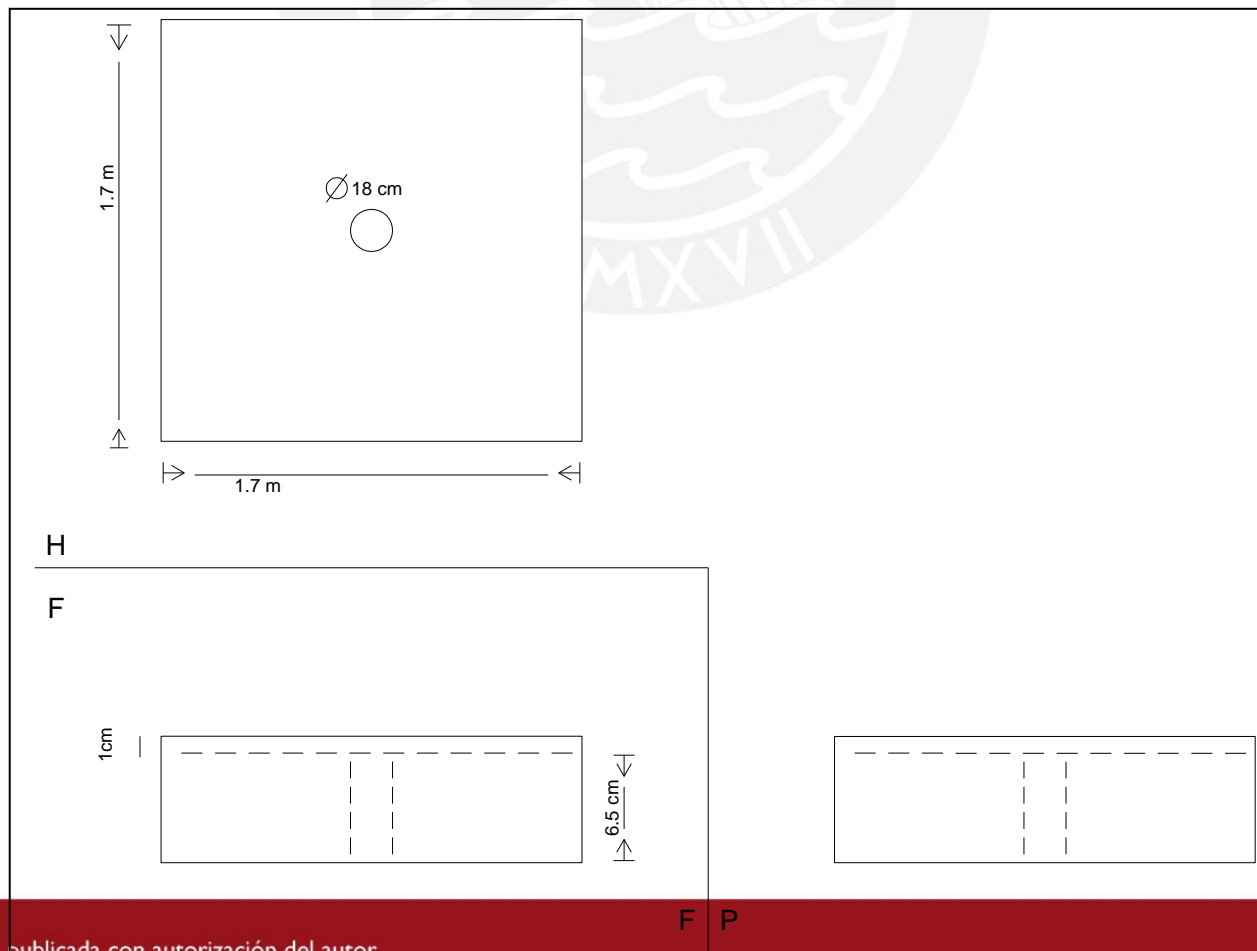


Figura 2.1 Vista frontal, lateral y superior de la plataforma del módulo de lanzamiento

## 2.2 CÁLCULOS PRELIMINARES

El control del motor DC, es el elemento en el cual se necesita la mayor precisión y es por esta razón que presenta la mayor dificultad a la vez. Se realizaron una serie de pruebas para obtener un modelo fiable del motor DC. Sin embargo, antes se deben establecer los requerimientos físicos para el lanzamiento parabólico que será ejecutado por el motor DC.

En la figura 2.2 se muestra la disposición de los elementos del montaje que formaran parte del lanzamiento parabólico.

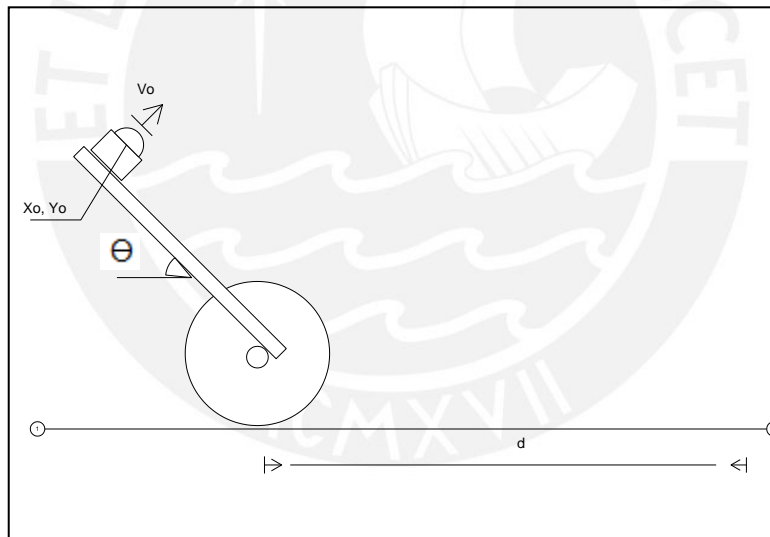


Figura 2.2 Vista del montaje mecánico para el lanzamiento

$$V_o = \frac{(d - X_o)}{\sin \theta} \times \left( \sqrt{\frac{g}{2 \times (Y_o + (d - X_o) \times \tan \theta)}} \right) \dots (1)$$

La ecuación (1) representa la relación de velocidad inicial para un lanzamiento parabólico, la cual depende de los parámetros:

$V_o$  : Velocidad inicial

$d$  : Distancia final de lanzamiento

- ( $X_0$ ,  $Y_0$ ) : Posición inicial de lanzamiento
- $g$  : Gravedad
- $\Theta$  : Ángulo de lanzamiento (respecto al plano horizontal)

## 2.3 DISEÑO DEL HARDWARE

Al diseñar el hardware para el módulo se deben considerar varios factores que establecen los requerimientos mecánicos, eléctricos y de procesamiento del sistema.

### 2.3.1 Fuentes de alimentación

Debido a que se diseñó tanto el hardware de control como los drivers de potencia, se tuvo que considerar el aislamiento eléctrico entre los circuitos de alimentación para la etapa digital y de potencia.

#### a) Fuente de alimentación de la etapa digital

Como se observa en la figura 2.3, se utilizó un regulador de voltaje L7805, el cual cumple con los requerimientos de voltaje y corriente de la etapa digital del hardware. El voltaje de alimentación digital es de 5 voltios y la corriente resulta menor a un amperio. La entrada para el circuito mostrado proviene de un adaptador AC/DC, esto se decidió por motivos de costo y espacio.

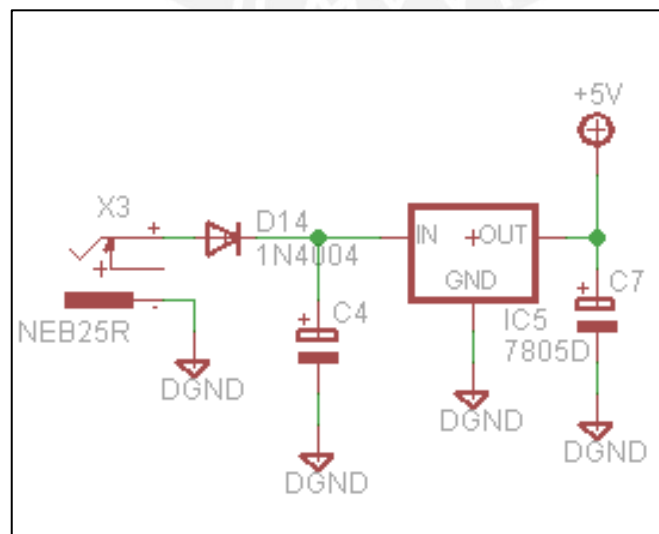


Figura 2.3: Diagrama del circuito de alimentación digital

b) Fuente de alimentación de la etapa de potencia

En la figura 2.4 se presenta el circuito de alimentación para la etapa de potencia, se requieren 2 valores de voltaje, 24 voltios para alimentar los motores y 5 voltios para la alimentación lógica de los drivers. Para lograr esto se utilizan 2 reguladores de voltaje, uno con salida de 5 voltios (L7805) y otro regulable, graduado a 24 voltios (LM317).

