

UNIVERSIDAD MAYOR DE SAN ANDRÉS
FACULTAD DE INGENIERÍA
INGENIERÍA ELECTRÓNICA



BITÁCORA

CARACTERIZACIÓN Y DISEÑO

SISTEMAS DE CONTROL II

ETN 902

Estudiantes:

Univ. Cruz Torres Diego Alejandro

Univ. Flores Quispe Nilo

Univ. Siñani Canaza Juan Carlos

Univ. Quispe Ali Juana

Univ. Villca Ticona Richard Néstor

Docente:

Ing. Nava Amador Jorge Antonio

Fecha de Entrega:

BITÁCORA

1. INTRODUCCION

1.1. Motores de Corriente Alterna (AC)

El motor de corriente alterna (AC) son dispositivos esenciales en numerosas aplicaciones industriales y domésticas, desempeñando un papel crucial en la conversión de energía eléctrica en movimiento mecánico.

Estos motores son ampliamente utilizados debido a su eficiencia, simplicidad y versatilidad en una variedad de entornos y aplicaciones.

1.2. Principios Básicos

Los motores AC operan en base a los principios de la inducción electromagnética descubiertos por Michael Faraday. Cuando se aplica una corriente alterna a las bobinas de un motor, se genera un campo magnético rotativo.

Este campo interactúa con el rotor, que experimenta una fuerza electromagnética que lo impulsa a girar.

1.3. Tipos de Motores AC

- **Motor de Inducción:** El tipo más común de motor AC. No tiene conexiones eléctricas directas al rotor. La rotación se logra por la corriente inducida en el rotor.
- **Motor Síncrono:** Mantiene sincronía con la frecuencia de la corriente alterna suministrada. Utilizado en aplicaciones donde se requiere un control preciso de la velocidad.
- **Motor de Paso:** Utilizado para posicionamiento preciso. Se desplaza en pasos discretos en respuesta a pulsos eléctricos.

1.4. Características Principales

- **Eficiencia:** Los motores AC son conocidos por su eficiencia en la conversión de energía eléctrica en trabajo mecánico.
- **Simplicidad:** Suelen ser más simples en diseño y construcción que los motores de corriente continua (DC).
- **Control de Velocidad:** Algunos motores AC permiten un control eficiente de la velocidad mediante variadores de frecuencia.

1.5 Motor Universal

Los motores universales son utilizados en aplicaciones donde se requieran control de velocidad y alto torque

Estos motores pueden funcionar tanto en AC como en DC

1.6 Aplicaciones

- **Industria:** Motores AC se utilizan en maquinaria industrial, sistemas de ventilación, bombas, compresores, y más.
- **Doméstico:** Presentes en electrodomésticos como lavadoras, secadoras, refrigeradores, entre otros.
- **Transporte:** En vehículos eléctricos y sistemas de tracción.
- **Generación de Energía:** Motores síncronos en generadores eléctricos.

2. Simbología en planos de instalaciones eléctricas y Normas Bolivianas

Los símbolos de electricidad desempeñan un papel crucial en la interpretación de planos de instalaciones eléctricas, siendo esenciales para comprender la dotación y flujo de energía eléctrica en un proyecto. Es importante tener en cuenta que las normas que regulan los materiales para una instalación eléctrica básica pueden experimentar modificaciones, por lo que se deben revisar de manera continua o consultar a un proveedor de confianza para obtener las normas actualizadas.

2.1. Normas bolivianas del comité 14.8 – instalaciones eléctricas

- NB 777:2007 Diseño y construcción de instalaciones eléctricas interiores en baja tensión (Primera revisión).
 - Revisión de los requisitos de diseño para instalaciones eléctricas interiores en baja tensión.
- NB 148001-1:2008 Instalaciones eléctricas en baja tensión - Parte 1: Cajas - Especificaciones técnicas, clasificación y métodos de ensayo (Primera revisión).
 - Análisis de las especificaciones técnicas y métodos de ensayo para cajas.

2.2. Símbolos de electricidad en planos

Identificación y descripción de símbolos clave utilizados en planos de instalaciones eléctricas.

- NB 148001-2:2008 Instalaciones eléctricas en baja tensión - Parte 2: Tableros Especificaciones técnicas, clasificación y métodos de ensayo (Primera revisión).
- NB 148002:2008 Instalaciones eléctricas en baja tensión - Tableros individuales de medición y protección - Requisitos y métodos de ensayo (Primera revisión).
- NB 148003:2008 Instalaciones eléctricas en baja tensión - Tableros individuales de medición y protección - Recubrimiento a base de pinturas - Requisitos y métodos de ensayo (Primera revisión).
- NB148004:2009 Instalaciones eléctricas - Sistema de puesta a tierra (PaT) - Glosario de términos (Primera revisión).
- NB 148005:2009 Instalaciones eléctricas - Sistema de puesta a tierra (PaT) - Conductores para puesta a tierra (Primera revisión).

- NB 148006:2009 Instalaciones eléctricas - Sistema de puesta a tierra (PaT) - Electrodo para puesta a tierra (Primera revisión).
- NB 148007:2009 Instalaciones eléctricas - Sistema de puesta a tierra (PaT) - Materiales que constituyen el pozo de puesta a tierra (Primera revisión).
- NB 148008:2009 Instalaciones eléctricas - Sistema de puesta a tierra (PaT) - Medición de la resistividad y la resistencia de puesta a tierra (Primera revisión).
- NB 148009:2004 Instalaciones eléctricas - Sistema de puesta a tierra - Criterios de diseño y ejecución de puesta a tierra.
- NB 148010-1:2009 Instalaciones eléctricas - Protección contra el rayo - Sistema de puesta a tierra (PaT) - Parte 1: Principios generales (Primera revisión) CATALOGO DE NORMAS BOLIVIANAS 2013.
- NB 148010-2:2009 Instalaciones eléctricas - Protección contra el rayo - Sistema de puesta a tierra (PaT) - Parte 2: Evaluación del riesgo (Primera revisión).
- NB 148010-3:2009 Instalaciones eléctricas - Protección contra el rayo - Sistema de puesta a tierra (PaT) - Parte 3: Daño físico a estructuras y riesgo humano (Primera revisión).
- NB 148010-4:2009 Instalaciones eléctricas - Protección contra el rayo - Sistema de puesta a tierra (PaT) - Parte 4: Sistemas eléctricos y electrónicos en estructuras (Primera revisión).
- NB 148011:2008 Instalaciones eléctricas - Estructuras para líneas de 14.4/24.9 kV

3. CARACTERIZACIÓN

El siguiente documento presenta algunas características y pasos que se siguieron para realizar la caracterización de una planta (motor) y su respectivo diseño de un controlador para el mismo, todo esto se encontrara desde un punto de vista propio que tuvieron los integrantes del grupo.

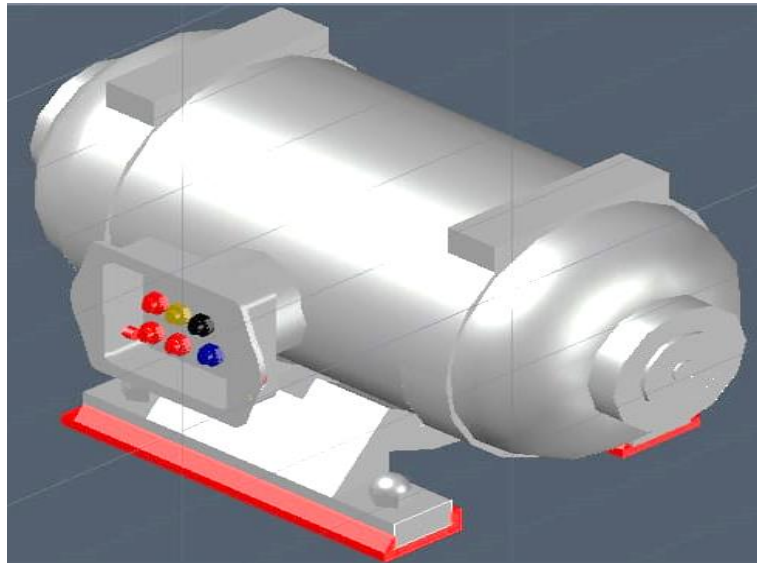
4. ESPECIFICACIONES DE LA PLANTA

La planta asignada al grupo de laboratorio cuenta de dos elementos base, el motor blanco UNIVERSAL marca Seramel y un Encoder KIH40. Cabe recalcar que también cuenta con reóstato que es la fuente de alimentación con la cual funcionara el motor.



a. MOTOR

Una representación gráfica de la carcasa del motor la podemos observar a continuación a través de un dibujo realizado en el software AutoDesk AUTOCAD.



Como se puede observar esta es la representación física de la planta.

