

ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL

Facultad de Ingeniería en Electricidad y Computación

**“DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UNA PLANTA DIDÁCTICA
DE CONTROL DE VELOCIDAD DE UN MOTOR DC PARA EL
LABORATORIO DE CONTROL AUTOMÁTICO - MACI”**

INFORME DE PROYECTO INTEGRADOR

Previo a la obtención del Título de:

INGENIERO EN ELECTRÓNICA Y AUTOMATIZACIÓN

PEGGY LETICIA ITÚRBURU VILLACRESES

ANGEL ANDRÉS FUENTES ROBAYO

GUAYAQUIL – ECUADOR

AÑO: 2019

DEDICATORIA

El presente proyecto se lo dedico a mis padres, Edison Itúrburu y Leonor Villacreses, por ser los pilares fundamentales de mi existencia, por todo el esfuerzo para que sus hijos lleguemos lejos, a mi amigo Freddy Bustos (+) y a mi abuelito José Villacreses (+) quienes me enseñaron a valorar la vida.

Peggy Leticia Itúrburu Villacreses

El siguiente proyecto va dedicado a mis padres, Angel Fuentes y Maritza Robayo, quienes me han guiado y brindado su apoyo a lo largo de mi vida, tanto en la parte personal como profesional. A mis abuelos Carlos Robayo y Digna Carreño por el cariño, la ayuda y el apoyo de siempre.

Angel Andrés Fuentes Robayo

AGRADECIMIENTOS

A Dios por darme vida, salud y sabiduría.

A mis padres por guiarme, ser mi apoyo en cada momento y enseñarme que por más difícil que sea el camino jamás hay que rendirse.

A mis hermanas y hermano por estar siempre para mí, comprenderme y ayudarme.

A mis amigos por brindarme su amistad y compartir conmigo cada momento durante toda esta etapa de formación profesional. Con mención especial a mi mejor amigo y compañero de tesis Angel, quien ha estado conmigo de manera incondicional; Alex, Leo, Juan, José, Jeanca y Freddy (+) mi grupo de estudio y a Wilson por todo su apoyo en este proceso.

Peggy Leticia ItúrburuVillacreses

A mis padres por todo el apoyo, el cariño, y las enseñanzas que me han dado en toda mi vida, y por siempre estar para mí.

A esa persona incondicional que ha estado conmigo una parte importante en mi vida y que día tras día recibo su apoyo y cariño.

A mis amigos por su amistad, quienes han llegado de forma inesperada y de los cuales he aprendido mucho, y han estado conmigo a lo largo de mi vida académica

A mi compañera de tesis y mejor amiga por todo el cariño y amistad recibido, y porque hacemos el mejor dúo.

Y mis amigos especiales que los tengo siempre presentes, Jair, Joffre, José, Abdel, Alex, Juan y Leo, sin contar a todos los que faltan, por el apoyo y la ayuda brindada en todo este proceso académico.

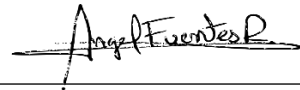
Angel Andrés Fuentes Robayo

DECLARACIÓN EXPRESA

“Los derechos de titularidad y explotación, nos corresponde conforme el reglamento de propiedad intelectual de la institución; Peggy Leticia Itúrburu Villacreses y Angel Andrés Fuentes Robayo damos nuestro consentimiento para que la ESPOL realice la comunicación pública de la obra por cualquier medio con el fin de promover la consulta, difusión y uso público de la producción intelectual”



Peggy Leticia Itúrburu Villacreses



Angel Andrés Fuentes Robayo

EVALUADORES



Msc. Ing. Damián Larco Gómez
PROFESOR DE LA MATERIA



Msc. Ing. Dennys Cortez Alvarez
PROFESOR TUTOR

RESUMEN

El presente proyecto se encuentra orientado a encontrar una solución al problema que existe en el Laboratorio de Control Automático de la ESPOL, el cual se genera a partir de la limitada cantidad de plantas didácticas que los estudiantes utilizan para realizar sus prácticas para uso académico. La adquisición de material práctico representa un alto costo para la institución, por lo que se plantea fabricar un equipo didáctico para el laboratorio con ingeniería local, para de esta forma el laboratorio pueda cubrir dicha demanda y así ofrecer una solución a menor costo.

Para la fabricación de la planta didáctica, se tomó como guía la estación que permite controlar la velocidad de un motor DC. Se realizó ingeniería inversa sobre todo el equipo para así tener conocimientos de las señales que se encuentran involucradas en el control del motor. De esta forma se pudo observar el funcionamiento y a su vez mejorar el nuevo diseño a partir de los requerimientos solicitados por el laboratorio. Para la adquisición de datos y la comunicación entre la planta y el PC, se utilizó la tarjeta de desarrollo Arduino Mega en conjunto con el Driver L298N y un Encoder incremental para el control de velocidad del motor DC. Además, para la perturbación del sistema y realizar el control mediante un PI, se acopló un segundo motor que funciona como generador, en el cual, su corriente de salida puede ser variada a partir de un circuito de carga electrónica variable conectado a la salida del mismo para que afecte directamente a la velocidad del motor DC.

ABSTRACT

The following project is aimed to find a solution to the actual problem that exists at the Control Systems Laboratory in ESPOL, which is related to the limited amount of didactic plants that students uses to fulfill their practices as part of their academical approach. The acquisition of practical material, represents a high cost for the academic unit. Therefore, the main purpose of this project is to create a didactic plant for the laboratory with local engineering, being capable of covering the students demand and giving a better solution with a low cost.

In order to build the didactic plant, it was taken as model the DC motor speed control station. An inverse engineering was done, so some knowledge about the signals involved in the motor control could be acquired. Towards this, it could be observed the operation of the mentioned plant for a improvement in the new design based on the laboratory requirements. For the data acquisition and the communication between the plant and the PC, it was used an Arduino Mega 2560 with a L298N Driver and an incremental encoder for the motor control. Moreover, for the system disturbance and achieve a proper control through a PI controllers. A second motor was set to work as a generator, which output current could be changed using a variable electronic charge circuit at the generator output so it could affect the motor DC speed.

ÍNDICE GENERAL

RESUMEN.....	I
ABSTRACT.....	II
ÍNDICE GENERAL.....	III
ABREVIATURAS.....	V
ÍNDICE DE FIGURAS.....	VI
ÍNDICE DE TABLAS.....	VIII
CAPÍTULO 1.....	1
1. INTRODUCCIÓN.....	1
1.1 Descripción del problema.....	1
1.2 Justificación del problema.....	2
1.3 Objetivos.....	2
1.3.1 Objetivo general.....	2
1.3.2 Objetivos Específicos.....	2
1.4 Marco Teórico.....	3
1.4.1 Motor DC.....	3
1.4.2 Generador de corriente continua.....	4
1.4.3 Circuito filtro pasa bajos.....	4
1.4.4 Circuito de carga electrónica.....	5
1.4.5 Control PID.....	6
1.4.6 Control en lazo cerrado.....	7
1.4.7 Control en lazo abierto.....	7
1.4.8 Control de velocidad de un motor DC.....	8
1.4.9 Puente H.....	8
1.4.10 Encoder.....	9
1.4.11 Tarjeta de adquisición de datos.....	9
CAPÍTULO 2.....	11
2. METODOLOGÍA.....	11
2.1 Implementación del lazo de control entre software de programación gráfica y Arduino.....	13
2.1.1 Programación del bloque para conversión de velocidad en rpm a voltaje.....	15
2.2 Elementos de la planta de control de velocidad.....	16
2.2.1 Tarjetas Arduino: Mega 2560y UNO.....	16
2.2.2 Motor y generador DC.....	18
2.2.3 Driver L298N.....	18
2.2.4 Circuito generador de pulsos FC03.....	19

2.2.5	Fuente de voltaje.....	20
2.2.6	Diseño del circuito filtro pasa bajos	21
2.2.7	Diseño del circuito de carga electrónica variable	22
2.3	Dimensionamiento de la estructura de soporte planta de control de velocidad ..	23
2.4	Diseño de la planta didáctica.....	25
2.5	Diagrama esquemático general	26
CAPÍTULO 3.....		29
3.	ANÁLISIS DE RESULTADOS	29
3.1	Análisis de resultados en el software de programación matemática y software de programación gráfica.	29
3.1.1	Identificación de la planta.....	29
3.1.2	Simulación de la planta de control de velocidad de un motor DC con el controlador.	40
3.2	Planta de control de velocidad de un motor DC	43
3.3	Análisis de costos	46
CAPÍTULO 4.....		49
4.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	49
BIBLIOGRAFÍA.....		51
5.	ANEXOS.....	53

ABREVIATURAS

ESPOL	Escuela Superior Politécnica del Litoral
FIEC	Facultad de Ingeniería Eléctrica y Computación
PID	Proporcional Integral Derivativo
DC	DirectCurrent
AC	Alternating Current
PWM	Pulse Width Modulation
MOSFET	Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor
HDL	Hardware Description Language
FPGA	Field Programmable Gate Array
DSP	Digital SignalProcessor
Tarr	Tiempo de arranque
Tss	Tiempo de estabilización
Po	Punto de operación
Vs	Voltaje de salida
ΔV	Variación