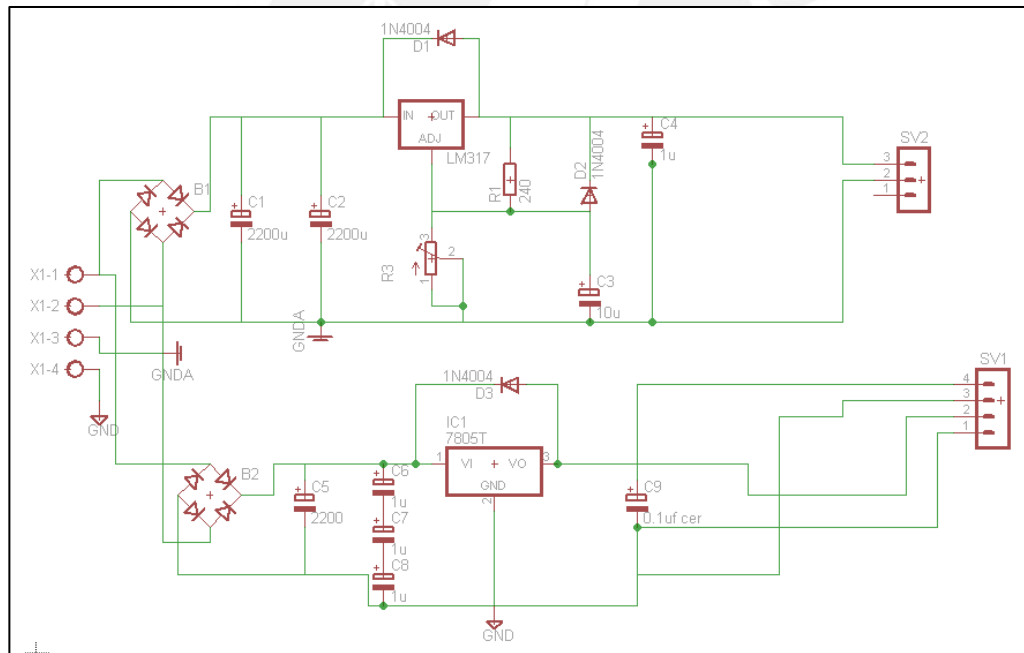


Figura 2.4: Diagrama de la fuente de alimentación de la etapa de potencia



### 2.3.2 Circuitos electrónicos

#### a) Circuitos de control

En la figura 2.5 se muestra el elemento principal de control del hardware, este es el microcontrolador ATMEGA8. Este microcontrolador fue seleccionado debido a que cuenta con el número adecuado de salidas y entradas digitales, permite la comunicación con la computadora bajo un protocolo estándar y soporta las herramientas de programación necesarias para implementar el control del sistema.

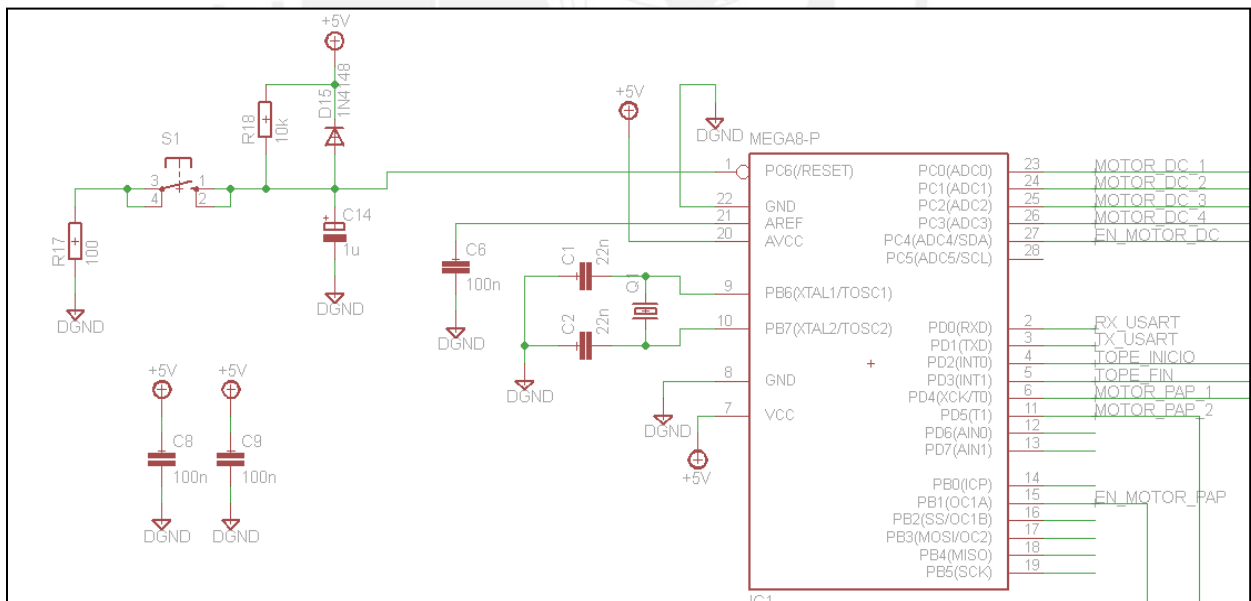


Figura 2.5: Diagrama del circuito de control principal (microcontrolador)

A continuación se presentan los puertos por los cuales el microcontrolador interactúa con los elementos a controlar:

- Secuencia de pasos motor a pasos : PC0, PC1, PC2, PC3.
- Habilitador del motor a pasos : PC4.

- Control de motor DC : PD4, PD5.
- Habilitador del motor DC : PB1.
- Entrada del fin de carrera (inicio) : PD2.
- Entrada del fin de carrera (fin) : PD3.
- Comunicación serial (recepción) : PD0.
- Comunicación serial (transmisión) : PD1.

Se debe resaltar que la señal de habilitación del motor DC, la cual es fundamental para el control, proviene del puerto PB1 del microcontrolador. El puerto PB1 tiene como salida la única señal de ancho de pulso modulada que genera el microcontrolador. Esta señal sirve para variar la potencia eléctrica aplicada al motor DC como será explicado posteriormente.

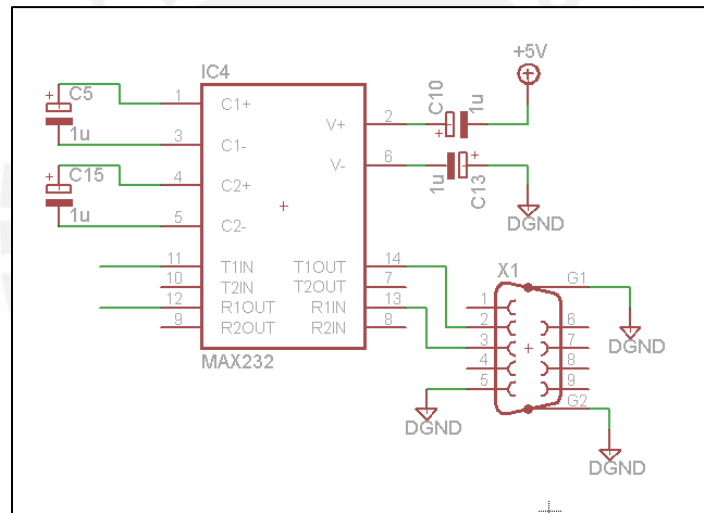


Figura 2.6: Diagrama del circuito de comunicación serial RS232

En la figura 2.6 se muestra el circuito que permite la comunicación serial entre el microcontrolador y la computadora por medio del uso del integrado MAX232. La salida del circuito hacia la computadora es a través de un conector serial hembra. Se escogió la comunicación serial debido a que es un protocolo de comunicación muy difundido y de fácil configuración. Sin embargo para poder utilizar el módulo con cualquier computadora portátil solo se necesitará de un cable USB-serial. Para el módulo de prueba se utilizó

marca  
se presenta en



el cable TU – S9 de la TRENDNET, el cual la figura 2.7.

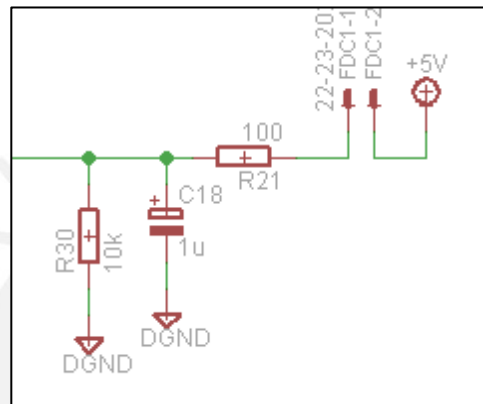


Figura 2.8: Diagrama del circuito de entrada de tope mecánico

Como indicador de inicio y fin de del movimiento del motor DC se consideraron dos fines de carrera, el circuito de entrada de ambos fines de carrera hacia el microcontrolador se muestra en la figura 2.8. El circuito presentado cumple la función de circuito anti-rebote. Este es necesario ya que el accionamiento de los fines de carrera proporciona una señal inicialmente oscilatoria debido al acople mecánico.