El motor presentado se constituye en un motor universal compensado, pues cuenta con elementos característicos como:

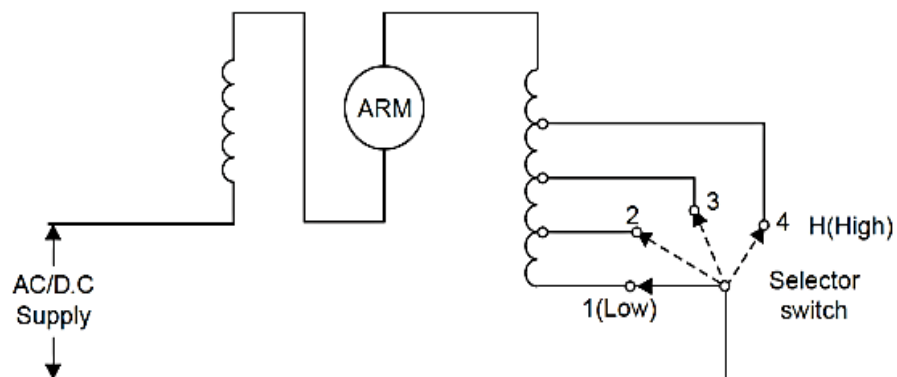
- Presencia de carbonillos
- Conmutador seccionado
- Núcleo de estator cuadripolar
- Bobinas de campo enrolladas en cada polo
- Armadura laminada
- Rotor seccionado y bobinado en serie con las bobinas de campo

- Bobinas de compensación en serie

Las características eléctricas/técnicas de dicho motor, se encuentran plasmadas en una pequeña placa anclada al costado del mismo, a continuación, mostramos las características más relevantes, las cuales son:

| | |
|---------------------|--------------------|
| POTENCIA | $\frac{3}{4}$ [HP] |
| VELOCIDAD | 3300 [rev/min] |
| ALIMENTACIÓN | 220 [V] |

El motor cuenta con un panel de conexiones.



Esta configuración permite el acceso al bobinado principal y modificar el flujo magnético alterando el funcionamiento del motor. Esto permite modificar la velocidad del motor mediante la conmutación de la conexión entre los bornes con alimentación. Se debe considerar estos bornes para el diseño del controlador del motor, como una de las posibles maneras de controlar la velocidad del motor.

b. ENCODER

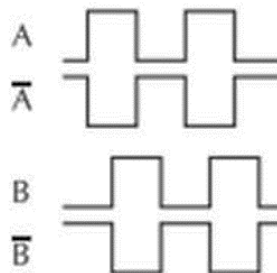
El Encoder utilizado es el modelo KIH40 del fabricante

Algunas características del mismo se mencionan a continuación:

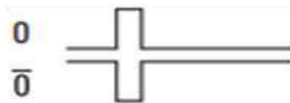
| | |
|--|------------------|
| Diámetro Exterior | 40 [mm] |
| Resolución | 100 [pulsos/rev] |
| Alimentación | 5 – 30 [V] |
| Eje de Hueco Ciego (Profundidad de Inserción) | 8 [mm] |
| Consumo de Energía sin Carga | 100 [mA] |
| Frecuencia de Pulso Máxima | 250 [KHz] |
| Salida a Prueba de Cortocircuitos | Incorporada |
| Velocidad Máxima | 4500 [rev/min] |

Se debe de recalcar las señales que el Encoder genera:

Señal A vs Señal B: La señal A se encuentra adelantada cuando el eje gira en el sentido de las agujas del reloj.



Señal de referencia e inversa: Para cada rotación la señal de referencia se activa por un periodo de tiempo. La señal inversa se desactiva.

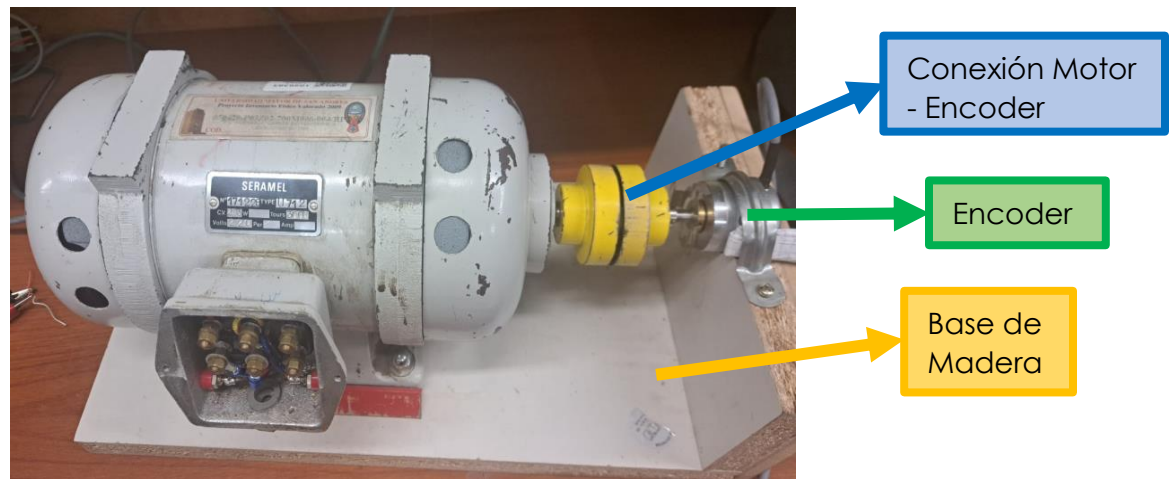


5. CARACTERIZACIÓN DE LA FUNCIÓN DE TRANSFERENCIA DE LA PLANTA

Una vez identificados los elementos básicos de la planta, se produjo el procedimiento para hallar su respectiva función de transferencia, y se la realizo de la siguiente manera:

- Primeramente se debe de realizar la conexión de la forma correcta del motor como del Encoder, para realizar esto se cuenta con una base sencilla de madera proporcionada en el mismo laboratorio, el motor como el Encoder deben estar posicionados de la forma correcta; el motor no presento dificultad alguna por su peso, mientras que el Encoder debe anclarse de manera correcta a la base de madera, ya que al estar anclada directamente al rotor del motor para poder realizar una correcta y precisa lectura (recuerde que el Encoder sera técnicamente el sensor de nuestro sistema de control). Para sujetar el Encoder a la base se encuentra una pequeña hevilla, esta evilla debe ser regulada y anclada de manera

correcta, caso contrario cuando el motor gire a altas velocidades puede causar que el Encoder en el peor de los casos termine saliéndose del lugar de anclaje y caer de forma brusca, dañándose el mismo.



- Una vez realizado el anclaje correcto, se realizara la conexión de los pines del Encoder, como se vio anteriormente el Encoder en general, genera 3 pulsos (véase sección 1.3.), en este caso es indiferente si se toma la señal A o la señal B; ya que el ancho de pulso sera el mismo en ambos casos y solo necesitamos una señal. La señal O no sera considerada, debido a que no es necesaria, en nuestro caso solo necesitamos la señal A.
- Una vez identificado los pines, procederemos a la conexión con nuestra interfaz de datos, la cual en este caso procedimos a realizarla con un microcontrolador Arduino Uno. Lo que se realizo básicamente es tener la señal del Encoder (ya sea la señal A o señal B), esta señal al ser un tren de pulsos sera introducida al microcontrolador y esta a través de un script almacenado y procesado por el Arduino, convertirá los trenes de pulsos a revoluciones por minutos y este valor sera almacenado en una tabla Excel para su respectivo tratamiento en caso de ser necesario.

| | A | B | C |
|----|----------|--------|---|
| 1 | hora | rpm | |
| 2 | 11:35:59 | 0,00 | |
| 3 | 11:35:59 | 0,00 | |
| 4 | 11:35:59 | 0,00 | |
| 5 | 11:35:59 | 0,00 | |
| 6 | 11:35:59 | 0,00 | |
| 7 | 11:36:00 | 7,00 | |
| 8 | 11:36:00 | 53,00 | |
| 9 | 11:36:00 | 95,00 | |
| 10 | 11:36:00 | 121,00 | |
| 11 | 11:36:00 | 137,00 | |
| 12 | 11:36:01 | 146,00 | |
| 13 | 11:36:01 | 158,00 | |
| 14 | 11:36:01 | 165,00 | |
| 15 | 11:36:01 | 169,00 | |
| 16 | 11:36:01 | 172,00 | |
| 17 | 11:36:02 | 174,00 | |
| 18 | 11:36:02 | 181,00 | |
| 19 | 11:36:02 | 182,00 | |
| 20 | 11:36:02 | 182,00 | |
| 21 | 11:36:02 | 186,00 | |
| 22 | 11:36:03 | 186,00 | |

- Una vez obtenidos los datos estos deben de pasar a un script en Matlab, esto se lo hace para poder hallar la función de transferencia, para realizar esta tarea no hace falta mas que tener los ejes de la función de transferencia, en nuestro caso es el tiempo y las revoluciones por minuto. Se debe importar la tabla Excel que se genero en el anterior punto y esta debe ser guardada en arreglos de matrices en Matlab; esto se lo realiza debido a que utilizaremos la herramienta de "System Identification", la cual es una herramienta que ayuda a encontrar modelos de sistemas a través de datos importados de diferentes maneras, una de esas maneras es a través de arreglos matriciales. Se debe recalcar que la herramienta "System Identification" se lo abre directamente desde la ventana de comandos del Matlab y se lo debe abrir una vez importados los datos necesarios.

```

1 clear all
2 clc
3
4 y0 = xlsread('datos3.3V.xlsx','B2:B154');
5 p0 = xlsread('datos3.3V.xlsx','C2:C154');
6
7 y1 = xlsread('datos9.43V.xlsx','B2:B154');
8 p1 = xlsread('datos9.43V.xlsx','C2:C154');
9
10 y2 = xlsread('datos13.7V.xlsx','B2:B159');
11 p2 = xlsread('datos13.7V.xlsx','C2:C159');
12
13 y3 = xlsread('datos18.74V.xlsx','B2:E153');
14 p3 = xlsread('datos18.74V.xlsx','C2:E153');
15
16 y4 = xlsread('datos23.9V.xlsx','B2:B157');
17 p4 = xlsread('datos23.9V.xlsx','C2:C157');
18
19 y5 = xlsread('datos29.2V.xlsx','B2:B157');
20 p5 = xlsread('datos29.2V.xlsx','C2:C157');