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1 Principio de funcionamiento de un motor DC. [4]	4
Figura 1.2 Regla de la mano izquierda. [3]	4
Figura 1.3 Circuito Filtro pasa bajos [22]	5
Figura 1.4 Circuito de carga electrónica [20]	6
Figura 1.5 Diagrama de bloques de un controlador. [7]	6
Figura 1.6 Ecuación característica del PID. [6]	6
Figura 1.7 Configuración electrónica del puente H. [12]	9
Figura 1.8 Tarjeta de desarrollo Arduino Mega. [14]	10
Figura 2.1. Diagrama de comunicación de la planta de control de velocidad con la PC	11
Figura 2.2 Diagrama de bloques de la planta didáctica incluyendo la retroalimentación para el control de la velocidad.	12
Figura 2.3 Bloques de comunicación de librería Arduino.	13
Figura 2.4 Bloque de entrada para lectura de datos analógicos.	14
Figura 2.5 Bloque de salida para señales digitales	14
Figura 2.6 Bloque de salida de señal PWM – Modulación de ancho de pulso.	14
Figura 2.7 Diagrama de bloques de las señales de comunicación con Arduino	15
Figura 2.8 Código de programación de lector de RPM de Arduino UNO.	16
Figura 2.9 Tarjeta Arduino Mega	17
Figura 2.10 Tarjeta Arduino UNO.	18
Figura 2.11 Motor utilizado en el proyecto	18
Figura 2.12 Driver L298N	19
Figura 2.13 FC03, circuito generador de pulsos	20
Figura 2.14 Fuente de voltaje utilizada en el proyecto	20
Figura 2.15 Diseño en proteus de filtro pasa bajos.	21
Figura 2.16 Diseño en ARES de PCB del filtro pasa bajos.	21
Figura 2.17 Tarjeta electrónica: Filtro pasa bajos	22
Figura 2.18 Diseño en proteus del circuito de carga electrónica variable	22
Figura 2.19 Diseño en ARES del PCB de circuito de carga electrónica variable.	23
Figura 2.20 Tarjeta electrónica: Carga electrónica	23
Figura 2.21 Vista isométrica de la caja.	24
Figura 2.22 Vista Frontal del soporte	24
Figura 2.23 Vista posterior del soporte	25
Figura 2.24 Vista isométrica de la planta didáctica	25
Figura 2.25 Vista frontal de la planta didáctica	26
Figura 2.26 Vista superior de la planta didáctica	26
Figura 2.27 Diagrama Esquemático	28
Figura 3.1 Curva característica de la planta de velocidad	30
Figura 3.2 Arranque del sistema, curva de color azul representa la entrada con el punto de operación. Curva de color roja representa la salida con un tiempo de arranque de 5s.	31
Figura 3.3 Tiempo de estabilización	31
Figura 3.4 Diagrama de bloques en lazo abierto	32
Figura 3.5 Respuesta del sistema, color azul la entrada del sistema y rojo la respuesta de salida.	33
Figura 3.6 Diagrama de bloques en lazo abierto para obtener la respuesta del sistema para el experimento de identificación	33

Figura 3.7 Gráfico en lazo abierto retirando la media	35
Figura 3.8 Gráfico en lazo abierto retirando la media	35
Figura 3.9 Importación de datos	36
Figura 3.10 Procesamiento para la identificación de la planta. De color rojo, el preprocesamiento y de color morado la estimación	37
Figura 3.11 Modelo de proceso para estimar la función de transferencia	38
Figura 3.12 Rangos seleccionados	39
Figura 3.13 Función de transferencia obtenidas con datos reales	39
Figura 3.14 Respuesta a una entrada escalón unitario y lugar geométrico de las raíces ..	40
Figura 3.15 Diagrama de bloques de lazo cerrado con el controlador	41
Figura 3.16 Tiempo de estabilización en la simulación de la planta real con el controlador PI	42
Figura 3.17 Diagrama de boques en lazo cerrado funcionando en modo automático (controlador PI)	42
Figura 3.18 Simulación de la planta de control de velocidad de un motor DC con perturbaciones	43
Figura 3.19 Perturbación en el sistema con carga en 1 y luego carga en 5	43
Figura 3.20 Montaje de las tarjetas en la caja	44
Figura 3.21 Caja con perforaciones	44
Figura 3.22 Elementos ubicados en la caja	45
Figura 3.23 Elementos de la planta didáctica, cableados	45
Figura 3.24 Planta de control de velocidad de un motor DC	46
Figura 5.1 Fotografía de la planta de velocidad	60
Figura 5.2 Software Matlab - editor	61
Figura 5.3 Ejecutar el programa	61
Figura 5.4 Ventana de Sisotool	62
Figura 5.5 Respuesta escalón	62
Figura 5.6 Root Locus Editor	63
Figura 5.7 Requerimiento de tiempo de estabilización	63
Figura 5.8 Requerimiento de overshoot	63
Figura 5.9 Añadir integrador	64
Figura 5.10 Añadir un cero	64
Figura 5.11 Diseño del controlador	65
Figura 5.12 Controlador y Filtro	66
Figura 5.13 Diagrama de bloque en lazo cerrado	66
Figura 5.14 Bloque controlador PID	67
Figura 5.15 Diagrama de bloque en lazo cerrado	67
Figura 5.16 Tiempo de estabilización	68

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2.1 Descripción de pin digitales del Arduino UNO	12
Tabla 2.2 Descripción de pin de alimentación Arduino UNO	12
Tabla 2.3 Descripción de pin analógicos del Arduino Mega 2560.....	13
Tabla 2.4 Descripción de pin digitales del Arduino Mega 2560	13
Tabla 2.5 Dimensiones de caja soporte de planta didáctica.....	24
Tabla 3.1 Datos experimentales para obtener la curva característica	29
Tabla 3.2 Listado de materiales electrónicos	47
Tabla 3.3 Detalle de costos totales materiales de construcción.	48
Tabla 3.4 Detalle de costos totales de Fabricación	48

CAPÍTULO 1

1. INTRODUCCIÓN

El desarrollo de las habilidades prácticas de los estudiantes permite que, se lleve a cabo una evolución de sus destrezas y conocimientos adquiridos en su formación académica, por lo que el manejo de procesos para el crecimiento profesional es de total importancia y beneficio en el aprendizaje de los estudiantes.

El uso de este tipo de plantas, además de proveer a las Universidades de dispositivos para prácticas académicas, provee de material comparables a las encontradas en las industrias, por lo que su uso permite obtener una visión futura del mundo laboral a los estudiantes, permitiendo resolver problemas que se encontrarán a lo largo de su vida profesional.

Los motores de corriente continua establecen una parte fundamental en aplicaciones donde se requieran un fácil control y características de alto rendimiento. Es verdad que, los motores de corriente alterna generan una ventaja en cuanto a mantenimiento, costos y potencia que los motores de corriente continua, pero a su vez es difícil de controlar, por lo tanto, el motor de corriente continua compensa estas desventajas en aplicaciones donde su control se hace más simple y a un costo menor que los motores de corriente alterna y en donde se necesitan un alto par de arranque.

Implementar un control de velocidad de un motor de corriente continua como una planta didáctica para formación académica, permite conocer el comportamiento y funcionamiento del proceso, además de establecer los parámetros de control para que dicha planta pueda funcionar correctamente y en condiciones óptimas de operación y que los estudiantes puedan ganar experiencia en su formación práctica.

1.1 Descripción del problema

El laboratorio de Control Automático de la Facultad de Ingeniería en Electricidad y Computación (FIEC) de la ESPOL, cuenta con una limitada cantidad de plantas didácticas, las cuales, no están diseñadas para mostrartodos los aspectos requeridos, esto representan inconvenientes al momento de llevar a cabo sus prácticas.

La adquisición de plantas didácticas para uso académico por parte del laboratorio de Control Automático es de suma importancia debido a la alta demanda de estudiantes tanto de pregrado y postgrado que realizan sus trabajos prácticos para fortalecer y aplicar los conocimientos adquiridos en la teoría, pero esto representa un alto costo para la institución, por lo que cubrir dicha demanda con las plantas disponibles en el mercado genera un desafío económico para la universidad.

1.2 Justificación del problema

En el presente proyecto se plantea desarrollar un método que permita fabricar y mejorar las plantas de trabajo práctico ya existentes, con la finalidad de cumplir dicha demanda y que los estudiantes puedan realizar sus prácticas de manera más eficaz. En este trabajo, se realizó el diseño e implementación de una planta de control de velocidad de un motor DC, mejorando el diseño electrónico, con el uso del Hardware Arduino para la adquisición de datos de la planta didáctica y la comunicación con las computadoras del laboratorio de Control Automático. Además, el costo de fabricación se reduce debido que se desarrolló integrando componentes y tecnología con ingeniería local.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo general

Diseñar e implementar una planta didáctica de control de velocidad de un motor DC aplicando ingeniería inversa para su respectivo uso en el laboratorio de Control Automático.

1.3.2 Objetivos Específicos

- Mejorar el diseño electrónico de la planta existente con el fin obtener mejores resultados al momento de realizar las respectivas prácticas por parte de los estudiantes de pregrado y posgrado.
- Diseñar y mejorar la estructura mecánica de la planta para conseguir portabilidad de tal forma que el costo de producción de los materiales sea menor.
- Realizar una práctica para la verificación del funcionamiento de la planta en cuanto al control de velocidad.

1.4 Marco Teórico

1.4.1 Motor DC

Las maquinas DC cuentan con un mecanismo llamado conmutador, que permite convertir los voltajes internos de AC en voltajes DC en los terminales. Según la dirección de flujo de potencia que circule a través de la maquina DC, puede operar ya sea como motor o generador.