b) Circuitos de potencia

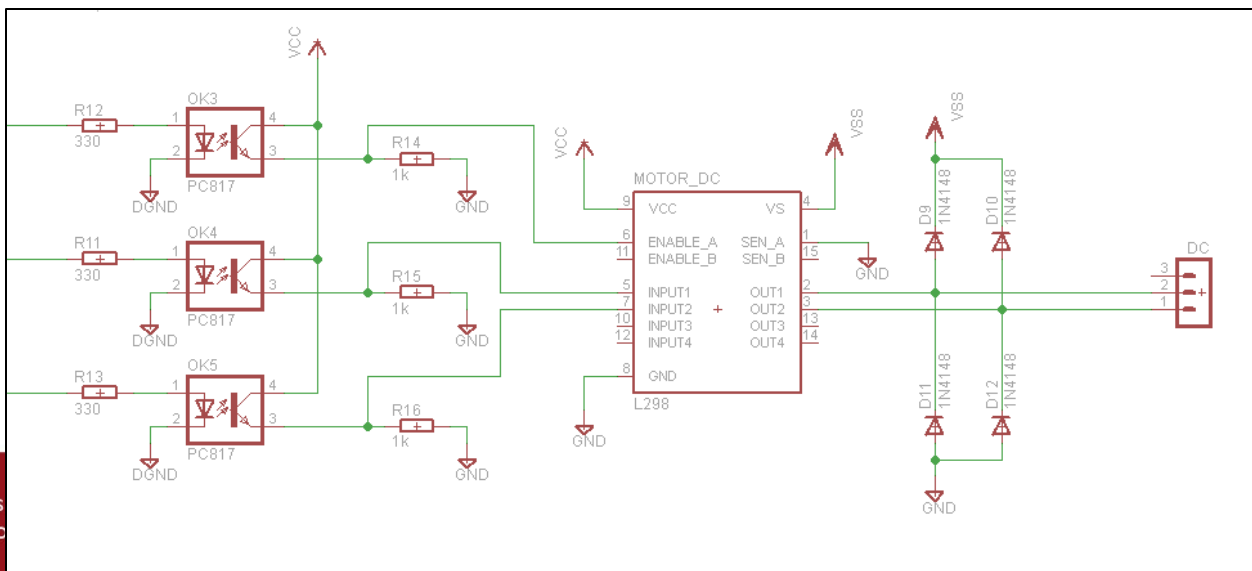


Figura 2.9: Diagrama del circuito del driver del motor DC

En la figura 2.9 se presenta el circuito del driver para el motor DC, para el diseño del circuito se considera el circuito integrado L298 (puente H) debido a que cumple con los requerimientos eléctricos. Dichos requerimientos consisten en una alimentación de 24 V y 0.7 mA como máximo, mientras que el L298 soporta hasta 40 V y 1.5 A. El circuito presentado se maneja en base a tres entradas digitales, una de habilitación y dos que determinan el sentido de giro del motor. Con respecto al uso del circuito integrado L298 solo se necesitan 2 señales de control ya que únicamente se necesita manejar una bobina (motor DC) a la salida del circuito. Por tanto, se utiliza la mitad de la capacidad del L298 que puede alimentar 2 bobinas en base a 4 señales de control a la entrada con señales de habilitación independientes para cada bobina.

Además se puede apreciar en el circuito que la tierra de potencia (GND) esta eléctricamente aislada de la tierra digital (DGND) por medio de una serie de optoacopladores.

El circuito, mostrado en la figura 2.10, es el driver del motor a pasos, este tiene básicamente el mismo funcionamiento que el circuito del driver del motor DC pero con la diferencia de que se usan la totalidad de las entradas y salidas del L298. Para el correcto accionamiento del motor a pasos se debe considerar la aplicación de la secuencia adecuada en las 4 entradas de control, esta combinación es única y el orden en que se aplique determina el sentido de giro del motor.

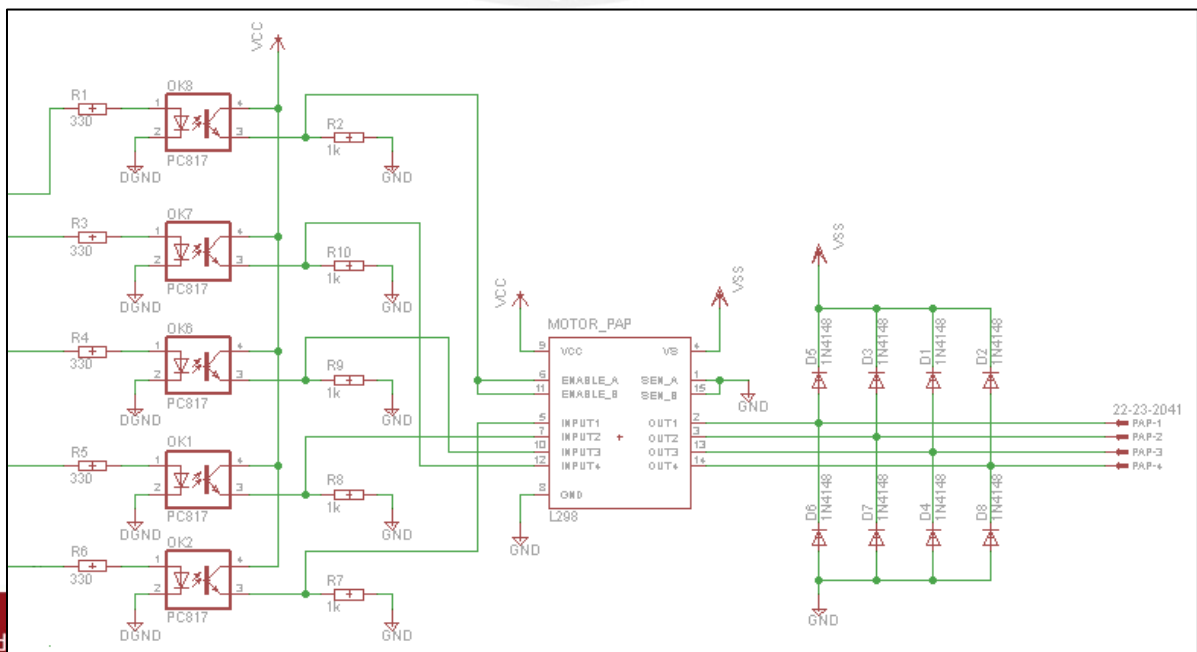


Figura 2.10: Diagrama del circuito del driver del motor a pasos.

## 2.4 DISEÑO DEL SOFTWARE

Para el diseño del software del módulo a implementar, es necesaria la consideración de dos etapas que se desarrollaron en plataformas diferentes y estas son:

- La interfaz gráfica de usuario (desarrollo en Visual Basic 6.0).
- El algoritmo de cálculo de los parámetros de control (desarrollo en Visual Basic 6.0).
- La generación de las señales de control del módulo (desarrollo en Assembler ATMEGA8).

Debido al tipo de variables utilizadas para calcular los parámetros de control, se desarrolló el algoritmo en el programa Visual Basic 6.0. Esto es debido a que los registros de datos del microcontrolador ATMEGA8 no soportan variables de tipo “double” necesarias para el cálculo con decimales.

### 2.4.1 DISEÑO DEL SOFTWARE EN PLATAFORMA VISUAL BASIC 6.0

A continuación se presenta la lógica necesaria para implementar la interfaz gráfica para el uso del módulo y el cálculo de los parámetros de control para el accionamiento de los motores del sistema.

En la figura 2.12 se presenta una imagen de la interfaz gráfica lograda, en la cual el usuario deberá escoger un punto dentro del círculo mostrado. Dicho punto será la posición final de lanzamiento. Por tanto la información que se tomará de la elección del usuario será la distancia de lanzamiento y la dirección del mismo (ángulo de giro necesario).

El algoritmo de control generará el valor del voltaje que se debe aplicar al motor DC para cubrir la distancia de lanzamiento ingresada por el usuario. Dicho algoritmo se basa en una ecuación polinomial, que es deducida y explicada en el capítulo 3. El valor de voltaje será variable entre 0 y 24 V (voltaje nominal del motor DC). Este voltaje se

obtendrá por medio de la modulación por ancho de pulso de una alimentación fija de 24 voltios. El porcentaje del ciclo de trabajo se calcula en base al valor obtenido de la ecuación polinomial y de un total de 24 V, con una resolución de 8 bits.

Luego se enviarán 2 bytes con la información para generar las señales de control al microcontrolador por medio del puerto serial. Cada byte contendrá la información correspondiente al control del motor DC y el motor a pasos independientemente, después del envío se esperará por la recepción de un byte de confirmación. Dichos bytes de control tendrán la siguiente estructura:



Figura 2.11: Distribución de información en los bytes de control

Byte A (a7-a0): Control motor a pasos

Byte B (b7-b0): Control motor DC

- a7: Dirección de giro.
- a6 – a0: Numero de pasos.
- b7-b0: Relación de porcentaje de PWM.

Para el envío de los 2 bytes hacia el microcontrolador se utilizó el protocolo RS232 (comunicación serial), configurado con los siguientes parámetros.