```

Command Window: `>> SystemIdentification`

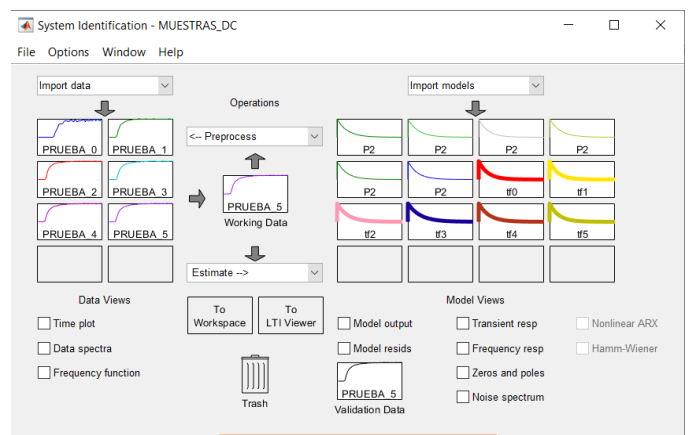
Herramienta necesaria (points to SystemIdentification command)

Datos Importados (points to the xlsread function calls)

- Una vez dentro de la herramienta se debe de volver a importar los datos pero esta vez desde las matrices que se generaron en Matlab, se debe tener tanto datos de entrada como de salida, en este punto se tuvo un inconveniente ya que la alimentación que se tenía era una tensión alterna variable dada a través del reóstato que alimentaba al motor, y también como primera idea para un controlador se prefirió trabajar con tensión continua (esto se lo puede realizar debido a que el motor es universal), por lo tanto añadimos un rectificador sencillo a la salida del reóstato y luego, la salida de este rectificador sería el que alimenta al motor, con una tensión casi similar a la de una tensión continua. Entonces una vez obtenidos los datos de entrada de una tensión continua (función paso, función de entrada) y una la salida del Encoder con el respectivo algoritmo de conversión (función de salida), se procedió a realizar una aproximación a través de la herramienta ya mencionada.

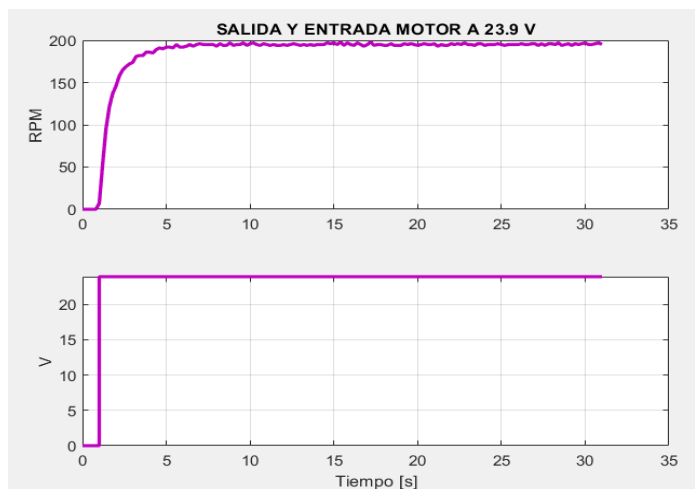
| | A | B | C |
|----|----------|--------------|----------------|
| | hora | (SALIDA) rpm | ENTRADA (PASO) |
| 1 | | | |
| 2 | 11:35:59 | 0,00 | 0,00 |
| 3 | 11:35:59 | 0,00 | 0,00 |
| 4 | 11:35:59 | 0,00 | 0,00 |
| 5 | 11:35:59 | 0,00 | 0,00 |
| 6 | 11:35:59 | 0,00 | 0,00 |
| 7 | 11:36:00 | 7,00 | 23,90 |
| 8 | 11:36:00 | 53,00 | 23,90 |
| 9 | 11:36:00 | 95,00 | 23,90 |
| 10 | 11:36:00 | 121,00 | 23,90 |
| 11 | 11:36:00 | 137,00 | 23,90 |
| 12 | 11:36:01 | 146,00 | 23,90 |
| 13 | 11:36:01 | 158,00 | 23,90 |
| 14 | 11:36:01 | 165,00 | 23,90 |
| 15 | 11:36:01 | 169,00 | 23,90 |
| 16 | 11:36:01 | 172,00 | 23,90 |
| 17 | 11:36:02 | 174,00 | 23,90 |
| 18 | 11:36:02 | 181,00 | 23,90 |
| 19 | 11:36:02 | 182,00 | 23,90 |
| 20 | 11:36:02 | 182,00 | 23,90 |

Datos Recolectados en Excel



Toolbox "System Identification"

- A continuación se vera los graficos de entrada como salida que se importaron a la herramienta de Matlab.

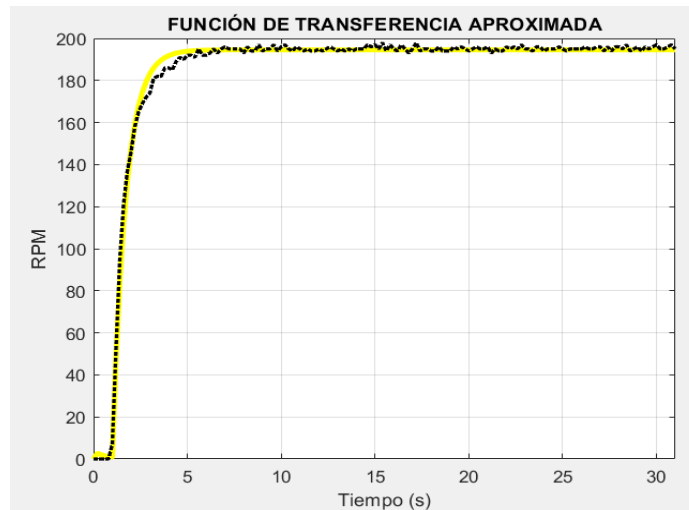


Salida (RPM vs Tiempo)

Entrada Escalon de Amplitud 23,9

- Una vez realizada la estimación a través de la herramienta, se obtuvo la siguiente función de transferencia aproximada con una estimación del 93.87% confiable:

$$\frac{y_1}{u_1} = \frac{47970}{s^2 + 4170s + 5892}$$



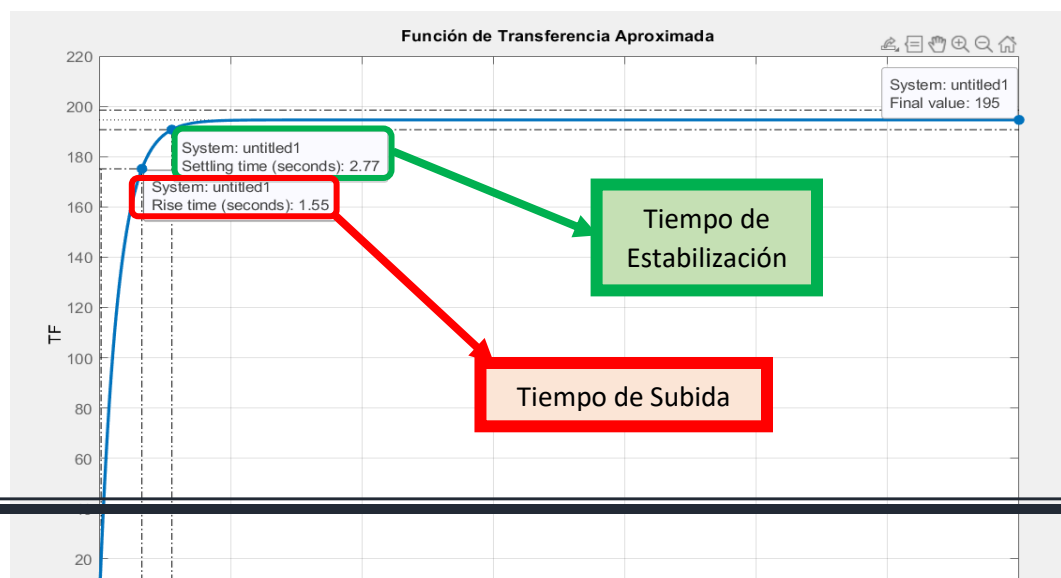
From input "u1" to output "y1":
4.797e04

 $s^2 + 4170 s + 5892$
Name: tf4

Estimated using TFEST on time domain data "PRUEBA_4".
Fit to estimation data: 93.87% (stability enforced)

Gráfica de la Función de Transferencia Aproximada

- De igual manera con la ayuda de Matlab se analizo las características de la función de transferencia estimada, las cuales fueron las siguientes:



```
S =
struct with fields:
    RiseTime: 1.5544
    SettlingTime: 2.7680
    SettlingMin: 7.3638
    SettlingMax: 8.1413
    Overshoot: 0
    Undershoot: 0
    Peak: 8.1413
    PeakTime: 7.4612
```

| Especificaciones | Tiempo (seg) |
|------------------------|--------------|
| Tiempo de Subida | 1,5544 |
| Tiempo de Asentamiento | 2,7680 |
| Asentamiento Mínimo | 7,3638 |
| Asentamiento Máximo | 8,1413 |
| Pico Max | 8,1413 |
| Tiempo Pico | 7,4612 |

1.DISEÑO DEL HARDWARE DEL SISTEMA

El motor es alimentado por el convertidor DC-DC que le proporciona un voltaje de alimentación variable. El convertidor DC-DC es a su vez alimentado por el rectificador principal.