En un motor DC existen dos devanados, devanados del inducido y devanados de campo. Los devanados del inducido son los que inducen el voltaje, se encuentran ubicados en el rotor o parte giratoria y los devanados de campo son los que producen el flujo magnético, están ubicados en el estator o parte estacionaria. [1]

Los motores DC tienen un alto par de arranque y de desaceleración lo que permite controlar la velocidad en procesos donde se necesite un frenado rápido, inversión de giro o aplicaciones donde se requiera el control de la velocidad constante. [2]

El par de rotación se genera cuando se provee corriente a las espiras del rotor (eje interno), la corriente es llevada por un conductor a través del campo magnético del estator, esto produce un campo magnético opuesto al campo que produce el estator (imán externo), estimulando el desplazamiento de las espiras por ende la rotación, como se observa en la Figura 1.1. Teniendo la dirección de la corriente que circula por la espira del rotor y con la regla de la mano izquierda, expuesta por Fleming, se determina el sentido de giro de la espira. El dedo de en medio representa

la dirección de la corriente, el dedo índice el campo magnético y el pulgar la dirección de la fuerza, observe la Figura 1.2. [3]

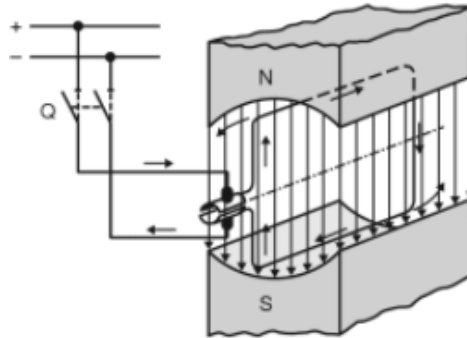


Figura 1.1 Principio de funcionamiento de un motor DC. [4]

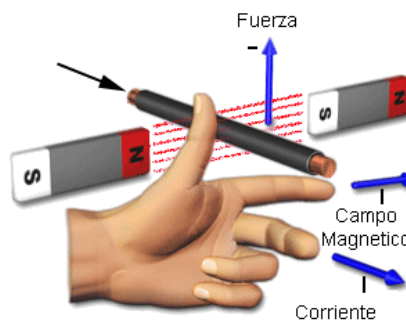


Figura 1.2 Regla de la mano izquierda. [3]

1.4.2 Generador de corriente continua

La construcción del generador es similar a la de un motor de corriente continua. Los generadores transforman la energía mecánica en energía eléctrica utilizando el fenómeno de inducción electromagnética, generando una corriente continua eléctrica.

El campo magnético del inductor (imán permanente), traspasa la bobina del inducido, se produce la corriente inducida alterna, la cual es transformada en corriente continua por la acción del conmutador, colector, el cual está compuesto por delgas conectadas por frotamiento con las escobillas, las cuales conducen la corriente continua al exterior. [5]

1.4.3 Circuito filtro pasa bajos

El filtro pasa bajos, es un filtro que se caracteriza por permitir el paso de las frecuencias más bajas y atenuar las frecuencias más altas. Se construyen usando resistencias en serie con capacitores o inductores, tomando el nombre de filtro pasa bajos RC, Figura 1.3, o filtro pasa bajos RL.[22]

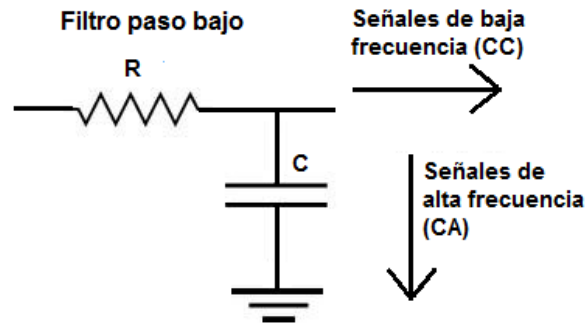


Figura 1.3 Circuito Filtro pasa bajos [22]

1.4.4 Circuito de carga electrónica

Un circuito de carga electrónica, Figura 1.4, sirve para comprobar el funcionamiento de fuentes de alimentación, baterías, cargadores, utilizando amplificadores operacionales, MOSFET, resistencias, capacitores y potenciómetro. Este permite comprobar la estabilidad de una fuente de voltaje al demandarle corriente a partir de la configuración de la carga óhmica con el voltaje del seguidor de tensión. Esta carga varía a partir del voltaje de entrada del comparador con amplificador operacional. [20]

CIRCUITO DE CARGA ELECTRÓNICA

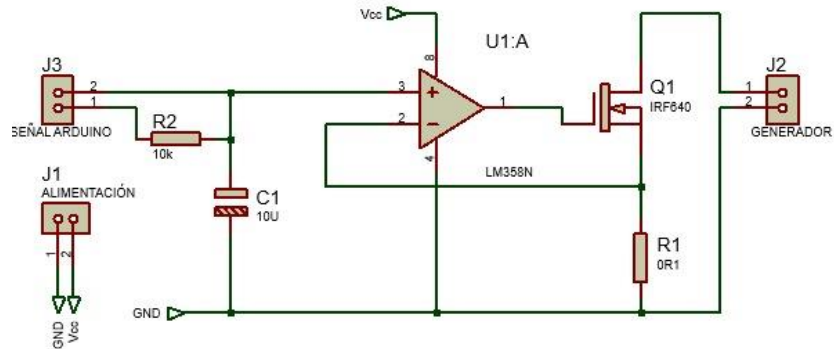


Figura 1.4 Circuito de carga electrónica [20]

1.4.5 Control PID

El PID es un control a través de un lazo cerrado (retroalimentación negativa) permitiendo regular variables como la velocidad, el flujo, presión, temperatura, posición, nivel, entre otros procesos. El controlador PID, Figura 1.5, compara el valor real de la salida de una planta, respuesta $y(t)$, con la consigna $r(t)$, determina el error o desviación y produce una señal de control que va a tratar de disminuir el error o que el error sea cero. [6]

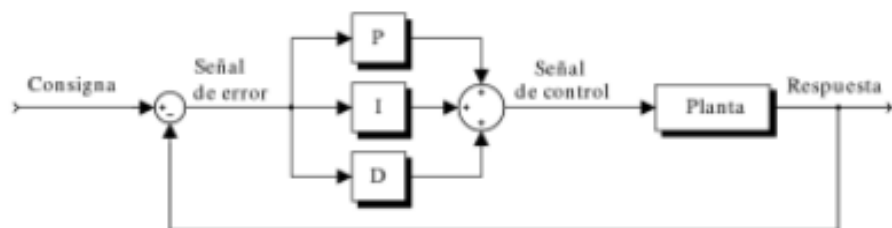


Figura 1.5 Diagrama de bloques de un controlador. [7]

La familia de los controladores PID está formada por las acción proporcional, derivativa e integral. Se observa en la Figura 1.6, la ecuación del controlador PID con sus respectivas constantes. [6]

$$u(t) = K_p \left(e(t) + \frac{1}{T_i} \int_0^t e(T) dT + T_d \frac{de(t)}{dt} \right)$$

Figura1.6 Ecuación característica del PID. [6]

La acción proporcional (P) es la encargada de que el error del sistema (diferencia entre el estado deseado y la respuesta) se aproxime a cero. El parámetro de proporcionalidad es multiplicado con la señal del error de control ($e(t)$), su valor es modificado a través de la constante de proporcionalidad K_p . Al aumentar el parámetro K_p normalmente va a ocurrir un aumento de la velocidad de respuesta del sistema y disminuirá el error del sistema, pero se puede volver inestable el sistema. [8]

La acción integral (I) es la acumulación de la señal de error del sistema, se refiere al tiempo que se toma para que el error de estado estacionario disminuya o se elimine cuando se aumenta el parámetro T_i , pero al aumentar este valor regularmente el sistema se volverá inestable, por lo que se procede a aumentar la acción derivativa. [8]

Cuando el sistema tiene una respuesta inestable se procede a variar la constante derivativa (T_d), por lo que la acción derivativa responde a la velocidad del cambio del error antes de que la magnitud del error ($e(t)$) tome valores muy inestables, por este motivo se la conoce como la acción predictiva ya que prevé el error y corrige. Entonces, normalmente al aumentar la constante T_d se aumenta la estabilidad del sistema, disminuye un poco la velocidad de respuesta del sistema y el error estacionario permanecerá igual, por lo que esta acción debe trabajar junto a la acción integral y proporcional. [8]

1.4.6 Control en lazo cerrado

El control de lazo cerrado son sistemas que permiten realimentar la señal a controlar. Al realimentar la variable de salida se realiza una comparación con la variable deseada (referencia), para poder conseguir un mínimo error o error cero. [9]

1.4.7 Control en lazo abierto

En el control de lazo abierto la variable de salida no se realimenta para realizar una comparación con la variable de referencia. Cada variable de entrada le corresponde una operación fija y, por ende, el resultado del

sistema depende de la calibración. Al existir una perturbación, el sistema de control no va a responder como se requiere, por este motivo sólo se usa este método cuando el sistema no va a presentar perturbaciones y se conoce la relación de la entrada y la salida. [9]

1.4.8 Control de velocidad de un motor DC

El control de velocidad de un motor DC se realiza variando la tensión media a la que el bobinado se encuentra sometido, hay diferentes técnicas para conseguir el control de velocidad. El control básico consiste en emplear PWM variando el ciclo de trabajo, permitiendo mantener constante el par del motor. En el método de variación de fuente con banco de tiristores se varía la amplitud del voltaje con que se alimenta al motor. Además, el control al aplicar una desaceleración de la marcha del motor para invertir su sentido usando frenado regenerativo o frenado dinámico. [10]

1.4.9 Puente H

La configuración electrónica denominado Puente H, Figura 1.7, es un circuito electrónico formado por un conjunto de transistores que permiten el control de un motor de corriente continua. Se encuentra conformado por 4 transistores de conjetura NPN, PNP o de 4 transistores de efecto de campo (MOSFET's) de potencia. El control del motor se realiza a través de las señales enviadas a la base de los transistores, por lo tanto, se puede obtener diferentes aplicaciones tales como el cambio de giro, la parada y la marcha del motor. [11]

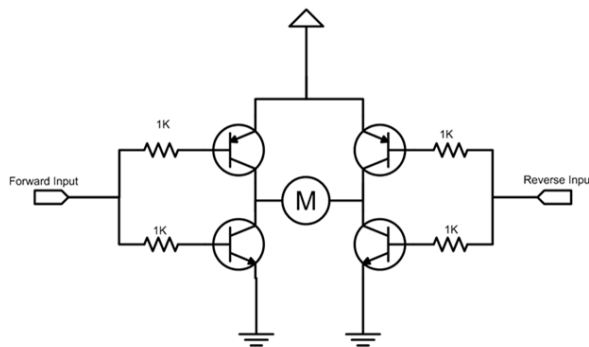


Figura 1.7 Configuración electrónica del puente H. [12]