- Bytes de datos : 8
- Paridad : Nula
- Velocidad de transmisión : 9600 baudios

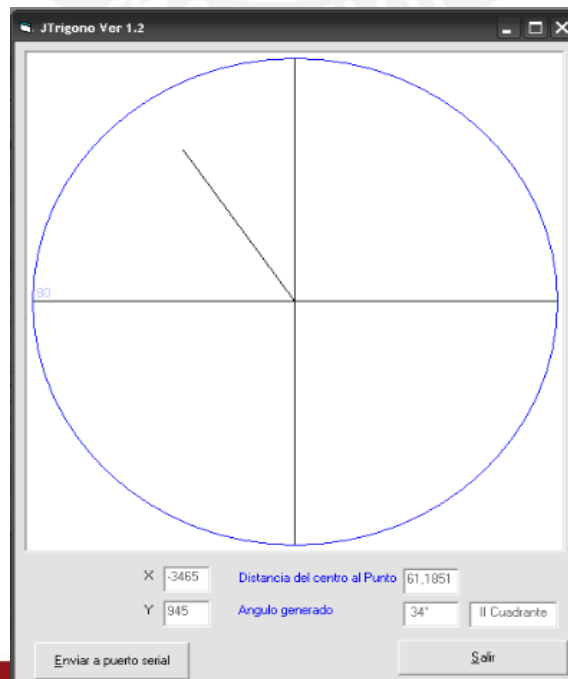


Figura 2.12 Ventana de ingreso de datos de la interfaz gráfica

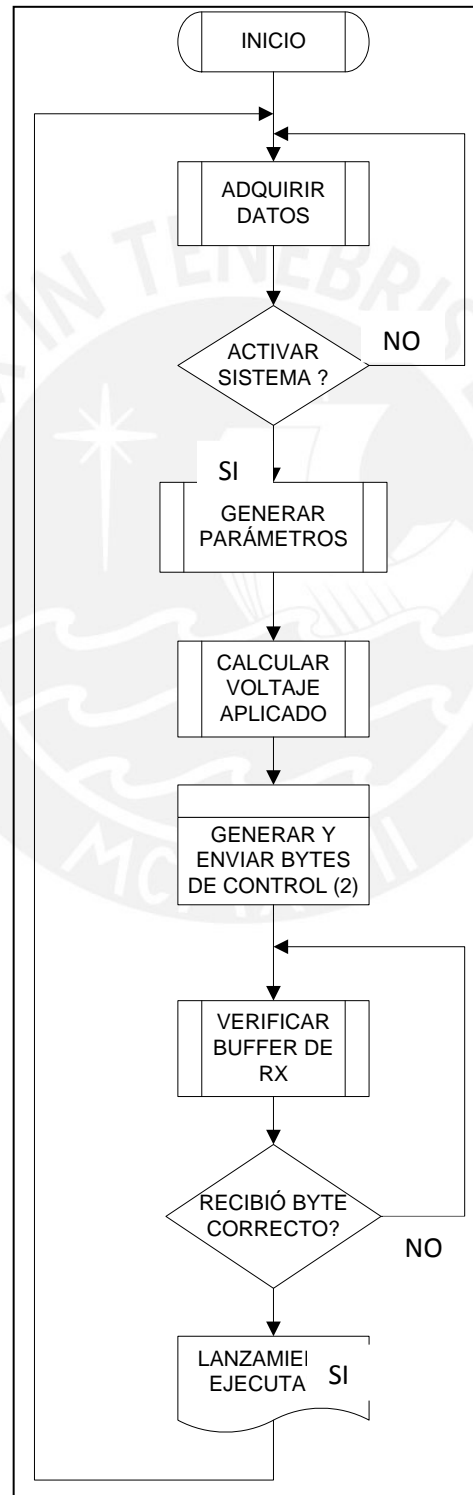




Figura 2.13: Diagrama de flujo del programa en Visual Basic 6.0

#### 2.4.2 DISEÑO DEL SOFTWARE: MICROCONTROLADOR ATMEGA8

El diseño del software en lenguaje assembler para el microcontrolador ATMEGA8 contempla el tratamiento de los bytes de control que este recibe y la genera de las señales de control para los motores del sistema. Luego de recibir ambos bytes el microcontrolador envía a la computadora un byte de confirmación.

A continuación, el microcontrolador extrae los parámetros para el accionamiento de los motores como sentido de giro y número de pasos para el motor a pasos y el ciclo de trabajo para la modulación del voltaje de alimentación para el motor DC.

Con respecto a la activación del sistema, primero se alimenta el motor a pasos. Cuando este alcanza el ángulo requerido se acciona el motor DC. El motor DC solo se deja de alimentar cuando el tope situado en la posición de 45° cierre contacto. Entonces se invierte el sentido de giro del motor DC y a máxima velocidad vuelve a su posición inicial (horizontal) dejando de ser alimentado por el sistema cuando se active el tope situado en posición horizontal.

Por último, el microcontrolador alimenta al motor a pasos hasta que este regrese a su posición inicial. Luego el sistema espera recibir los datos para ejecutar un nuevo lanzamiento.

La figura 2.14 muestra el diagrama de bloques del programa implementado en lenguaje assembler para el ATMEGA8.

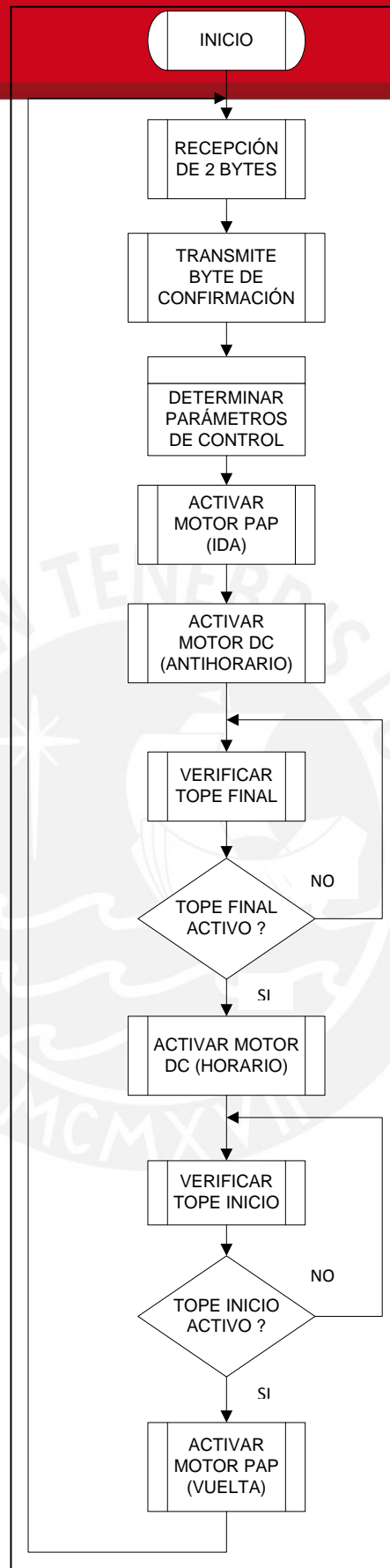


Figura 2.14: Diagrama de flujo del programa en lenguaje assembler

## CAPÍTULO 3

## IMPLEMENTACIÓN DEL MÓDULO

En este capítulo se muestran los cálculos necesarios para la obtención del algoritmo de control que permitirá manejar la velocidad de lanzamiento en función al voltaje aplicado al motor DC.

Para identificar el sistema compuesto por el motor DC y su acople mecánico se realizó una identificación no paramétrica. En base a las pruebas experimentales se obtuvo una gráfica o relación matemática entre la entrada del sistema y la variable de interés. Las pruebas experimentales se realizaron en base al circuito que permitió la toma de datos del sistema, presentado en la figura.

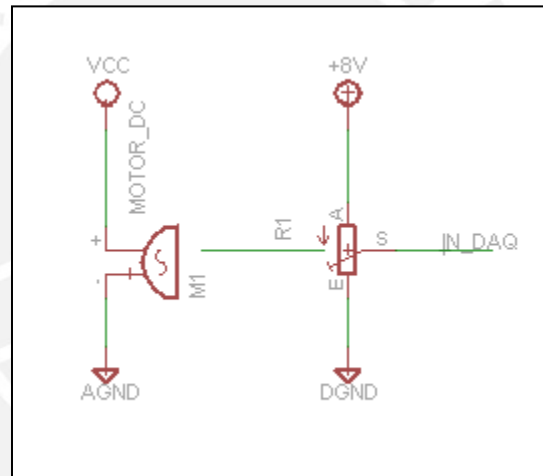


Figura 3.1: Diagrama del circuito de pruebas para tarjeta DAQ

El potenciómetro se acopla al rotor de modo que mientras el rotor gira este variará el voltaje a la salida regulable del potenciómetro. Dicho voltaje fue capturado por la tarjeta de adquisición de datos (DAQ) de modelo PCI-6024E del fabricante National Instruments. Se consideró un voltaje de referencia para el potenciómetro de 8 V, debido a que el voltaje máximo de entrada que maneja la tarjeta de adquisición (DAQ) de datos es de 10 V. Las características técnicas que se debieron considerar para realizar las pruebas se presentan en la tabla 3.1.

Tabla 3.1 Características técnicas PCI-6024E

|                        |         |                           |   |
|------------------------|---------|---------------------------|---|
| <b>Parte Analógica</b> | entrada | No. Canales               | 16  |
|                        |         | Resolución                | 12 bits   |
|                        |         | Velocidad Muestreo        | 200 kS/s  |
|                        |         | Ganancia PGA              | 0.5, 1, 10, 100   |
|                        |         | Rangos Voltaje de Entrada | $\pm 50\text{mV}$ , $\pm 500\text{mV}$ , $\pm 5\text{V}$ , $\pm 10\text{V}$ |
|                        |         | Entrada Diferencial       | Configurable  |
| <b>Parte Analógica</b> | salida  | No. Canales               | 2   |
|                        |         | Resolución                | 12 bits   |
|                        |         | Rango de Salida           | $\pm 10\text{V}$  |
| <b>Parte Digital</b>   | entrada | No. Canales               | 8   |
|                        |         | Voltaje de Alto Nivel     | 2 a 5V  |
|                        |         | Voltaje de Bajo Nivel     | 0 a 0.8V  |
|                        | salida  | No. Canales               | 8   |
|                        |         | Voltaje de Alto Nivel     | 4.35 V  |
|                        |         | Voltaje de Bajo Nivel     | 0.4 V   |

El software utilizado para configurar y controlar el proceso de adquisición de datos es el driver NIDAQ. Además, es necesario manejar un software de aplicación (MATLAB - Simulink), que por medio de un programa en lenguaje de alto nivel, permite manipular los datos adquiridos por la computadora. El diagrama de bloques del programa desarrollado para dicho fin se puede apreciar en la figura 3.2.

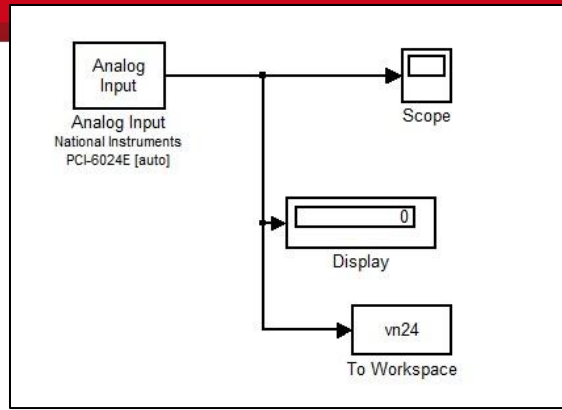


Figura 3.2 Diagrama de bloques del programa para el sistema de adquisición de datos

### 3.1 PRUEBAS DEL MOTOR DC EN VACÍO

El objetivo de realizar las pruebas del motor DC en vacío es verificar que dicho motor es capaz de lograr los requerimientos del sistema, es decir completar un lanzamiento exacto en un rango de 10 a 80 centímetros. Para esto se realizó una serie de pruebas en las que se varió el voltaje de alimentación desde 0 V hasta su voltaje nominal (24 V). En la figura 3.3 se presenta la velocidad desarrollada por el sistema para un ángulo de lanzamiento de 45° de recorrido.