El voltaje de salida del convertidor DC-DC es controlado mediante un potenciómetro digital.

La posición del cursor del potenciómetro es controlada digitalmente mediante el microcontrolador de 8 bits Attiny85.

La velocidad del motor puede ser modificada variando la posición del cursor. La velocidad es medida mediante un encoder incremental.

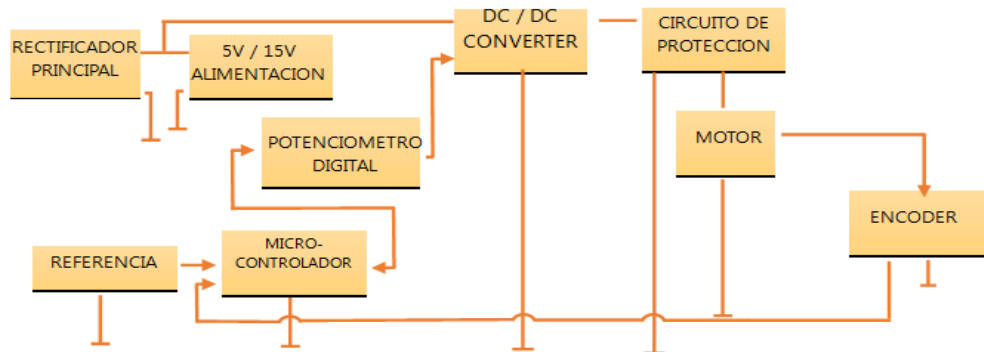
Un potenciómetro deslizante conectado al convertidor AD del microcontrolador, establece el valor de referencia requerido para realizar la acción de control.

Se establece un sistema de control de lazo cerrado mediante la comparación del valor de referencia y el valor medido. Dependiendo de dicha diferencia se modificara la posición del cursor de tal manera que se alcanza una velocidad angular estable que resiste perturbaciones de carga.

La operación del sistema está regulada mediante 2 botones de marcha y paro.

Figura 1

Esquema diseño del sistema

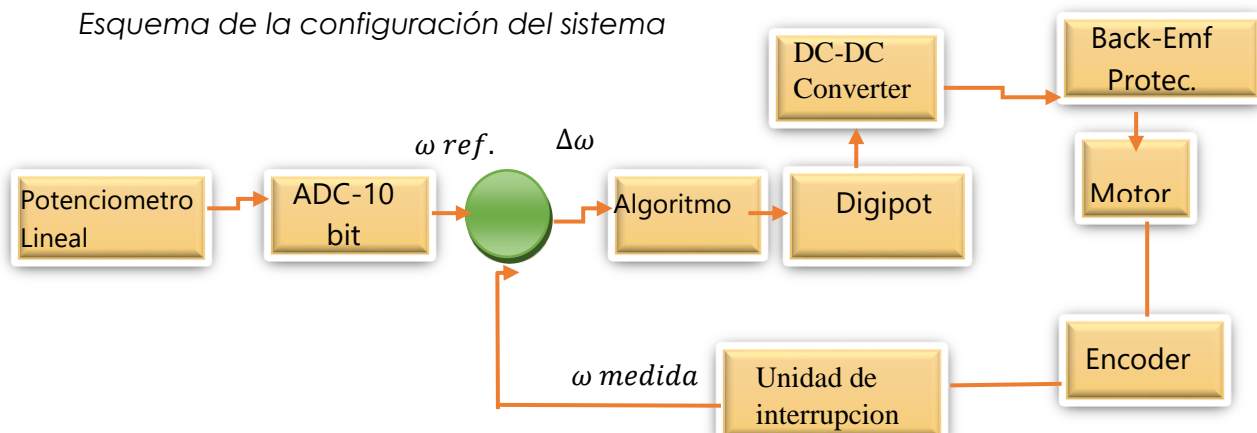


Configuracion del sistema

La configuración del sistema y la relación entre el hardware y software se muestra en la figura a continuación

Figura 2

Esquema de la configuración del sistema



La velocidad angular del motor esta medida mediante el tren de pulsos enviado por el encoder. Cada pulso es contado mediante la unidad de interrupcion del microcontrolador

El valor de referencia esta dado por un potenciometro deslizable conectado a un Puerto A/D del microcontrolador.

Se comparan ambos valores y se introducen a un algoritmo de control PI que los traduce a un tren de pulsos. El potenciómetro lineal recibe el tren de pulsos y modifica la posición de su cursor a una posición deseada.

La posición del cursor del potenciómetro digital determina el voltaje de salida del convertidor DC-DC.

Configuración del Hardware

Figura 3

Diagrama esquemático

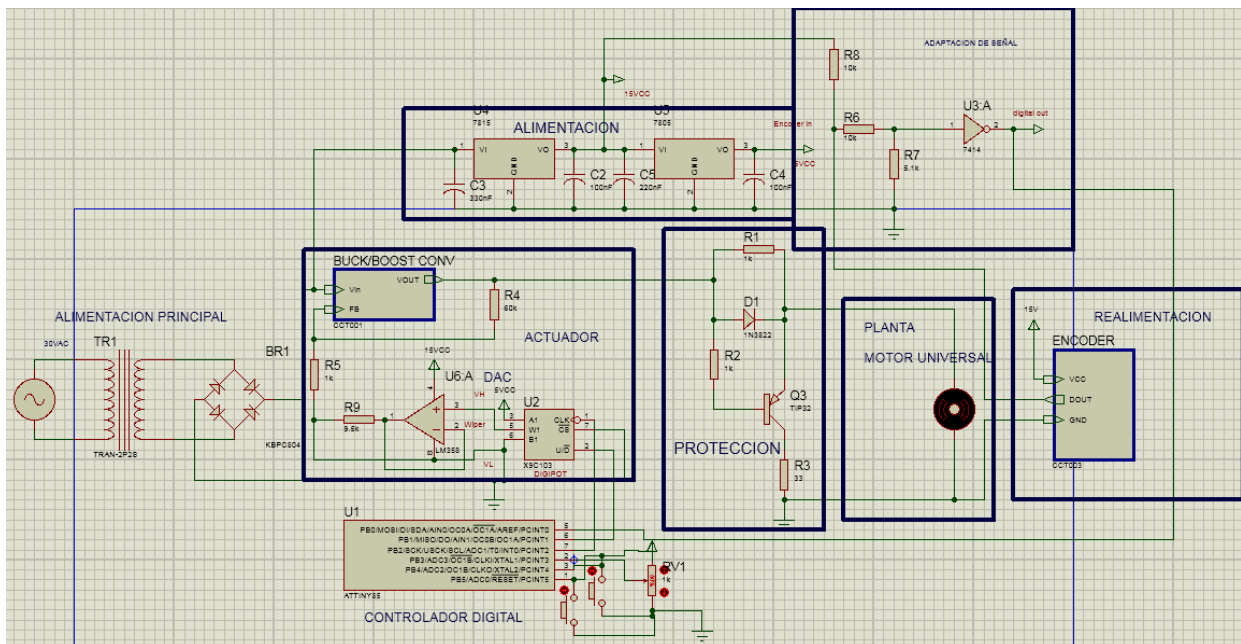


TABLA 1

Configuración I/O del microcontrolador

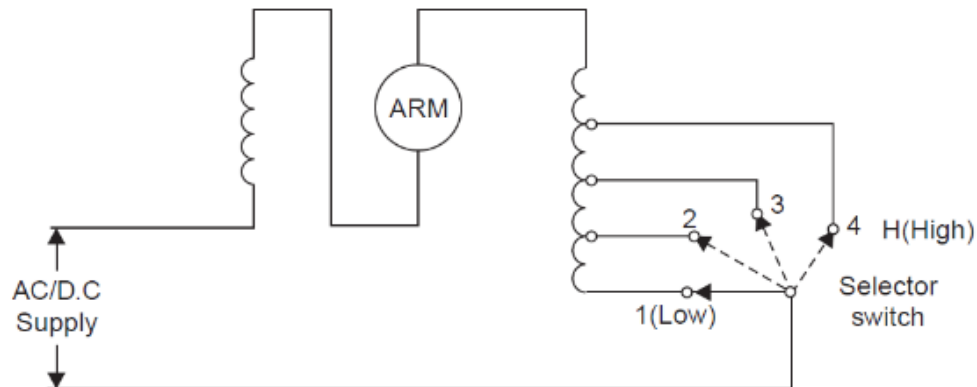
| Pin No. | Nombre del pin | Función |
|---------|----------------|--------------|
| 1 | PB5 | Sin usar |
| 2 | PB4 | Start |
| 3 | PB3 | Stop |
| 4 | GND | Gnd |
| 5 | PB2 | -U/D |
| 6 | PB1 | INC |
| 7 | PB0 | Encoder in |
| 8 | VCC | Alimentacion |

Conexión de los bornes

Al ser un motor universal del tipo "tapped winding", se utiliza la configuración de menor resistencia (4) con el fin de reducir al mínimo la zona muerta del voltaje de funcionamiento del motor (0-3.3V), se escogió como punto de equilibrio 15V y el rango de funcionamiento (0-35V) puesto que la configuración predeterminada del encoder no permite colocar carga en el motor, y al ser este un motor de alto torque debe contar con carga si funciona en altas velocidades pues se corre el riesgo de dañarlo.