1.4.10 Encoder

El Encoder es un tipo de transductor giratorio que permite, mediante señales eléctricas, indicar la posición, velocidad y aceleración del rotor de un motor. El funcionamiento se basa en conectar un disco al eje giratorio del motor, el cual puede estar compuesto de plástico o vidrio y que cuenta con unas partes opacas y transparentes alrededor de su circunferencia que bloquean el paso de luz emitido por un emisor infrarrojo. Cuando el eje del rotor empieza a girar, se emite una luz infrarroja que es captada por un sensor óptico, generando de esta forma una señal eléctrica pulsante cuando la luz atraviesa el disco o se bloquea a medida que se encuentra girando el disco acoplado al rotor. Esta señal pulsante se genera de forma secuencial y puede ser utilizada para controlar el giro del motor, la posición e inclusive su velocidad. Existen diferentes tipos de encoder que son utilizados a partir de la aplicación requerida. [13]

Tipos de encoder:

- Lineal
- Incremental
- Cuadratura
- Absoluto

1.4.11 Tarjeta de adquisición de datos.

Una tarjeta de adquisición de datos es un dispositivo que permite capturar señales eléctricas del entorno para que sean procesadas y enviadas hacia un computador para su respectivo análisis y uso. Arduino Mega, Figura 1.8, es una tarjeta de desarrollo que permite realizar diferentes aplicaciones de proyectos electrónicos. En comparación a sus hermanos menores de la misma familia de Arduino, se utiliza cuando los requerimientos en un proyecto electrónico son mucho mayores, por lo que nos permite tener una mayor cantidad de recursos de entradas, salidas, interfaces y memoria. [14]

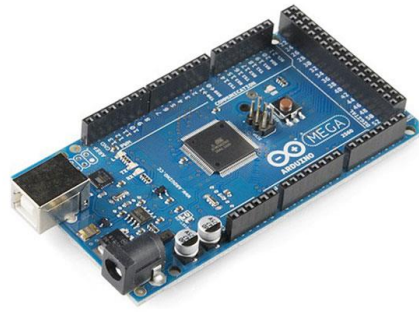


Figura 1.8 Tarjeta de desarrollo Arduino Mega. [14]

CAPÍTULO 2

2. METODOLOGÍA

Para la construcción de la planta didáctica del control de velocidad de un motor DC, se basó en el modelo de la estación que se encuentra en el laboratorio de control automático de la FIEC, siguiendo este diseño se utilizó la técnica de ingeniería inversa, así se logró mejorar la funcionalidad de esta planta y el diseño estructural de la misma. Al usar la técnica antes mencionada se pudo analizar y determinar las señales que intervienen en el control de la velocidad del motor DC. Se emplearon el uso de dos tarjetas Arduino: Arduino UNO para simular un tacómetro y Arduino Mega para la adquisición de datos de la planta. En el eje del motor DC se encuentra acoplado un generador DC y un encoder incremental; el circuito generador de pulsos en conjunto con el encoder y Arduino UNO, simulador de un tacómetro, es el encargado de determinar la velocidad en revoluciones por minuto, esas salidas están conectadas a las entradas del Arduino Mega, por medio del cual se realiza la conversión de RPM a voltaje las cuales se comunican con la PC por medio de bloques que se encuentran en la librería del software de programación gráfica. En el software de programación gráfica se diseñó un controlador PI para realizar el control de la velocidad cuando se presente una perturbación ocasionada por el generador DC, variando su corriente de salida a partir de un circuito de carga electrónica variable conectado a la salida del generador, y así, esta señal es enviada a la PC para afectar directamente la velocidad del motor DC.

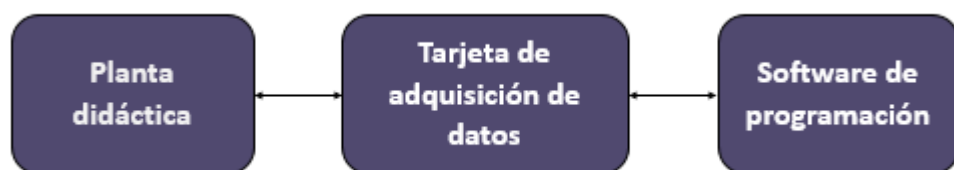


Figura 2.1. Diagrama de comunicación de la planta de control de velocidad con la PC

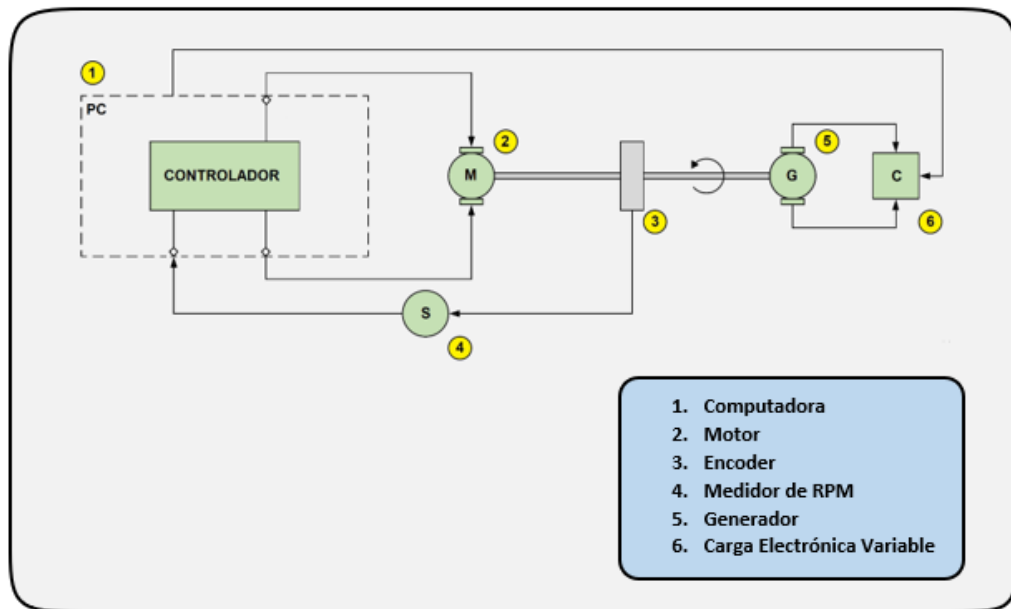


Figura 2.2 Diagrama de bloques de la planta didáctica incluyendo la retroalimentación para el control de la velocidad.

En las tablas 1, 2 y 3 se muestra la distribución de las entradas digitales, salidas digitales y entradas analógicas de las tarjetas de adquisición usadas.

Tabla 2.1 Descripción de pin digitales del Arduino UNO

Nº PIN	Descripción
2	Conectado a pin OUT del generador de pulsos FC03
3	Conectado al pin 3 del filtro pasa bajo
Digital Ground	Pin Gnd conectado al Arduino MEGA

Tabla 2.2 Descripción de pin de alimentación Arduino UNO

Nº PIN	Descripción
Power	Vcc 5V conectado al encoder FC03
Ground Pin	Gnd conectado al encoder FC03

Tabla 2.3 Descripción de pin analógicos del Arduino Mega 2560

Nº PIN	Descripción
Analogground	Pin Gnd conectado al Arduino UNO
A1	Pin A1 conectado al pin OUT del filtro pasa bajo

Tabla 2.4 Descripción de pin digitales del Arduino Mega 2560

Nº PIN	Descripción
4	Pin 4 Señal PWM conectado a pin ENA del puente H
5	Pin 5 Señal PWM conectado a carga electrónica variable
44	Pin 44 conectado a pin IN1 del módulo puente H
45	Pin 45 conectado a pin IN2 del módulo puente H
Digital Ground	Pin Gnd conectado a Gnd2 del módulo puente H

2.1 Implementación del lazo de control entre software de programación gráfica y Arduino.

Para poder utilizar el Arduino Mega como tarjeta de adquisición de datos, se deberá descargar una librería que contenga los bloques de programación como se muestra en la figura 2.3, que nos permitirá comunicar cada entrada y salida del Arduino en conjunto con el software de programación. Cada bloque de la librería realiza una función específica, ya sea para enviar señales de PWM, entradas y salidas digitales, entradas y salidas Analógicas etc. Para este caso se hizo uso de salidas digitales, salida PWM y una entrada analógica para la lectura de datos.

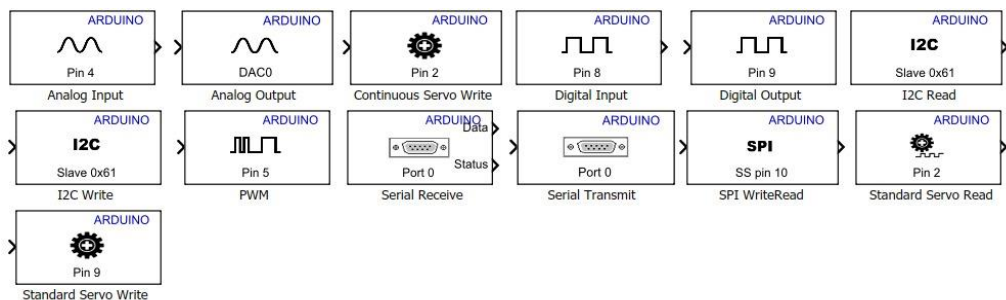


Figura 2.3 Bloques de comunicación de librería Arduino.

Los siguientes bloques se utilizaron para desarrollar el respectivo programa para la comunicación de la planta de control de velocidad del motor con la tarjeta de Adquisición de datos Arduino Mega.