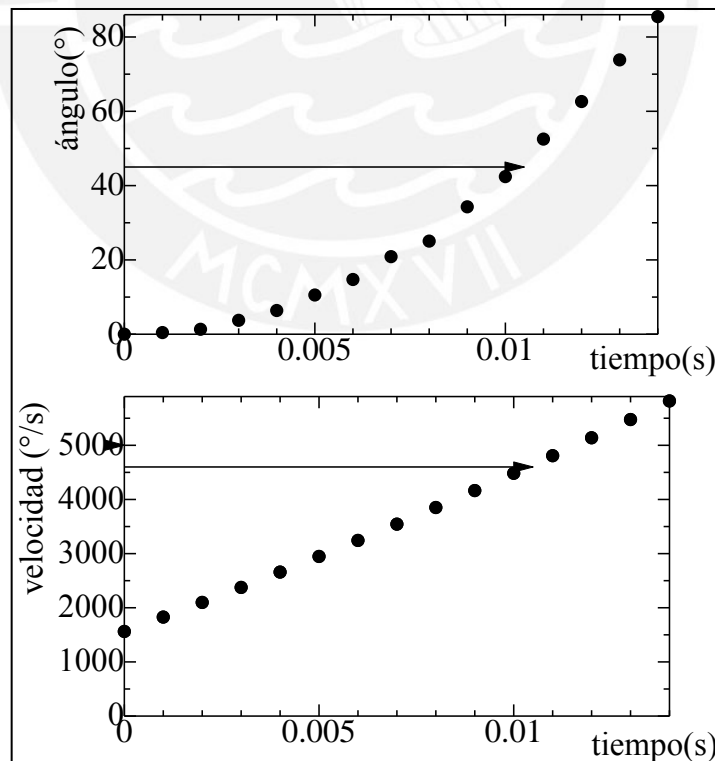


Figura 3.3 Gráfica de posición (superior) y velocidad (inferior) del motor DC en vacío para 24 V.

A través de las pruebas se obtuvieron una serie de gráficas que mostraban el cambio del ángulo de giro en el tiempo. Luego, derivando las expresiones que representaban a las gráficas anteriores se pudo obtener las gráficas de velocidad en el tiempo. En base a estas gráficas se obtuvieron los datos de velocidad instantánea para cada ángulo de giro. Estos datos se contrastarán con los obtenidos en base a la ecuación 2 (ecuación de velocidad para cada distancia de lanzamiento). Dicha ecuación está asociada a una familia de parábolas y cada una de estas se generará para cada distancia de lanzamiento diferente. Por lo tanto se analizará el caso crítico, es decir para la distancia máxima (80 cm).

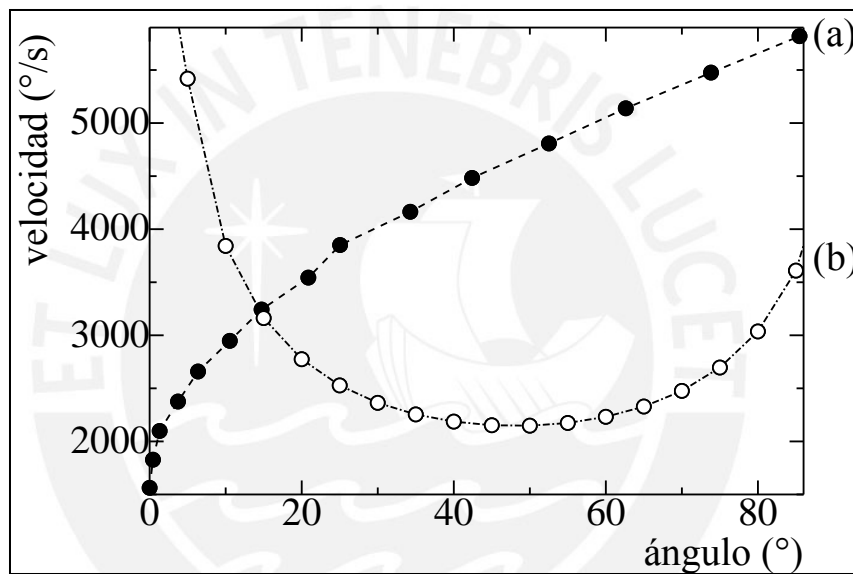


Figura 3.4: Gráfica de velocidad vs ángulo para el motor DC en vacío(a) y para el lanzamiento parabólico (b)

En la gráfica 3.4 se puede apreciar que la respuesta del motor supera a la velocidad requerida para el lanzamiento parabólico de distancia máxima por un amplio margen, esto se cumple para casi la totalidad del rango de ángulos de disparo. Con lo cual se puede concluir que el motor cumple con los requerimientos de velocidad para el lanzamiento al menos para voltaje nominal. Además, en la gráfica se observa que hay ángulos de disparo para los cuales hay un mayor margen, lo cual permitirá mayor resolución en el control del lanzamiento.

### 3.2 PRUEBAS DEL MOTOR DC CON CARGA

Para determinar si el sistema es capaz de cumplir no solo con los requerimientos de velocidad sino también de torque del sistema se realizaron las pruebas del motor DC con el acople que sería utilizado para lograr el lanzamiento. Dichas pruebas permitieron conocer la velocidad real que tomaría el proyectil para cada ángulo de lanzamiento, es decir, el algoritmo de control a implementar se basará en estas pruebas.

#### 3.2.1 PRUEBAS CON ACOPLÉ MECÁNICO INICIAL

Para modelar el comportamiento del sistema completo, se realizó el mismo procedimiento que para las pruebas en vacío únicamente que ya se contaba con el acople mecánico completo. Como se puede observar en la figura 3.5 la velocidad para  $45^\circ$  de giro es mucho menor a la mostrada en la figura 3.3 para el mismo ángulo. Este efecto se debe al torque que ejerce la carga (acople) en contra del movimiento.

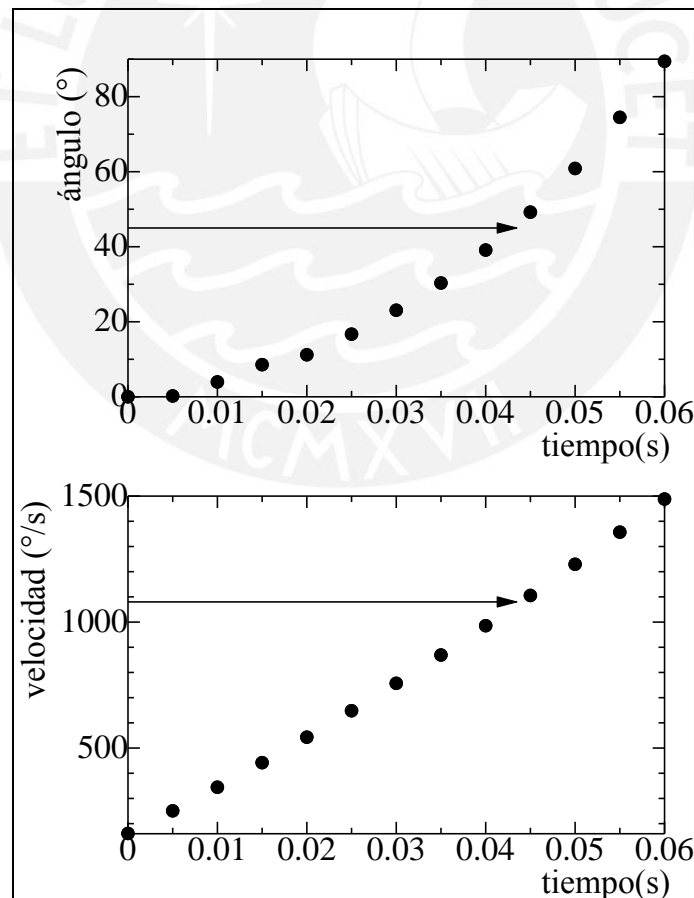


Figura 3.5: Gráfica de posición (superior) y velocidad (inferior) del motor DC con acople inicial para 24 V.



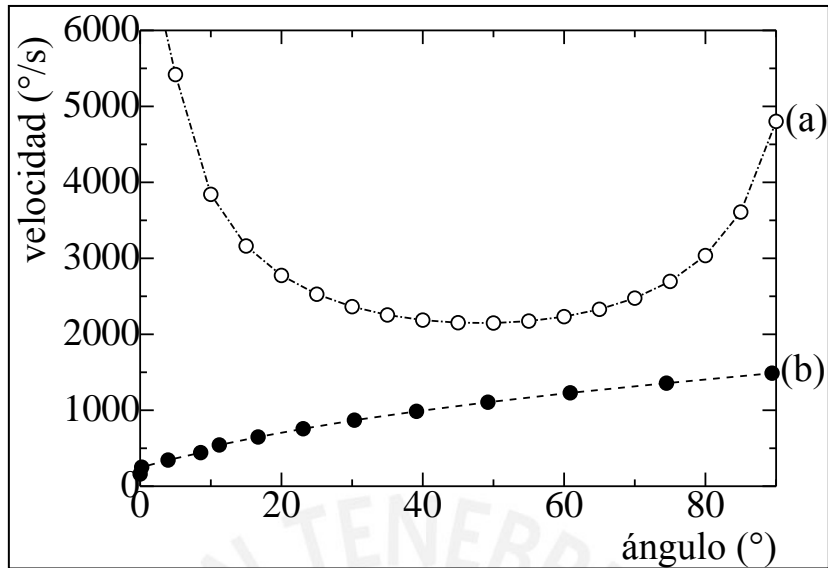


Figura 3.6 Gráfica de velocidad vs ángulo para el motor DC con acople inicial (a) y para el lanzamiento parabólico (b)

Como se mencionó, la velocidad de giro del motor disminuye cuando se hace el acople mecánico de la barra para el lanzamiento, lo cual se confirma con la figura 3.6. En esta gráfica se puede observar también la curva de velocidad necesaria para el lanzamiento de distancia máxima (80 cm), lo cual permite determinar que mientras se utilice este acople no se podrán cumplir los requerimientos de sistema. En la gráfica se observa que las curvas no se intersecan para ningún ángulo de disparo.