Figura 4

Bobinado interno del motor Universal



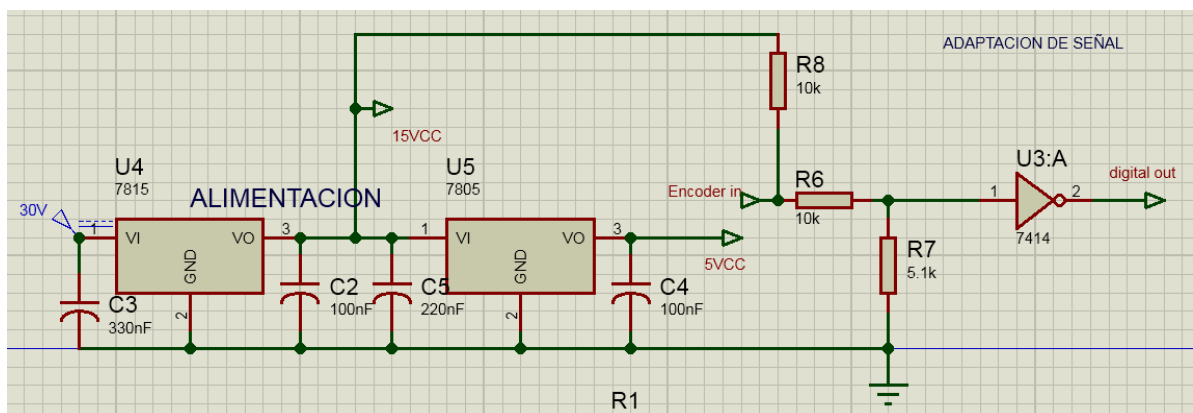
Encoder

Al observar las características del encoder a utilizar, se determina la necesidad de un circuito pull-up y acondicionador de señal (15V-→5V) para obtener un tren de pulsos compatible con TTL, además del imprescindible disparador Schmitt para eliminar ruido.

Como la salida del encoder es del tipo pull-up se utiliza una resistencia típica de 10Kohm (R8) y un divisor de tensión para obtener una salida de $\approx 5V$.

Figura 5

Circuito fuente, acondicionador del tren de pulsos proveniente del Encoder



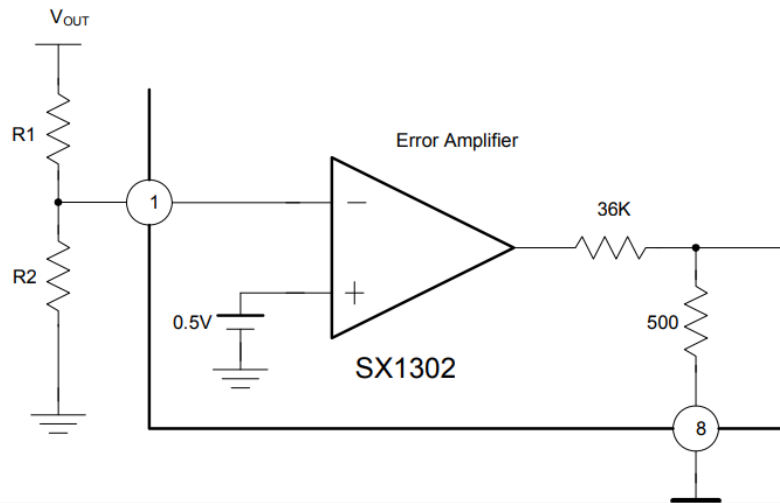
Placa PCB utilizada en el diseño final



Figura 7

Ecuación de modelado del convertidor DC-DC empleado

$$V_{OUT} = \left(1 + \frac{R1}{R2}\right) \times 0.5$$



Mantenedor

Cuando se desea convertir una señal discreta a una continua, el procedimiento más obvio es el de utilizar un DAC, sin embargo la utilización de dicho DAC involucra diversos aspectos a considerar, tales como:

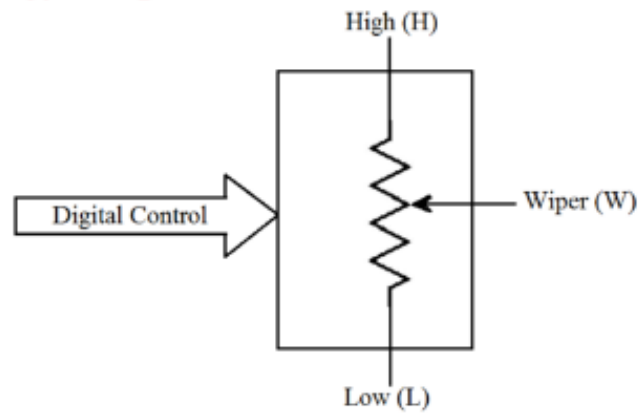
- Resolución del DAC
- Error de conversión
- Señal de referencia
- Interface (Serial,Paralelo,I2C,etc)
- Volatilidad
- Encendido

Se concluye que la utilización de un DAC que tenga características optimas para la implementación es costosa y un modelado complejo

Se opta por utilizar un potenciómetro digital³

Figura 8

Diagrama de un potenciómetro digital



La utilización de un potenciómetro digital permite simplificar enormemente los requerimientos de funcionamiento y modelado, entre las ventajas tenemos:

- Interface digital simple (2 pines de entrada digitales que modifican la posición del cursor)
- Mayor resolución a menor costo
- No requiere señal de referencia
- No volátil
- Precisión de salida compensable
- Fácil modelado

El modelado del potenciómetro digital lo trata como un mantenedor de orden 0 ideal, pues el retraso que presenta es despreciable al ser el tiempo de conversión es mucho menor al tiempo de muestreo ($t_c \ll 50000t_m$).

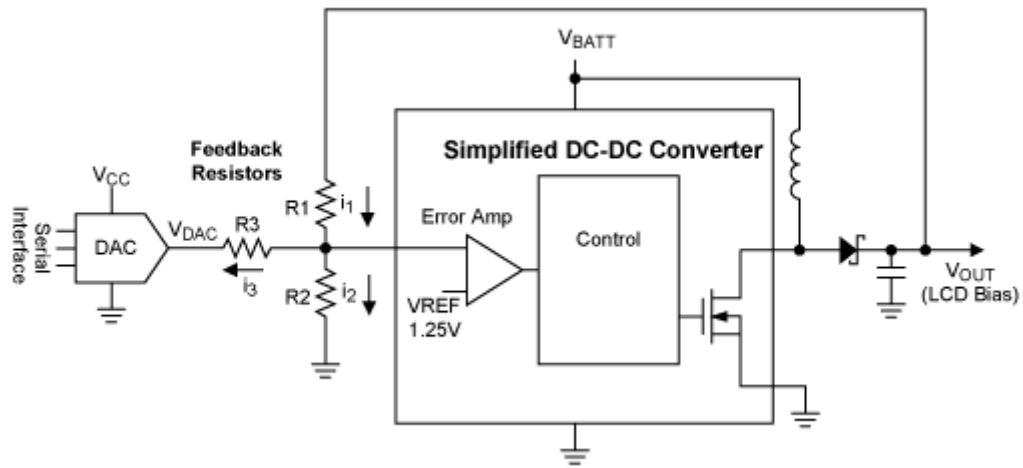
Al añadir un buffer Op Amp a la salida del potenciómetro este es considerado como un DAC.