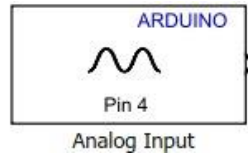


Figura 2.4 Bloque de entrada para lectura de datos analógicos.

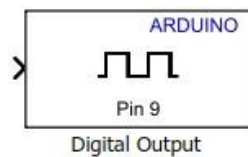


Figura 2.5 Bloque de salida para señales digitales

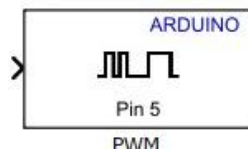


Figura 2.6 Bloque de salida de señal PWM – Modulación de ancho de pulso.

En la figura 2.7 se muestran los bloques de comunicación entre el Software de programación gráfico y la tarjeta de Adquisición de datos Arduino Mega. Los bloques con salidas digitales de pines 46 y 47, son los encargados de marcar el sentido de giro del motor. El bloque de salida PWM del pin 4 se encarga de enviar la señal de modulación por ancho de pulso a la entrada habilitadora del driver para controlar la velocidad del motor. El bloque de salida PWM pin 5, se encarga de enviar la señal de modulación por ancho de pulso para el control de la carga electrónica variable. El bloque de entrada de señal analógica se encarga de recibir la señal procedente del tacómetro para esta poder interpretarla y leerla como dato de voltaje.

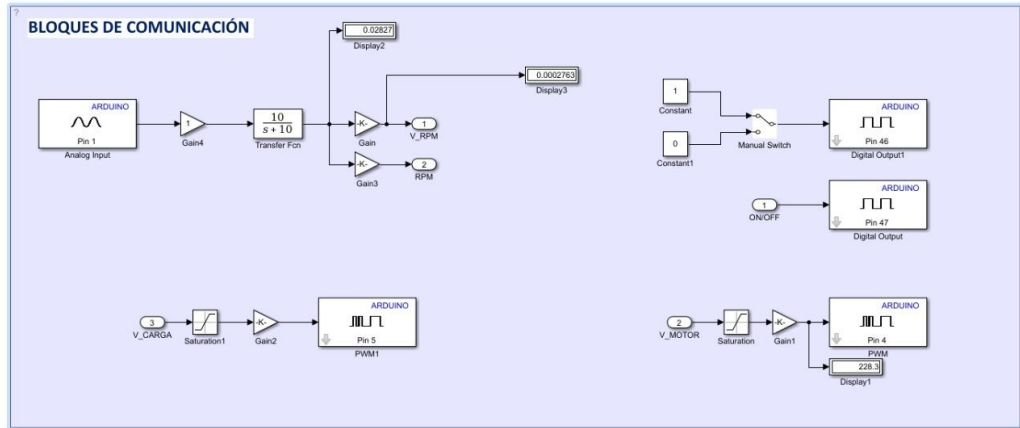


Figura 2.7 Diagrama de bloques de las señales de comunicación con Arduino

2.1.1 Programación del bloque para conversión de velocidad en rpm a voltaje.

En la figura 2.8, podemos observar el código que se utiliza para poder convertir la señal de voltaje del Sensor FC-03 a revoluciones por minuto. Para esto se hace uso del entorno de Arduino para la programación de la tarjeta de desarrollo Arduino UNO y que este funcione como tacómetro digital, en el cual se utilizará como método de programación las interrupciones. Cada que el sensor emita una señal de pulso alto cuando la luz infrarroja atraviesa la ranura del encoder, se activará una interrupción y se ejecutará una función el cual incrementará un contador que permitirá saber cuántas ranuras del encoder se contaran en un minuto. Por lo tanto, se podrá obtener por conversión, el número de revoluciones por minuto y también el voltaje de alimentación del motor asociado a esas revoluciones por minuto.

```

// Contador de RPM by: http://elprofegarcia.com
// Conexion de la entrada de la interrupcion 0 por el PIN 2
// Configurar el monitor serial a 57600 Baudios para visualizar los RPM
// Tienda para comprar Materiales http://dinastiatecnologica.com

volatile int contador = 0; // Variable entera que se almacena en la RAM del Micro
float voltaje = 0;
int conv = 0;
void setup() {
  Serial.begin(57600);
  attachInterrupt(0,interrupcion0,RISING); // Interrupcion 0 (pin2)
}
// LOW, CHANGE, RISING, FALLING

void loop() {
  delay(999); // retardo de casi 1 segundo
  Serial.print(contador*3); // Como son dos interrupciones por vuelta (contador * (60/20))
  Serial.println(" RPM"); // El numero 2 depende del numero aspas de la helise del motor en prueba
  voltaje = (contador*3)*(12.10/20250);
  conv=voltaje*21.25;
  Serial.println(voltaje);
  if (conv>=255){
    analogWrite(3, 255);}
  //Serial.println(255);}
  else{
    analogWrite(3, conv);}
  Serial.println(voltaje*21.25);
  contador = 0;
  voltaje = 0;
}

void interrupcion0() // Funcion que se ejecuta durante cada interrupcion
{
  contador++; // Se incrementa en uno el contador
}

```

Figura 2.8 Código de programación de lector de RPM de Arduino UNO.

2.2 Elementos de la planta de control de velocidad.

2.2.1 Tarjetas Arduino: Mega 2560y UNO

Arduino Mega 2560, Figura 2.9, tarjeta utilizada en el proyecto para la adquisición de datos de la planta didáctica, por poseer con una gran cantidad de recursos de entradas, salidas, interfaces y memoria.

Especificaciones Técnicas:

- Microcontrolador ATMEGA 2560
- Voltaje de alimentación: 6V - 20V
- Corriente de entrada y salida: 40 mA
- Entradas y Salidas Digitales: 54
- Entradas Analógicas: 16
- Salidas PWM: 15
- Memoria FLASH: 256K
- Memoria SRAM: 8K

- Memoria EEPROM: 4K

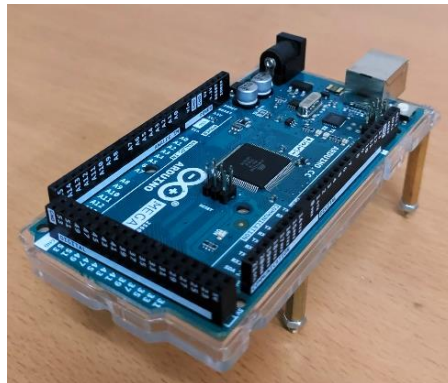


Figura 2.9 Tarjeta Arduino Mega

Arduino UNO, Figura 2.10, tarjeta que se utilizó como tacómetro para la obtención de las revoluciones por minutos, por medio de los pulsos que se envían desde el encoder a sus entradas digitales.

Especificaciones Técnicas:

- Microcontrolador ATMEGA 328
- Voltaje operativo: 5V
- Voltaje de alimentación: 7V - 12V
- Corriente de entrada y salida: 40 mA
- Entradas y Salidas Digitales: 14
- Entradas Analógicas: 6
- Salidas PWM: 6
- Memoria FLASH: 32Kb
- Memoria SRAM: 2Kb
- Memoria EEPROM: 1Kb

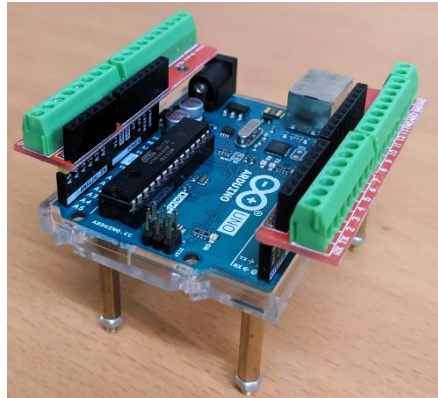


Figura 2.10 Tarjeta Arduino UNO

2.2.2 Motor y generador DC

Especificaciones técnicas:

- Voltaje Nominal: 30V
- Número de revoluciones: 18000 RPM
- Potencia: 210 W
- Corriente: 7 A
- Peso: 630g
- Torque: 2041 N.m



Figura 2.11 Motor utilizado en el proyecto

2.2.3 Driver L298N

El driver L298N utilizado en el proyecto Figura 2.12, es una configuración electrónica de doble Puente H que permite el manejo y control de dos motores de corriente continua de hasta 2 Amperios o de un motor de paso unipolar/bipolar. El control se realiza a partir de señales de lógica TTL que pueden ser obtenidas por microcontroladores o de tarjetas de desarrollo.

Especificaciones Técnicas Circuito Integrado L298N:

- 2 canales
- Voltaje de alimentación: 5V
- Voltaje de alimentación de motores: 5V – 35V
- Corriente de alimentación: 0 a 26 mA
- Potencia Máxima: 25W

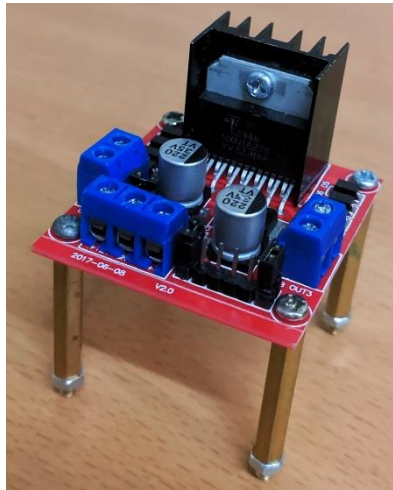


Figura 2.12 Driver L298N

2.2.4 Circuito generador de pulsos FC03

Se eligió el circuito generador de pulsos FC03, Figura 2.13, el cual envía la información de pulsos registrados en un contador, estos pulsos son producidos por el giro del motor, este tiene acoplado en su eje una rueda con ranuras, servirán para cambiar el valor lógico de 0 a 1, cada que pasen entre el led emisor y receptor. Los terminales del generador de pulsos FC03, se encuentran conectados a las entradas del Arduino UNO y así obtener la lectura de la velocidad del motor.