### 3.2.2 PRUEBAS CON ACOPLÉ MECÁNICO MODIFICADO

Ante la necesidad de desarrollar una mayor velocidad de lanzamiento se tuvo que construir un nuevo acople mecánico, el cual logró un peso menor a la tercera parte del peso del acople anterior. En la figura 3.8 se puede apreciar la respuesta de velocidad obtenida para el nuevo acople comparada con la velocidad necesaria para el lanzamiento a distancia máxima.

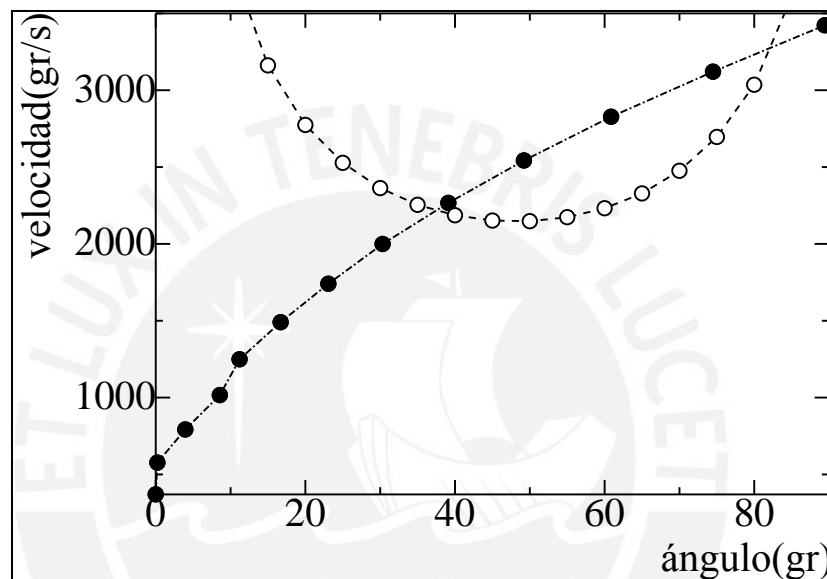


Figura 3.8: Gráfica de velocidad vs ángulo para el motor DC con acople modificado (a) y para el lanzamiento parabólico (b)

De la figura se puede deducir que el sistema podrá desarrollar la velocidad necesaria para cumplir con los requerimientos de distancia de lanzamiento, ya que para un rango considerable de ángulos la velocidad del motor supera a la velocidad de lanzamiento mínima.

De esta misma gráfica se puede determinar cuál será el ángulo fijo de lanzamiento, este deberá estar en el rango de ángulos antes mencionado. Como parámetro adicional se considerará que, para la gráfica de velocidad en el lanzamiento, el valor mínimo está dado para 45°. Por tanto se seleccionará como ángulo de lanzamiento fijo el de 45°.

La figura 3.9 se obtiene a partir de las distintas pruebas con el motor DC para un voltaje aplicado desde 0 hasta su voltaje nominal, para cada voltaje se tomará la velocidad desarrollada hasta 45° de giro. Esta gráfica será la base del algoritmo de control a implementar.

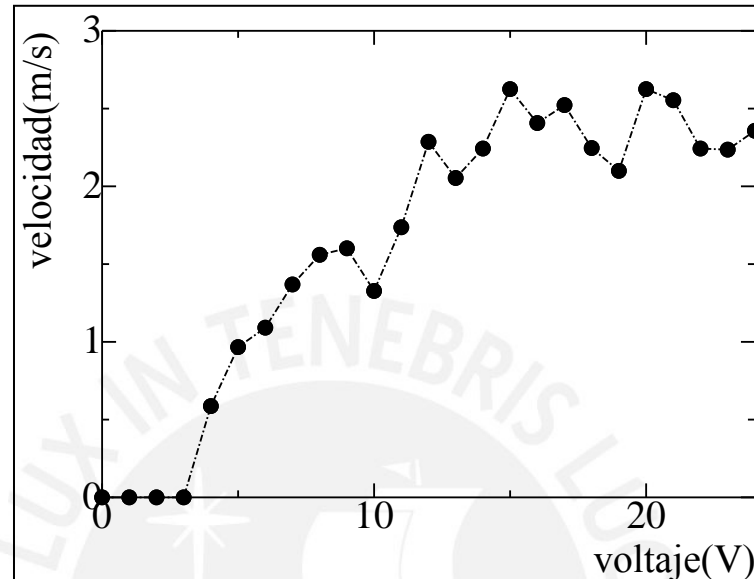


Figura 3.9: Gráfica de velocidad para ángulo de giro 45 grados en todo el rango de voltaje aplicable.

Es decir, en base a los datos ingresados por el usuario se calculará la velocidad de lanzamiento necesaria. Entonces, con la ecuación polinomial aproximada de la gráfica 3.9, ecuación 2, se calculará el voltaje que se requiere aplicar. La ecuación 2 se obtuvo a través de una aproximación polinomial de tercer grado en el programa Microsoft Excel de los puntos tabulados en la gráfica 3.9. Para que dicho valor se pueda manejar como un voltaje modulado (voltaje promedio) se deberá encontrar una relación entre el voltaje calculado y el voltaje nominal a fin de determinar el ciclo de trabajo necesario.

$$V_o = -0.0002V^3 - 0.001V^2 + 0.224V - 0.2512 \dots\dots(2)$$

$V_o$  : Velocidad inicial de lanzamiento

$V$  : Voltaje promedio aplicado

## CAPÍTULO 4

## PRUEBAS Y RESULTADOS

En el presente capítulo se presentarán los resultados de la operación total del sistema. Sin embargo, estos resultados se presentarán de forma independiente para el motor DC y el motor a pasos ya que el accionamiento de cada uno de estos es independiente.

## 4.1 RESULTADO DE LAS PRUEBAS DEL MOTOR DC

Debido a que el motor DC realiza el accionamiento para el lanzamiento parabólico, la precisión en el control de este es crítica para la exactitud del sistema. En la figura 4.1 se muestra el error porcentual para diferentes distancias de lanzamiento.

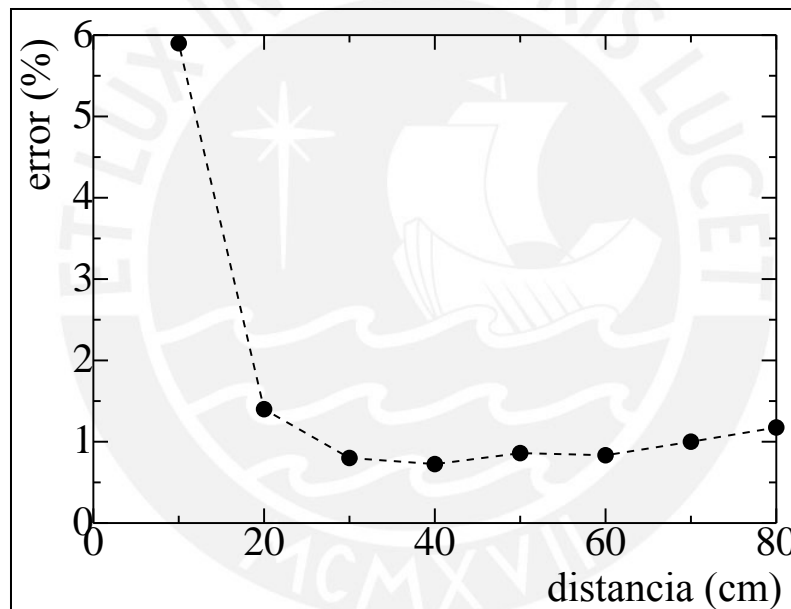


Figura: 4.1 Gráfica de error porcentual y distancia de lanzamiento.

En la gráfica 4.1 se puede apreciar que para casi todo el rango de distancia de lanzamiento el error porcentual se mantiene alrededor del 1%. Esto muestra un buen nivel de precisión para el lanzamiento. También se puede apreciar que el mayor error porcentual se presenta para 10 cm, distancia mínima de lanzamiento, a pesar de cómo se muestra en la tabla 4.1 la diferencia entre los errores medidos para todas las distancias no es muy significativa. La explicación para lo antes expuesto se basa en el hecho de que a pesar de que los errores medidos no fluctúen demasiado comparados con los valores de distancia de lanzamiento deseada, el error será más significativo para distancias de lanzamiento más pequeñas.

Tabla 4.1 Resultados de las pruebas de lanzamiento.

| distancia deseada | Pruebas (error) |     |     |     |     |     |     |     |     |     | Promedio | Error (%) |
|-------------------|-----------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|----------|-----------|
|                   | 1               | 2   | 3   | 4   | 5   | 6   | 7   | 8   | 9   | 10  |          |           |
| 10                | 0.6             | 0.2 | 1.1 | 0.4 | 0.8 | 0.4 | 0.9 | 0.5 | 0.3 | 0.7 | 0.59     | 5.9       |
| 20                | 0.3             | 0   | 0.5 | 0.2 | 0.1 | 0.2 | 0.4 | 0   | 0.6 | 0.5 | 0.28     | 1.4       |
| 30                | 0.2             | 0.1 | 0.3 | 0   | 0.3 | 0.6 | 0.1 | 0.4 | 0.1 | 0.3 | 0.24     | 0.8       |
| 40                | 0.4             | 0.4 | 0.3 | 0.7 | 0.2 | 0   | 0.4 | 0.2 | 0.1 | 0.2 | 0.29     | 0.725     |
| 50                | 0.3             | 0.6 | 0.2 | 0.4 | 0.3 | 0.7 | 0.5 | 0.3 | 0.6 | 0.4 | 0.43     | 0.86      |
| 60                | 0.8             | 0.5 | 0.2 | 0.8 | 0.2 | 0.5 | 0.6 | 0.3 | 0.7 | 0.4 | 0.5      | 0.833333  |
| 70                | 0.6             | 0.2 | 1   | 0.8 | 0.4 | 1.2 | 0.9 | 0.7 | 0.9 | 0.3 | 0.7      | 1         |
| 80                | 1.3             | 0.8 | 1.4 | 0.6 | 1.1 | 0.2 | 0.8 | 1.4 | 0.7 | 1.1 | 0.94     | 1.175     |

En la figura 4.2 se muestra el error real promedio para todo el rango de distancia de lanzamiento. De dicha gráfica se puede señalar que el error en promedio no superará el valor de un centímetro. Además, el error promedio mantiene tendencias en el rango de distancia de lanzamiento, presentando un valor mínimo notorio.