El Op Amp utilizado es el LM358 que esta diseñado como un amplificador "rail to rail"⁴ característica indispensable para ser utilizado como un buffer de voltaje de alta precisión

Al observar el circuito comparador de la Figura 4, observamos que es posible intervenir en la entrada inversora y tratar el circuito como un sumador-restador entre el voltaje de salida y el voltaje de salida del DAC

Figura 9

Diagrama del circuito propuesto



De las ecuaciones pertinentes de un sumador restador con Op Amp

$$V_{OUT} = V_{REF} + i_1 R_1 \quad (1)$$

$$i_1 = i_2 + i_3 \quad (2)$$

$$i_2 = \frac{V_{REF}}{R_2} \quad (3)$$

$$i_3 = \frac{V_{REF} - V_{DAC}}{R_3} \quad (4)$$

Sustituyendo las ecuaciones 2 y 4 en la ecuación 1

$$V_{OUT} = V_{REF} \left(1 + \left(\frac{R_1}{R_2} \right) \right) + (V_{REF} - V_{DAC}) \left(\frac{R_1}{R_3} \right) \quad (5)$$

Se observa que el máximo voltaje de salida se obtendrá con el voltaje de salida del DAC mínimo, entonces:

$$V_{OUTmax} = V_{REF} \left(1 + \left(\frac{R_1}{R_2} \right) \right) + (V_{REF} - V_{DACmin}) \left(\frac{R_1}{R_3} \right) \quad (6)$$

$$V_{OUTmin} = V_{REF} \left(1 + \left(\frac{R_1}{R_2} \right) \right) + (V_{REF} - V_{DACmax}) \left(\frac{R_1}{R_3} \right) \quad (7)$$

Se determinan los parámetros impuestos:

- Voltaje de salida al motor: 3.3-35V
- Voltaje de salida del DAC 0-5V

Entonces se deben determinar los valores de resistencias R1, R2 y R3 , según la hoja de datos provista por el fabricante R2 debe oscilar entre 1k-1.5k(ohm), por simplicidad de diseño se decide utilizar el valor de 1k

Entonces tenemos 2 ecuaciones (Ec. 6-7) con 2 incógnitas, resolviendo el sistema obtenemos:

- R1=69.6Kohm
- R3=9.14Kohm

Al no encontrar conjuntos de valores de resistencias comerciales que no involucren arreglos complejos, se opto por utilizar potenciómetros multivuelatas de precisión con el fin de obtener la mayor fidelidad al valor obtenido.

La resolución entonces será de 100 posiciones del cursor del potenciómetro, lo que se traduce en una resolución del DAC de 0.05V que es más que suficiente para implementar el controlador digital.

Microcontrolador

Se selecciono el microcontrolador attiny85⁵ pues este es un microcontrolador de bajo costo, alto rendimiento , bajo consumo de 8 bits, 6 líneas de E/S de propósito general, rendimiento de 20 MIPS a 20 MHz y opera entre 2.7 a 5.5 volts.

Figura 10

Pinout del microcontrolador Attiny85

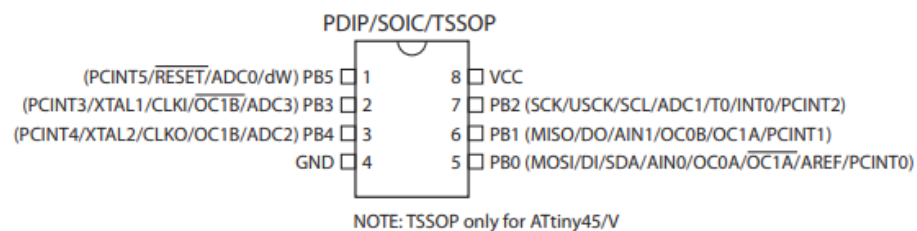
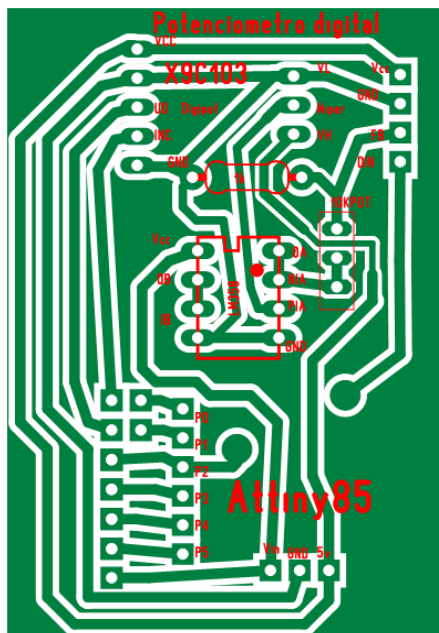


Figura 11

Placa PCB utilizada en el diseño final



Circuito de protección

Uno de los aspectos más importantes a considerar en cuanto a protección de sistemas electrónicos con motores es la presencia de la "Back EMF"⁶ que puede comprometer la seguridad del circuito entero⁷ por lo que es necesario incorporar un circuito que pueda bloquear la corriente auto inducida de retorno cuando el motor se detiene abruptamente.

Figura 12

Circuito de protección Back-EMF



Figura 13

Placa PCB utilizada en el diseño final

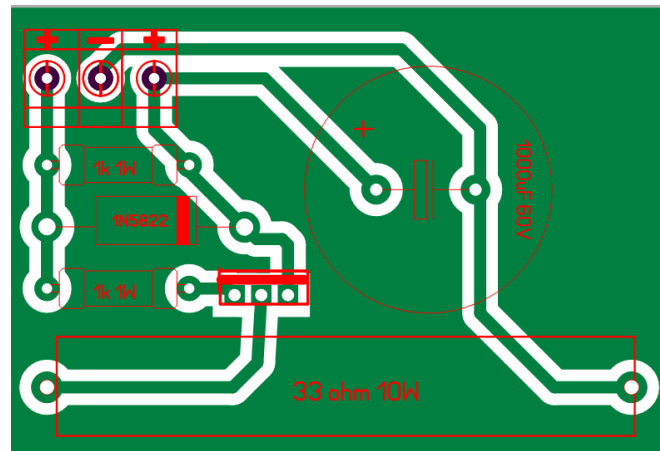
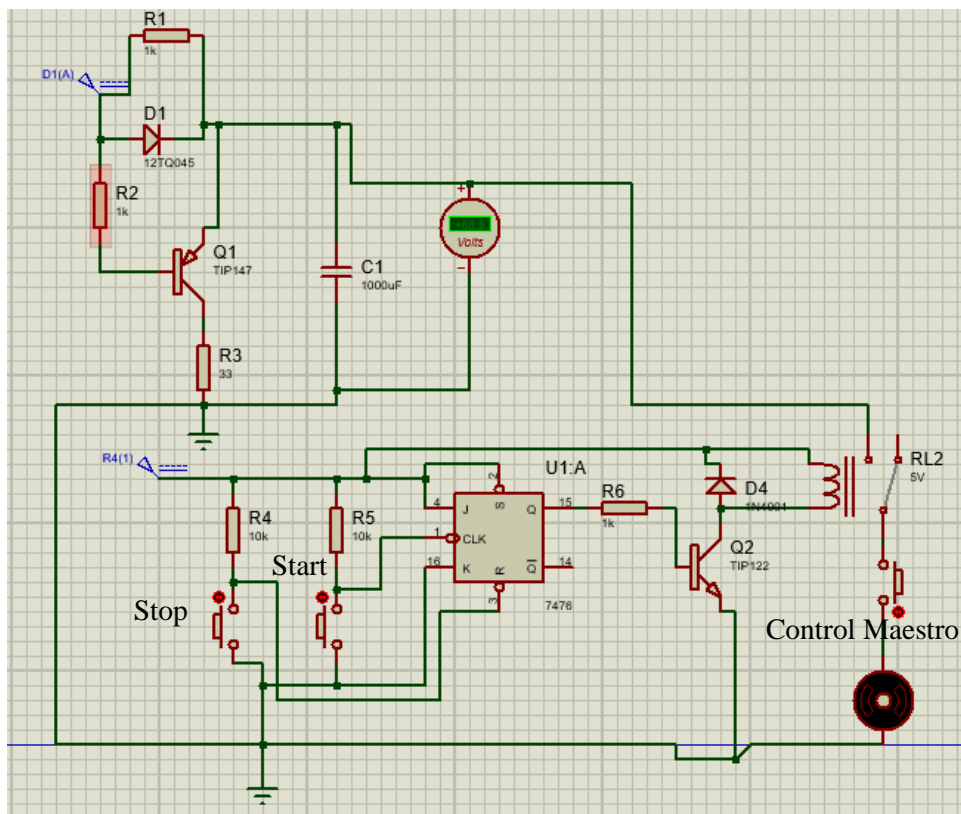


Diagrama esquemático general del panel de protección



Se utiliza un flip flop JK que conmuta su estado de acuerdo al botón presionado siendo el botón Stop el que tiene la mayor prioridad cuando se presionan ambos botones. Al presionar el botón Start se alimenta la bobina interna del relay, conmutando el pin COM al pin NA (Normalmente Abierto), al presionar el botón Stop se conmuta el relay de nuevo al pin NC (Normalmente Cerrado)

1. DISEÑO DEL SOFTWARE DEL SISTEMA

Principal

El programa principal establece la estructura en la cual las subrutinas ejecutan las diversas tareas que involucra el control en lazo cerrado del motor universal.

El programa principal empieza mediante la declaración de las variables a utilizar ya sean enteros, fraccionarios, internas y externas; para después inicializarlas y las deja listas para ejecutar el algoritmo de control.

La rutina Arranque ejecuta un proceso en el cual se establece el valor inicial del contador del digipot en 0.

La rutina Accion de control en el lazo infinito consiste en el ajuste continuo del valor del contador a través del cálculo de la salida deseada mediante un controlador PI discreto.