Especificaciones técnicas:

- Sensor de velocidad FC-03
- Alimentación 3.3 – 12V
- Microcontrolador: LM393

- 3 pines
- Led indicador de alimentación

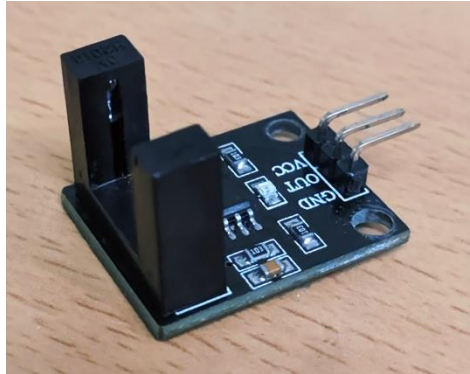


Figura 2.13 FC03, circuito generador de pulsos

2.2.5 Fuente de voltaje

Especificaciones técnicas:

Fuente AC – DC S-120-12

- Input 100 – 120V 60Hz
- 200 – 220V 50Hz
- Output +12V
- Corriente 10A



Figura 2.14 Fuente de voltaje utilizada en el proyecto

2.2.6 Diseño del circuito filtro pasa bajos

En la Figura 2.15 se muestra el diagrama esquemático del circuito filtro pasa bajo que se ha diseñado para que la señal de salida PWM del Arduino UNO se asemeje a una señal analógica, dejando pasa las frecuencias bajas y atenuando las frecuencias altas.

FILTRO PASA BAJOS

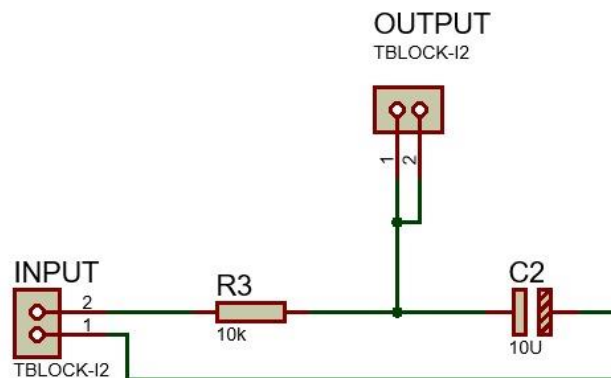


Figura 2.15 Diseño en proteus de filtro pasa bajos.

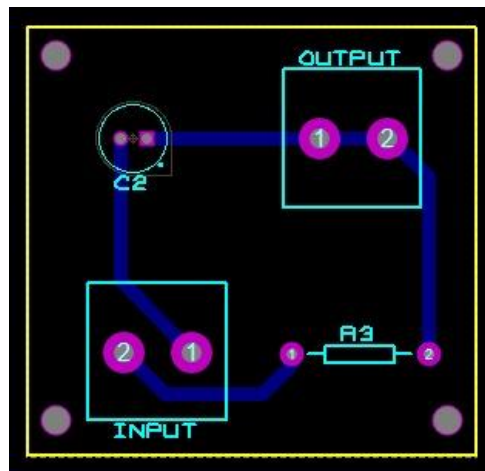


Figura 2.16 Diseño en ARES de PCB del filtro pasa bajos.

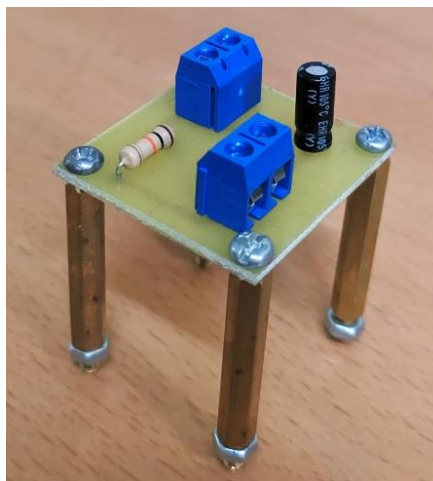


Figura 2.17 Tarjeta electrónica: Filtro pasa bajos

2.2.7 Diseño del circuito de carga electrónica variable

El circuito de carga electrónica variable, mostrado en la figura 2.18, es una configuración electrónica en el cual se hace uso de un amplificador operacional que funciona como circuito comparador - seguidor de tensión y un Mosfet, en conjunto con una carga óhmica. Para la simulación de funcionamiento se hace uso del Software Proteus y para el diseño de la placa PCB se utiliza el software ARES.

CIRCUITO DE CARGA ELECTRÓNICA

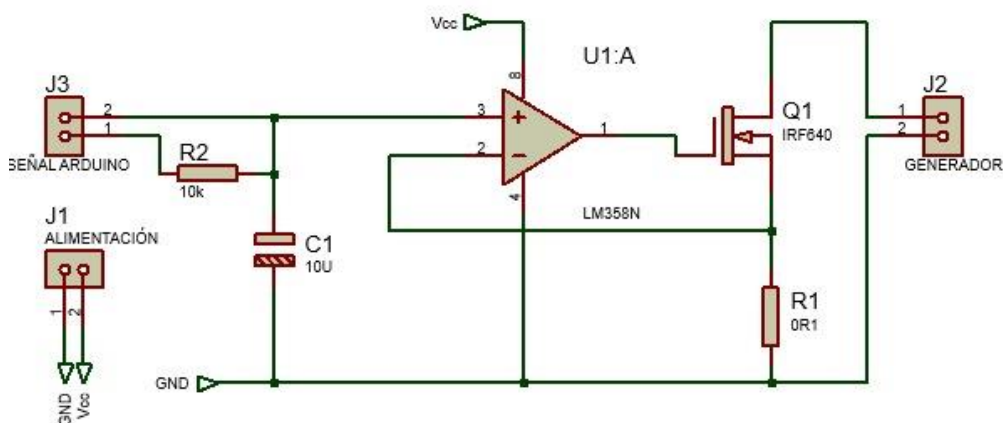


Figura 2.18 Diseño en proteus del circuito de carga electrónica variable

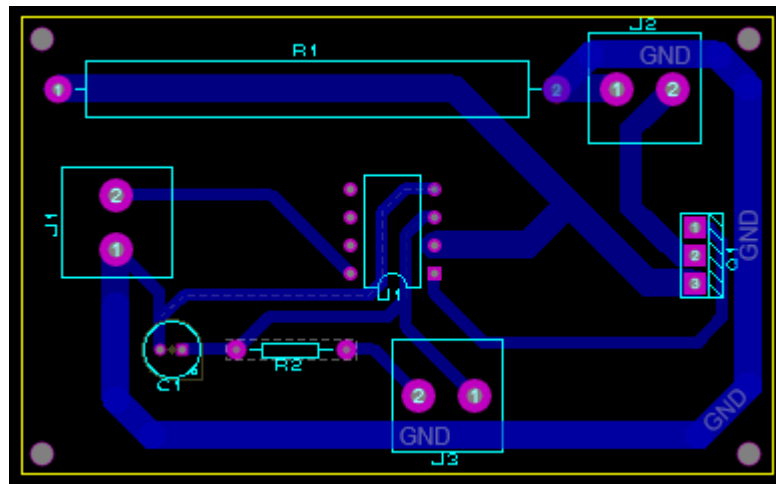


Figura 2.19 Diseño en ARES del PCB de circuito de carga electrónica variable.

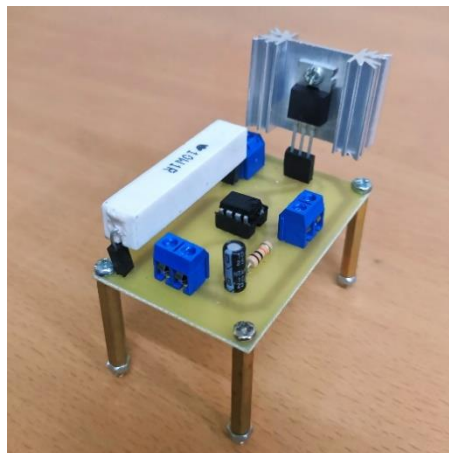


Figura 2.20 Tarjeta electrónica: Carga electrónica

2.3 Dimensionamiento de la estructura de soporte planta de control de velocidad

Para las dimensiones de la estructura, Tabla 2.5, de soporte donde se realizó el montaje de la planta de control de velocidad de un motor DC, se determinó que esta estación debía ser compacta y manejable tanto para el ingeniero encargado de dictar la práctica como para los estudiantes

quienes van a interactuar con la misma al momento del desarrollo de alguna actividad práctica. Para la construcción de la estructura de soporte, se generaron los planos de diseño y medidas de esta.

Tabla 2.5 Dimensiones de caja soporte de planta didáctica

DIMENSIONES	
ALTURA	14.5cm
ANCHO	60.0cm
PROFUNDIDAD	39.5cm

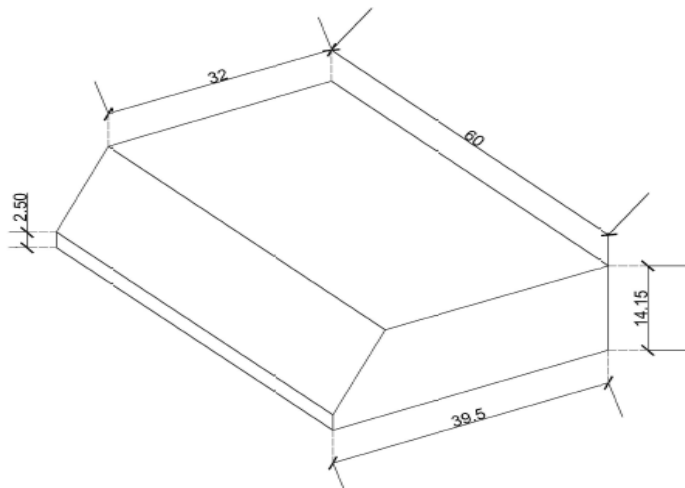


Figura 2.21 Vista isométrica de la caja.