Cabe resaltar que para los resultados presentados solo se tomó en cuenta el error de lanzamiento, es decir se midió la distancia desde el “origen” del módulo hasta la posición final de lanzamiento. Esto se realizó a fin de considerar para estos ensayos únicamente el error en el lanzamiento producido por el accionamiento del motor DC más no el del motor a pasos.

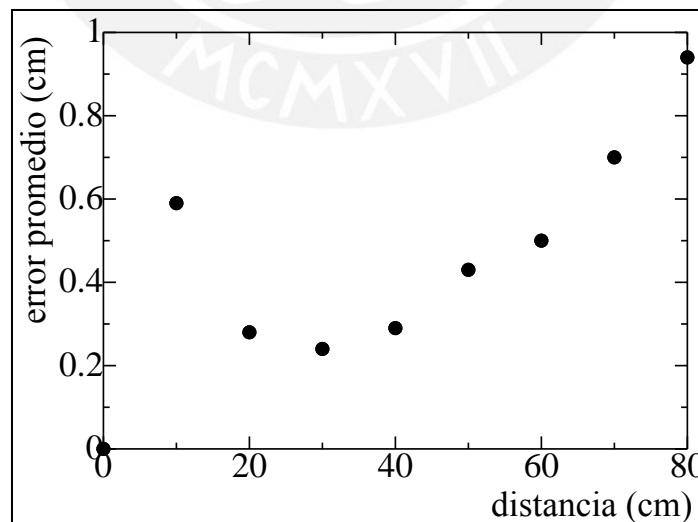


Figura 4.2: Gráfica del error real de lanzamiento por efecto del motor DC.

## 4.2 RESULTADO DE LAS PRUEBAS DEL MOTOR A PASOS

A continuación se muestra el error producido por el accionamiento del motor a pasos, es decir el error lateral de lanzamiento. La dificultad en la medición directa del ángulo real de giro es alta; por lo tanto, el método que se utilizó fue formar un triángulo rectángulo tomando como hipotenusa la proyección de la trayectoria de lanzamiento sobre la horizontal. En base a las dimensiones del rectángulo se calcula el ángulo real de giro.

El grado de influencia del error en el ángulo de giro sobre la exactitud del lanzamiento dependerá de la distancia de lanzamiento. En la figura 4.3 se muestra las curvas de error para lanzamiento máximo (80 cm puntos blancos) y mínimo (10 cm puntos negros), es decir que para cualquier ángulo de lanzamiento los valores de error se describirán por una familia de curvas comprendidas entre las curvas presentadas en la figura 4.3.

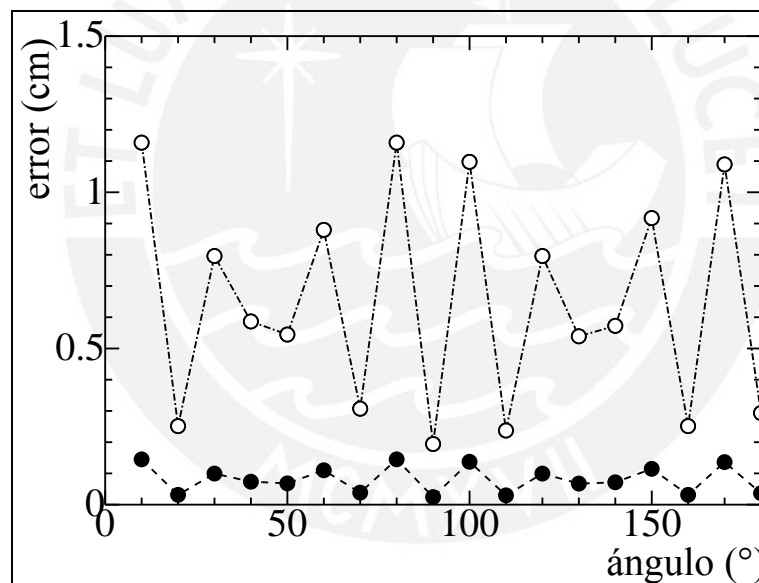


Figura 4.3: Gráfica del error de lanzamiento debido al motor a pasos.

Asimismo, se puede apreciar en la figura 4.3 que el patrón de error se repite de  $10^\circ$  a  $90^\circ$  grados y luego de  $100^\circ$  a  $180^\circ$ . Esto se debe a que el error está dado por las características del motor, el cual tiene  $1.8^\circ$  por paso. Esto se confirma en la gráfica ya que los valores mínimos de error son para  $90^\circ$  y  $180^\circ$ , los cuales son múltiplos de  $1.8^\circ$ .

## CONCLUSIONES

- Se implementó un algoritmo de control que permite un lanzamiento preciso, debido a que se basó en el modelamiento no paramétrico del sistema real que se utilizó en el módulo.
- Se logró implementar una interfaz gráfica de usuario que permite controlar la operación total del módulo educativo de lanzamiento parabólico.
- Se logró desarrollar el módulo de lanzamiento parabólico con un error menor a 1 cm para cualquier distancia de lanzamiento, el cual tiene una distribución que se puede tratar en tres grupos. El primer grupo, para la distancia de lanzamiento mínima, presenta el mayor error debido a que la inercia es significativa para el bajo torque necesario para realizar el lanzamiento a corta distancia. El segundo grupo, para distancias de lanzamiento medias, presenta un error mínimo y esto se debe a que la distribución en el modelamiento del motor DC obtenido presentaba una tendencia más estable para distancias medias de lanzamiento en comparación con las otras. El último grupo, de distancias de lanzamiento mayores, presenta un aumento gradual del error. Esto se debe a la fricción y limitaciones del funcionamiento del montaje mecánico para altas velocidades de giro del motor DC.
- Se logró implementar el control para la dirección de lanzamiento con un error promedio máximo menor a 1.2 cm. Este error depende de la distancia de lanzamiento y aumenta proporcionalmente con esta. El error es causado por las limitaciones propias del motor, específicamente por el ángulo de paso de este.



## RECOMENDACIONES

- En la implementación del módulo se utilizó un motor DC reciclado, con el cual se obtuvieron buenos resultados. Se podría utilizar un motor nuevo que cumpla con los requerimientos mecánico-eléctricos al cual se le podría modelar en base a pruebas para utilizarlo en el módulo, Con el uso de este motor se debería obtener una respuesta más estable y se podría utilizar sus datos de fábrica como referencia.
- Implementar una opción en la interfaz gráfica de usuario que permita generar el algoritmo de control necesario, en base al ingreso de datos de las pruebas que se realicen con los diferentes motores o acoples que se requieran utilizar.
- El modelamiento no paramétrico implementado muestra resultados exactos, sin embargo se podría implementar un algoritmo de control alternativo en base al modelamiento paramétrico y comparar los resultados de ambos, de esta forma se encontraría el más adecuado para la implementación del módulo.
- De ser necesario se puede mejorar el algoritmo de control para el motor a pasos por medio de la aplicación del método de micro-stepping. Esto no se considero debido a que la exactitud en el control del motor a pasos no afecta la precisión en el lanzamiento parabólico.

## BIBLIOGRAFÍA

[1] VALDÉS PÉREZ, Fernando E. y Ramon PALLÁS ARENY

2007 *Microcontroladores: Fundamentos y aplicaciones con Pic*. Segunda Edición. España: Marcombo S.A.

[2] VALENTINE, Richard

1998 *Motor Control Electronics Handbook*. Edición Ilustrada. Estados Unidos. McGraw – Hill Professional.

[8] Atmel Corporation

2010 ATMEGA8/ ATMEGA8L Datasheet.

[http://www.atmel.com/dyn/resources/prod\\_documents/doc2486.pdf](http://www.atmel.com/dyn/resources/prod_documents/doc2486.pdf) [consultado: 05/08/2010]

[5] BARRIENTOS, Antonio

2007 *Fundamentos de Robótica*. 3ra Edición. McGraw – Hill / Interamericana.

[6] BICKLE, Rick

2003 DC Motor Control Systems for Robot applications. Estados Unidos.

<http://www.dprg.org/tutorials/2003-10a/motorcontrol.pdf> [consultado: 14/07/2010]

[4] JOHANSSON, Rolf

1993 *System modelling and identification*. New Jersey. Prentice Hall.

[7] NATIONAL INSTRUMENTS CORPORATION

2000 DAQ 6023E/6024E/6025E User Manual.

<http://www.phy.syr.edu/courses/PHY351.07Fall/refs/eseries.pdf> [consultado: 22/09/2010]

[3] SILER, Brian

1998 *Using Visual Basic 6*. Edición especial. Indianapolis: QUE.