Declaracion de variables y constantes

Esta subrutina es responsable de inicializar las variables y determinar los pines utilizados y establecer valores iniciales en caso de un reinicio.

Inicializacion

Establece valores iniciales de estados lógicos de las salidas lógicas en caso de un reinicio.

Arranque

Ejecuta un proceso en el cual se establece el valor inicial del contador interno del digipot en 0, con el fin de evitar errores de ejecución pues el programa se basa en el conocimiento actual de la posición del cursor del potenciómetro digital.

Accion de control

Esta subrutina controla la velocidad del motor, en este diseño significa comparar la referencia y la velocidad medida, calculando el error a partir de la diferencia. El error en este contexto implica que el motor está rotando muy rápido o muy lento, o rota a la velocidad de referencia en cuyo caso el error es 0.

Dependiendo del error calculado, la posición del cursor del potenciómetro digital es modificada mediante ecuaciones de cálculo preestablecidas.

Modificar la posición del cursor implica incrementar o decrementar el voltaje de salida del convertidor DC-DC.

La velocidad de referencia está determinada por la posición del cursor del potenciómetro deslizable. El convertidor A/D obtiene continuamente su valor de entrada en cada repetición del bucle de la acción de control y lo prepara para los cálculos que proceden.

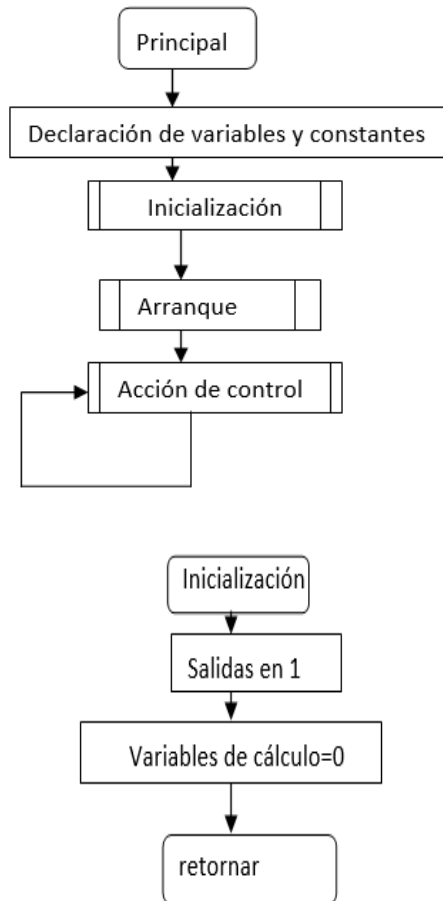
Tanto la referencia como la velocidad medida son variables de tipo float para garantizar la mayor precisión.

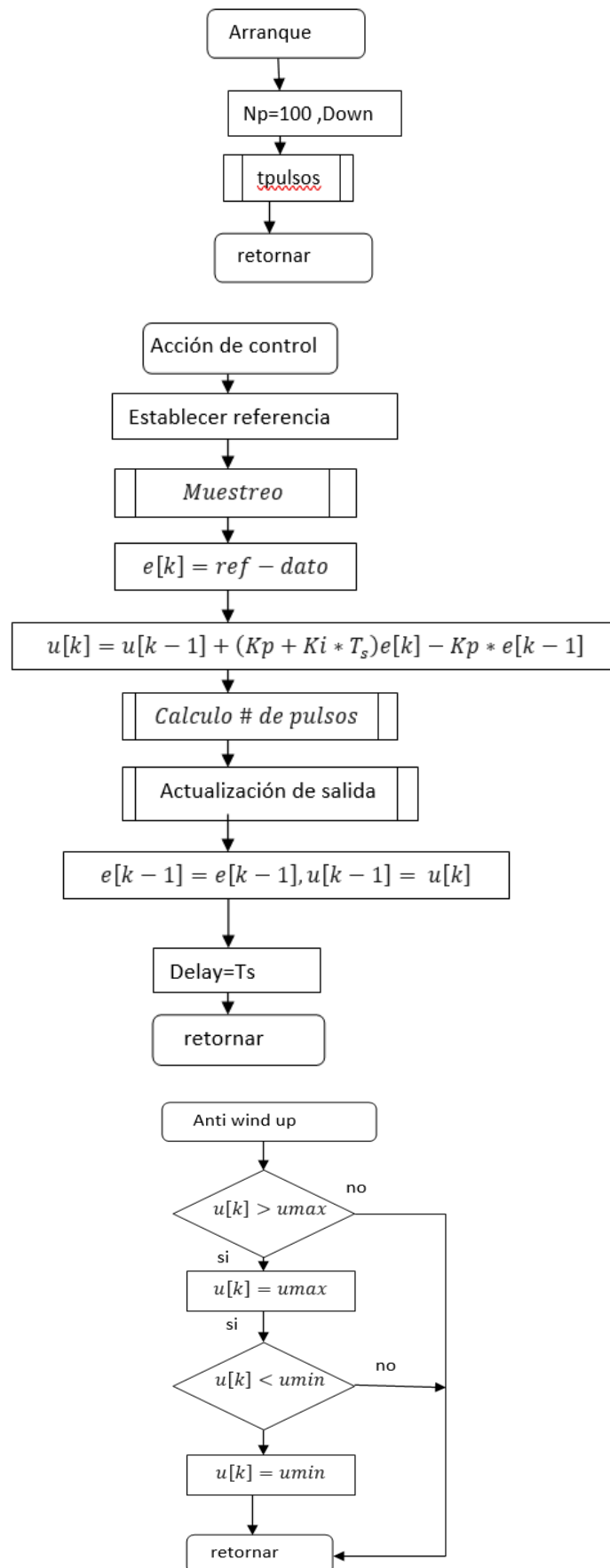
Para determinar la velocidad de rotación se utiliza un esquema de interrupción en el que se cuenta cada pulso enviado por el encoder y mediante una formula de conversión que involucra el numero de ranuras por rotación del encoder, es calculada.

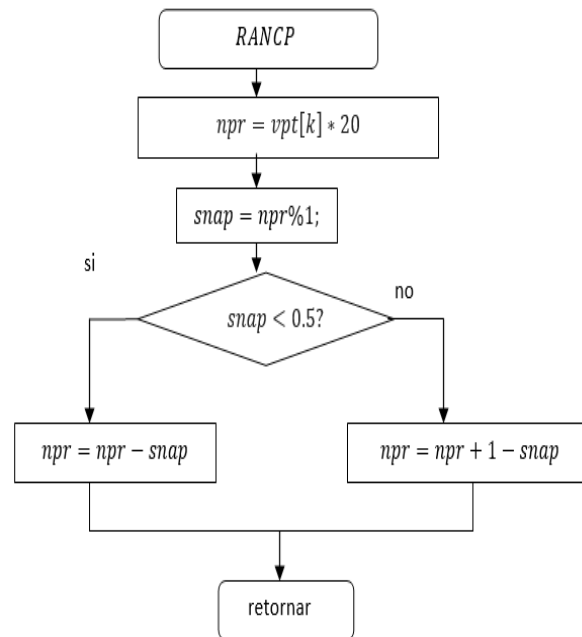
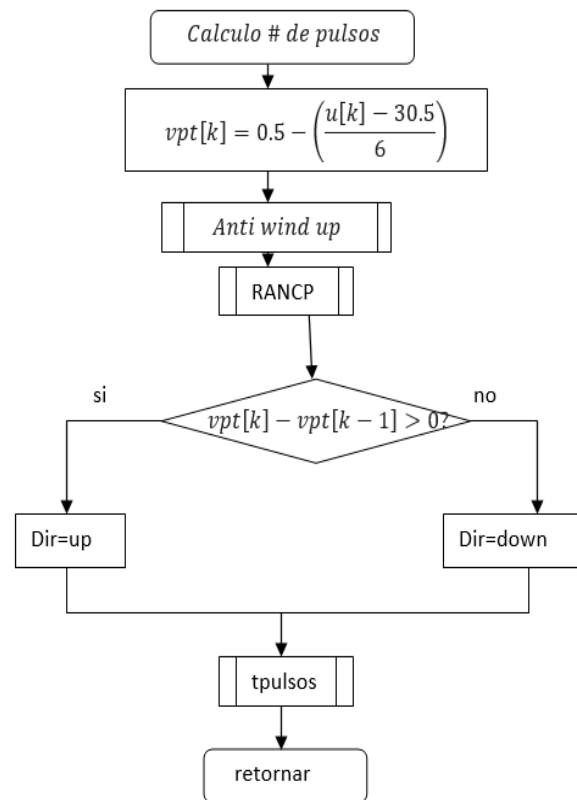
Al calcular la nueva posición del cursor es importante comprobar si existe saturación o valores fuera de rango (0-100).