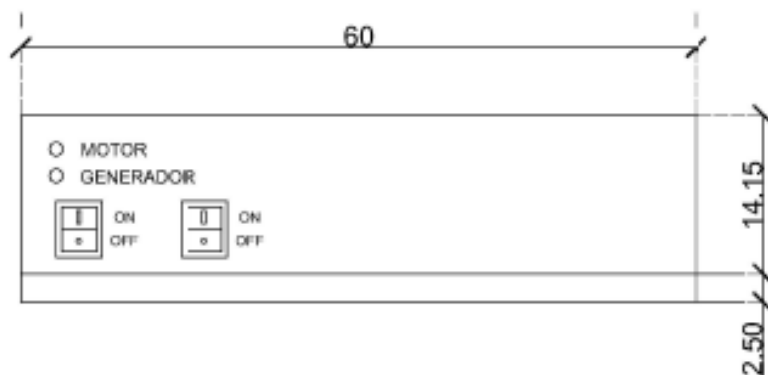


Figura 2.22 Vista Frontal del soporte

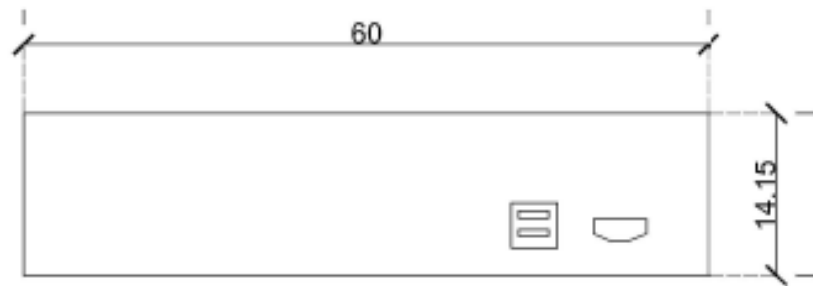


Figura 2.23 Vista posterior del soporte

2.4 Diseño de la planta didáctica

Una vez finalizado la estructura del soporte de la planta didáctica se procedió a ubicar los soportes para los motores y los elementos que conforman la planta como son el motor acoplado con el eje, encoder y generador.

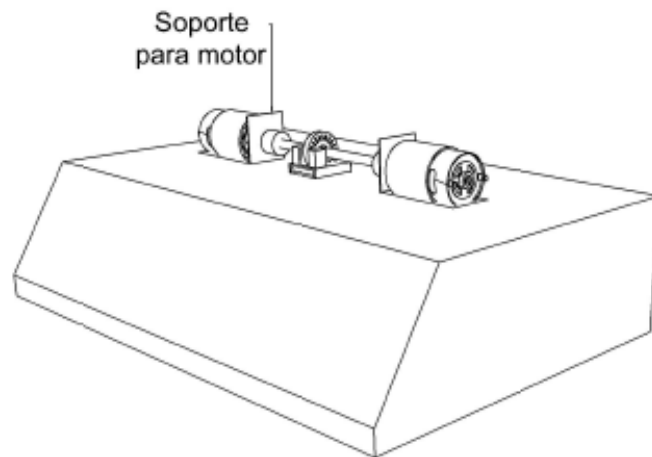


Figura 2.24 Vista isométrica de la planta didáctica

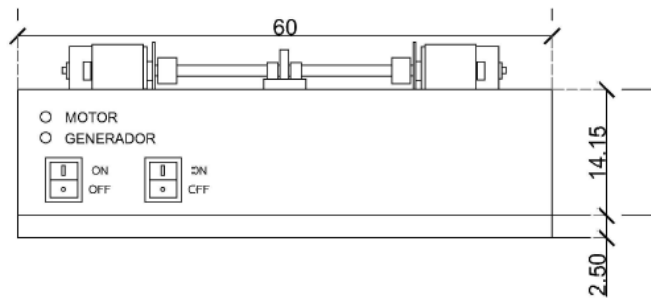


Figura 2.25 Vista frontal de la planta didáctica

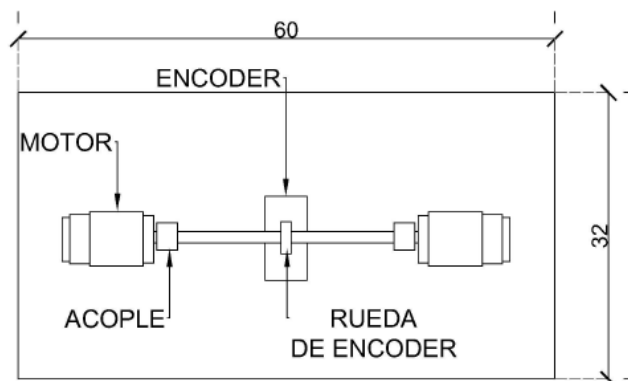


Figura 2.26 Vista superior de la planta didáctica

2.5 Diagrama esquemático general

En la Figura 2.27 se muestra el diagrama esquemático de las conexiones entre los dispositivos electrónicos que forman la planta de velocidad. La tarjeta de desarrollo Arduino Mega es utilizada como el controlador principal del sistema. Este permite realizar la adquisición de datos y a su vez enviar las señales necesarias para realizar el respectivo control. De esta tarjeta se envían dos señales digitales (PIN 44 y PIN 45) al módulo del puente H, éste se encarga de encender el motor y configurar el sentido de giro. También se envía una señal PWM (PIN 4) que permite modificar la velocidad del motor por medio de una modulación por ancho de pulso en la entrada habilitador ENA del driver. Por medio de otra señal de PWM (PIN 5) conectada a la tarjeta electrónica del circuito de carga variable, se puede modificar el valor de la carga que se encargará de perturbar el sistema,

demandándole corriente al generador y que este disminuya su voltaje y a su vez sus revoluciones por minuto. La entrada Analógica (PIN A1) se encarga de adquirir la señal enviada desde el Arduino UNO, que a su vez pasa se encuentra conectada a un filtro pasa bajos, para que este pueda interpretar la señal de manera analógica.

Arduino UNO es el encargado de realizar la función de tacómetro digital, el cual va conectado al módulo generador de pulsos FC-03 por medio de la señal de entrada digital (PIN2), y que en la programación lee los datos digitales adquiridos en esta entrada, activando una interrupción y ejecutando la función que cuenta el número de ranuras del encoder en un minuto, para obtener las revoluciones por minutos y convertirlo en lectura de voltaje, enviada desde una salida digital de PWM (PIN3) que pasa por un filtro pasa bajos y que pueda ser interpretada por el Arduino MEGA.

Adicionalmente cuenta con los leds indicadores del encendido del motor y generador, también cuenta con el interruptor de encendido de la planta didáctica y el interruptor del encendido del motor.

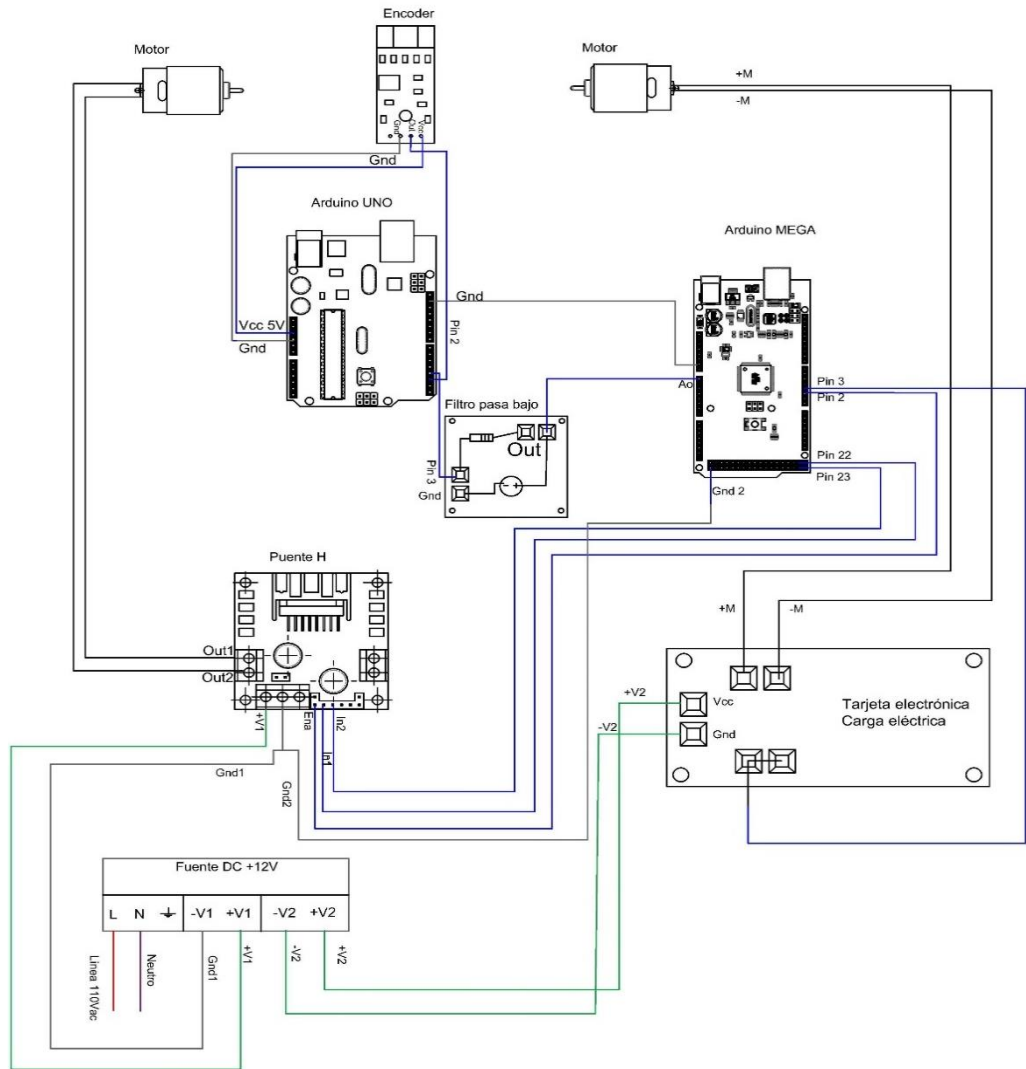


Figura 2.27 Diagrama Esquemático

CAPÍTULO 3

3. ANÁLISIS DE RESULTADOS

En este capítulo se presenta el análisis y los resultados obtenidos de la simulación de la planta didáctica de control de velocidad de un motor DC utilizando un software de programación matemática y software de programación gráfica, para la identificación del sistema y el diseño del controlador para lograr el control de velocidad del motor DC.