ANEXOS

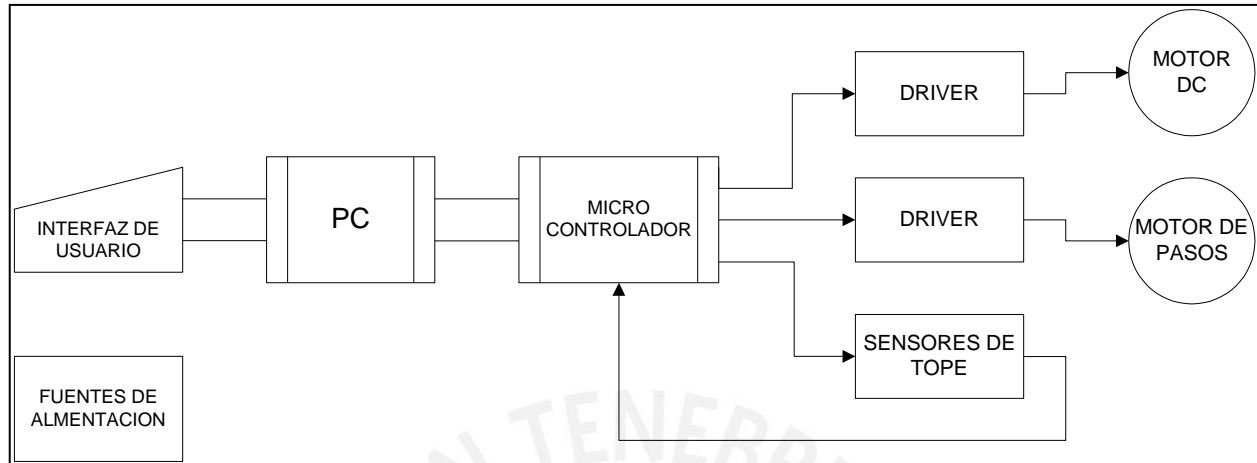
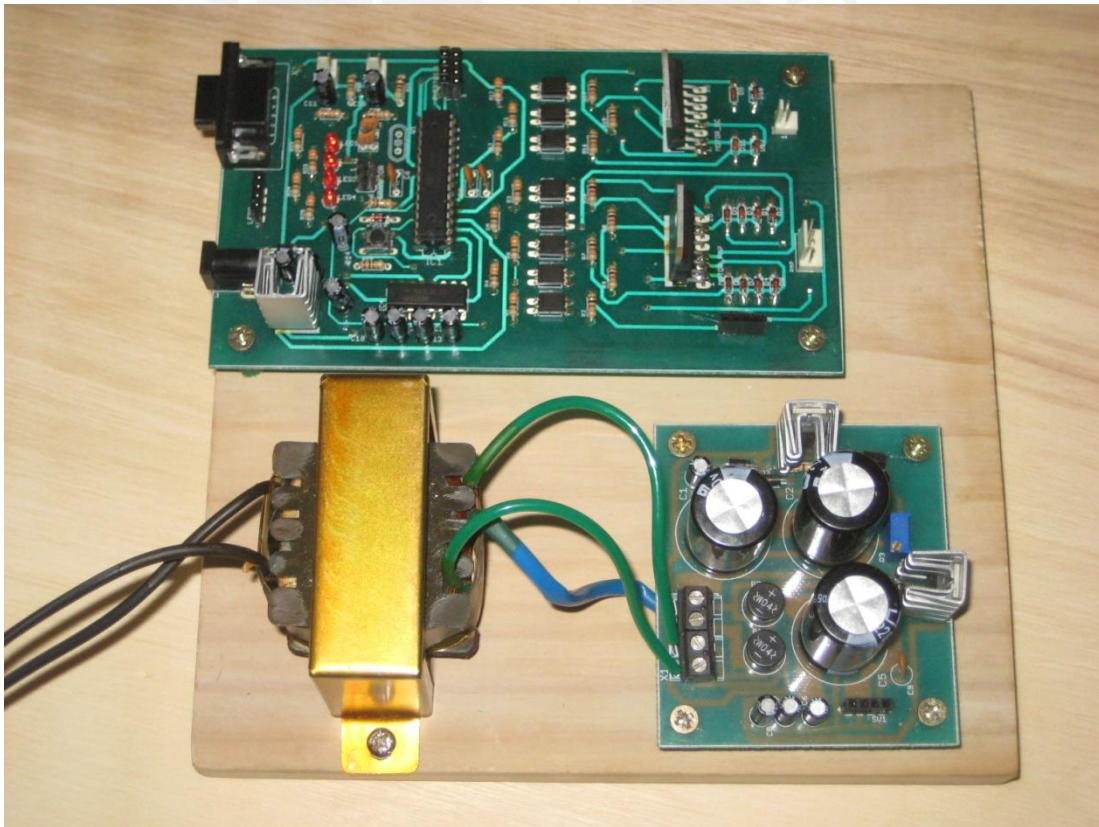
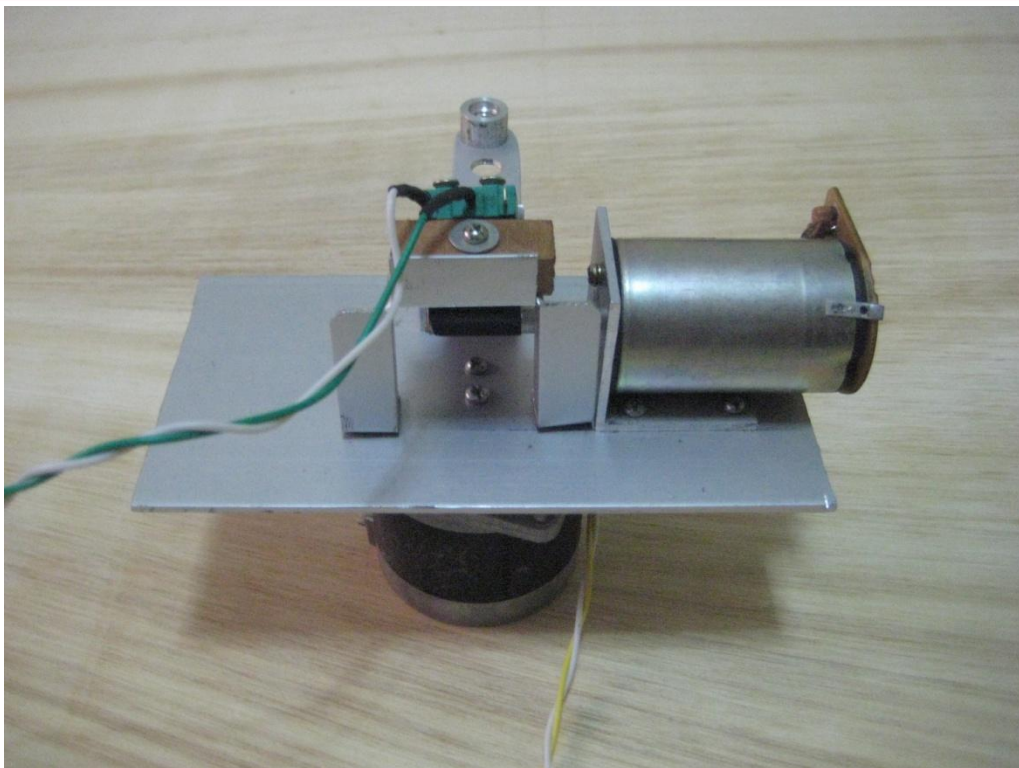


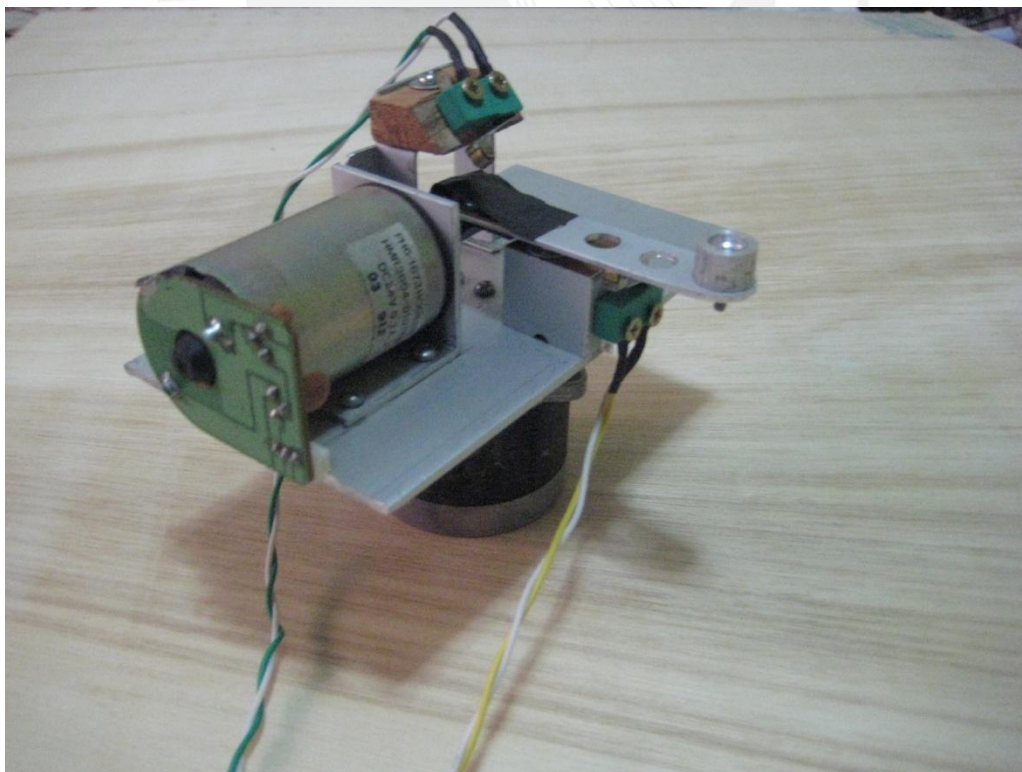
Diagrama de bloques del sistema.



Fotografía del hardware del módulo.



Fotografía del sistema mecánico de lanzamiento: Vista Frontal.



Fotografía del sistema mecánico de lanzamiento: Vista de Perspectiva Oblicua.