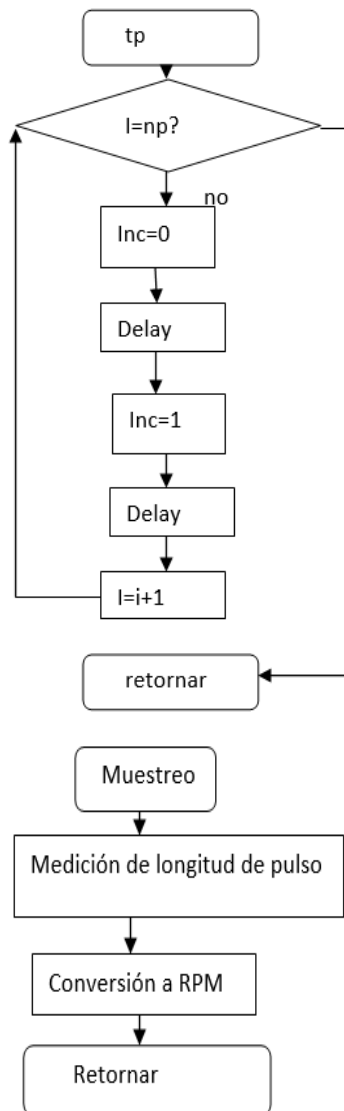
La acción delay es crucial para determinar el tiempo de muestreo, bajo el comportamiento esperado tras el diseño del controlador.

FLUJOGRAMA









CODIGO PROGRAMA EN ARDUINO

El código implementa un sistema de control PID discreto para ajustar la posición de un motor basado en la lectura de un potenciómetro y un encoder.

- Declaración de Variables y Constantes:

```

2 //Declaracion de variables y constantes
3 //Entrada de potenciómetro
4 //Control
5 const byte start = 4;//pin de inicio
6 const byte stopp = 5;//pin de parada
7 //Calculo de salida al potenciómetro
8 float vptn =0;//voltaje calculado nuevo
9 float vpta =0;//voltaje calculado anterior
10 float snap=0;//variable de cuantizacion
11 int npr=0;//posicion del contador deseado
12 int npra=0;//posicion del contador anterior
13 const byte ud = 2;//pin up/down
14 const byte clk = 3;//pin inc
15 int np =0;//numero de pulsos a enviar
16 //CALCULO DE SALIDA DEL CONTROLADOR
17 float ref = 0;//valor de referencia
18 float ck =0;//salida actual del control
19 float ck_1 =0;//anterior salida del controlador
20 float yk = 0; //salida del encoder
21 float ek = 0; //error
22 float ek_1 = 0;//error anterior
23 // VALORES DEL PID
24 const float Kp = 0.117;
25 const float Ki = 0.185;
26 const float Kd = 0;
27 const float ts = 20; //period de muestreo en ms
28 // del encoder
29 const byte Encoder = 1; // Cable amarillo pin 3 digital
30 //int rpm = 0;//
31 unsigned long timeold = 0;

```

- Inicializacion

```

void setup() {
  pinMode(Encoder, INPUT);
  pinMode(start, INPUT);
  pinMode(stopp, INPUT);
  pinMode(ud, OUTPUT);
  pinMode(clk, OUTPUT);
  digitalWrite(ud,HIGH);
  digitalWrite(clk,HIGH);
  vptn =0;
  vpta =0;
  npr =0;
  npra =0;
  // put your setup code here, to run once:
  Serial.begin(9600);
  Serial.println("LABEL,hora,rpm");
  // attachInterrupt(digitalPinToInterrupt(2), calculapulso, RISING);
  //Arranque
  inic();
  while(digitalRead(start)==HIGH){
  }
}

```

FUNCION LOOP

```

void loop() {
  // Accion de control
  //Establecer referencia
  reference();
  // LEER ENCODER
  if(digitalRead(stopp)){
    ctrlact();
    covert();
    tp();
  }
  // ACTUALIZAMOS DATOS DE CK Y EK
  ck_1 = ck;
  ek_1 = ek;
  //salida de pulsos
  vpta=vptn;
  npra=npr;
  delay(ts);
}else{
  while(digitalRead(start)==HIGH){
  }
}
}

```

FUNCIONES ADICIONALES

```

void inic(){
  digitalWrite(ud,LOW);

```

```

    for(int i=0;i<50;i++){
        digitalWrite(clk,LOW);
        delayMicroseconds(10);
        digitalWrite(clk,HIGH);
        delayMicroseconds(10);
    }
    digitalWrite(ud,HIGH);
}
void reference(){
    float vin = analogRead(3);
    ref = vin*(5.0/1023.0)*40;
}
void leerEnco(){
    while (millis()-timeold<ts){
    }
    yk = paso*(0.27777/(millis()-timeold))*(60000/360);
    timeold=millis();
    paso = 0;
}
void inc(){
    paso++;
}
void ctrlact(){
    leerEnco();
    ek = ref -yk;
    ck = ck_1 + ek*(Kp+Ki*ts1)- Kp*ek_1 ; //ECUACION DE RECURRENCIA
}
void covert(){
    vptn=ck*3.33333;    //valor del potenciómetro nuevo
    antiwindup();
    rancp();
    np=abs(npr-npra);
    np1=npr-npra;
    // indica si es positivo o negativo
    if (np1>=0){
        digitalWrite(ud,HIGH);
    }
    else{
        digitalWrite(ud,LOW);
    }
}
void antiwindup(){
    if (vptn>=100){
        vptn=100;
    }
    else{
        if (vptn<0){

```

```

    vptn=0;
}
}
}
void rancp(){
    //Cuantizacion
    snap=fmod(vptn,1);
    if (snap < 0.5){
        npr =vptn-snap;
    }else{
        npr = vptn+1-snap;
    }
}
void tp(){
    for(int i=0;i<np;i++){
        digitalWrite(clk,LOW);
        delayMicroseconds(5);
        //delay(500);
        digitalWrite(clk,HIGH);
        delayMicroseconds(5);
        //delay(500);
    }
}
}

```

- El código utiliza un control PID para ajustar la salida del motor (**ck**) en función de la diferencia entre la referencia (**ref**) y la salida real del encoder (**yk**).
- La función “**reference**” convierte la lectura analógica del potenciómetro (A0) en una referencia.
- La función “**leerEnco**” calcula la velocidad angular (**yk**) basada en la lectura del encoder.
- La función “**ctrlact**” implementa la ecuación de recurrencia del PID. La función “**coverl**” realiza la cuantización y el control del motor.
- La función “**tp**” genera pulsos para controlar el motor.
- Hay algunas partes del código comentadas que podrían ser útiles para futuras expansiones o depuración, como la función “calculapulso” y la medición de rpm.

Referencias

- Improved sensorless control with the ST62 MCU for Universal Motor*. Available at: https://www.st.com/resource/en/application_note/an863-improved-sensorless-control-with-the-st62-mcu-for-universal-motor-stmicroelectronics.pdf (Accessed: 16 December 2023).
- Universal Motor Control Algorithms-Renesas*. Available at: <https://www.renesas.com/us/en/key-technologies/motor-control-robotics/universal-motor-control-algorithms> (Accessed: 16 December 2023).

- Peter, G. and Ján, K. (2022) *Analysis of the power supply influence on the Universal Motor – Doaj, Power Electronics and Drives*. Available at:
<https://doaj.org/article/e65925b852c14c419aa9fbd71a54e000> (Accessed: 16 December 2023).

- (PDF) *speed control of Universal Motor - Researchgate*. Available at:
https://www.researchgate.net/publication/331444905_Speed_control_of_universal_motor
 (Accessed: 16 December 2023).

- *Universal Motor Controller designing for Washing Machines*. Available at:
<https://www.ijsea.com/archive/volume7/issue6/IJSEA07061002.pdf> (Accessed: 16 December 2023).

- *Design considerations for a resistive feedback divider in a DC/DC converter*. Available at:
<https://www.ti.com/lit/an/slyt469/slyt469.pdf> (Accessed: 16 December 2023).

- Improved Universal Motor Drive - STMicroelectronics*. Available at:
https://www.st.com/resource/en/application_note/an422-improved-universal-motor-drive-stmicroelectronics.pdf (Accessed: 16 December 2023).

- (PDF) *teaching the implementation of digital control ... - researchgate*. Available at:
https://www.researchgate.net/publication/338632159_Teaching_the_Implementation_of_Digital_Control_using_Proteus_VSM_Software (Accessed: 16 December 2023).

- *DRM057, Open Loop Universal Motor Chopper based on the MC68HC908QT4 ...* Available at:
<https://www.nxp.com/docs/en/reference-manual/DRM057.pdf> (Accessed: 16 December 2023).

- Alldatasheet.com *X9c103 datasheet(pdf), ALLDATASHEET.COM - Electronic Parts Datasheet Search*. Available at: <https://www.alldatasheet.com/datasheet-pdf/pdf/34246/XICOR/X9C103.html> (Accessed: 21 December 2023).

- *Attiny85 - Microchip Technology*. Available at: <https://www.microchip.com/en-us/product/ATtiny85> (Accessed: 21 December 2023).

- Datasheet - tip120, tip121, Tip122, TIP125, tip127 - low voltage ...* Available at:
<https://www.st.com/resource/en/datasheet/tip120.pdf> (Accessed: 21 December 2023)

- Attiny85 Digispark Mini módulo de placa de desarrollo USB TINY85,
http://kio4.com/arduino/67_Attiny85.htm (accessed Dec. 22, 2023).