3.1 Análisis de resultados en el software de programación matemática y software de programación gráfica.

3.1.1 Identificación de la planta

Para la identificación de la función de transferencia del sistema se debe encontrar la curva característica de la planta real, con la cual se determinará el comportamiento de la planta. Dentro del proceso para la identificación de la dinámica del motor DC, se realizaron varios experimentos para hallar el mejor punto de operación (P_o) y con este valor de P_o poder obtener el tiempo de arranque (T_{arr}) y tiempo de estabilización del sistema (T_{ss}), logrando observar el comportamiento del voltaje de salida (variable de salida) con respecto al voltaje de entrada (variable de entrada) de la planta de velocidad del motor DC. En dichos experimentos para la identificación de la planta, se consideró al voltaje de entrada como la variable manipulada, y al voltaje de salida como variable controlada.

En la Tabla 3.1, se puede observar los datos experimentales para obtener la curva característica del sistema, datos que se obtuvieron realizando pruebas en el sistema de la planta de velocidad con una entrada de voltaje, la cual varía en pasos de 0.25, dando el respectivo voltaje de salida. Nótese en la Figura 3.1; la curva característica de la planta de velocidad construida con los respectivos datos experimentales, presentando un comportamiento lineal.

Tabla 3.1 Datos experimentales para obtener la curva característica

Voltaje de entrada	Voltaje de salida
2	1.03
2.25	1.169
2.50	1.352
2.75	1.582
3	1.817
3.25	2.01
3.50	2.147
3.75	3.369
4	2.609

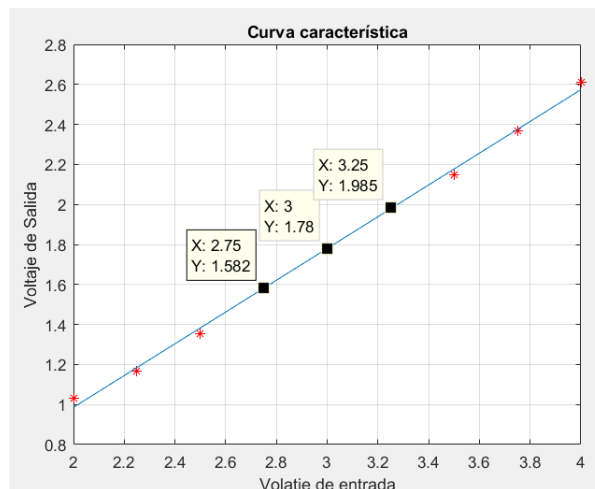


Figura 3.1 Curva característica obtenida de los valores de entrada y salida del sistema.

De la curva característica de la planta real, se selecciona el punto de operación donde presente una forma más lineal. Por lo que se escoge el punto de operación $P_o=3$, con el que se realiza el análisis para obtener el tiempo de arranque y tiempo de estabilización. Tiempo de arranque, T_{arr} , es el tiempo que le tarda a la señal llegar desde el arranque de la planta al voltaje de salida V_s ; según la tabla 3.1, el punto 2.5 corresponde a un valor de salida $V_s=1.817$. Observando la Figura 3.2, el tiempo T_{arr} es aproximadamente 5 segundos.

Una variación de 0.25 V en la referencia (voltaje de entrada) corresponde a una variación en la salida de 0.193V. El tiempo de estabilización obtenido es de 6.458 segundos hasta que se alcanza su estado estable del sistema y el tiempo de muestreo utilizado es de 0.01 segundos.

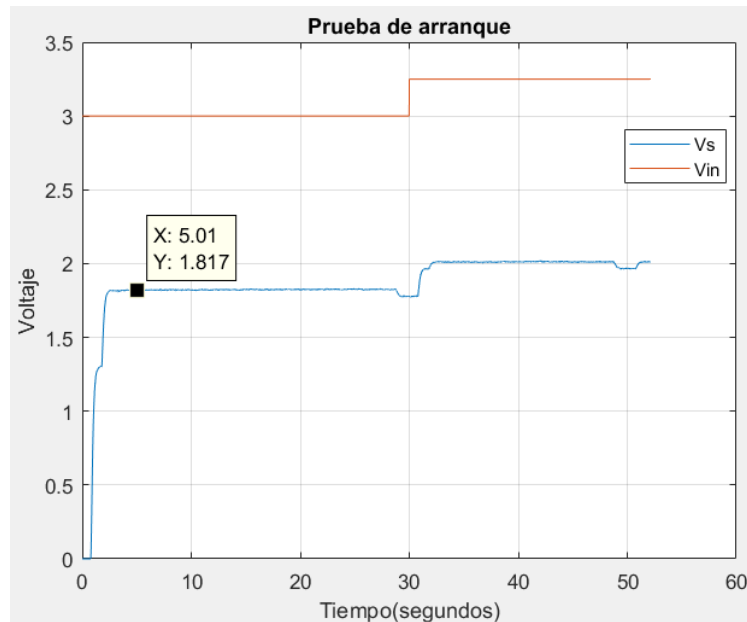


Figura 3.2 Arranque del sistema, curva de color azul representa la entrada con el punto de operación. Curva de color roja representa la salida con un tiempo de arranque de 5s.

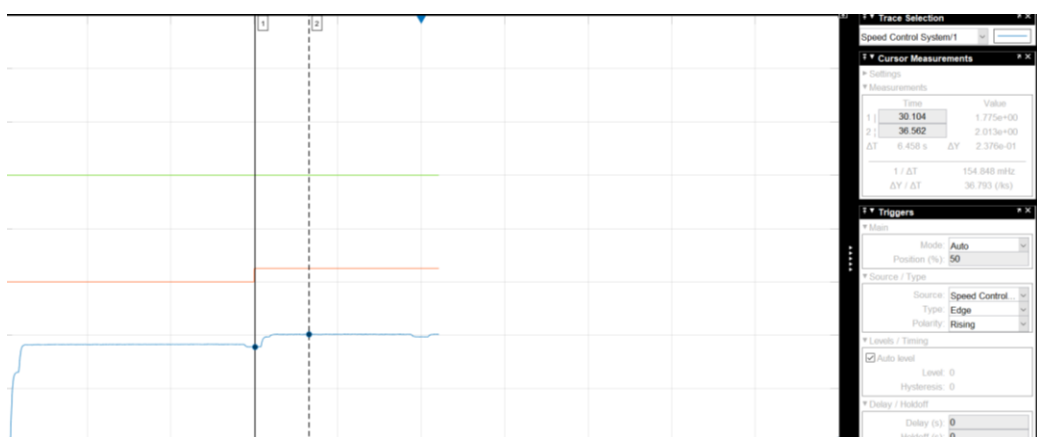


Figura 3.3 Tiempo de estabilización

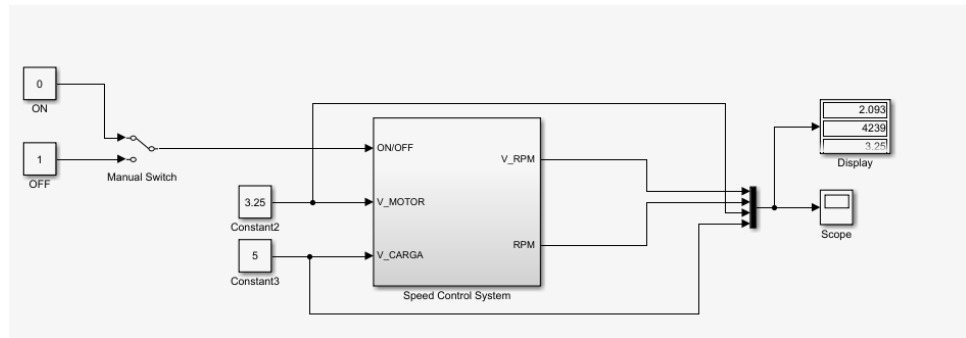


Figura 3.4 Diagrama de bloques en lazo abierto

En la Figura 3.4 se puede observar el diagrama de bloques en lazo abierto con el cual se obtuvieron los datos experimentales de la planta de velocidad para la respectiva curva característica de la planta de velocidad y la simulación de la respuesta del arranque del sistema.

Para el diseño del experimento de identificación, se debe tener el punto de operación y la variación (ΔV) que se realiza con respecto a este punto de operación, para este caso de 0.25. En la Figura 3.6, se expone el diagrama de bloques en lazo abierto, en el cual el bloque “Pulse Generator” se configura con los valores de tiempo $T_{ss}=6.458$ segundos y $\Delta V=0.5$, el bloque “Step” se configura con el parámetro de $T_{arr}=5$ segundos y $P_o=3$. En la figura 3.5, se observar la simulación de respuesta del sistema para el experimento de identificación de la función de transferencia, de color azul el voltaje de entrada y en color rojo el voltaje de salida. Se puede apreciar que la variación es simétrica tanto en la entrada como en la salida.

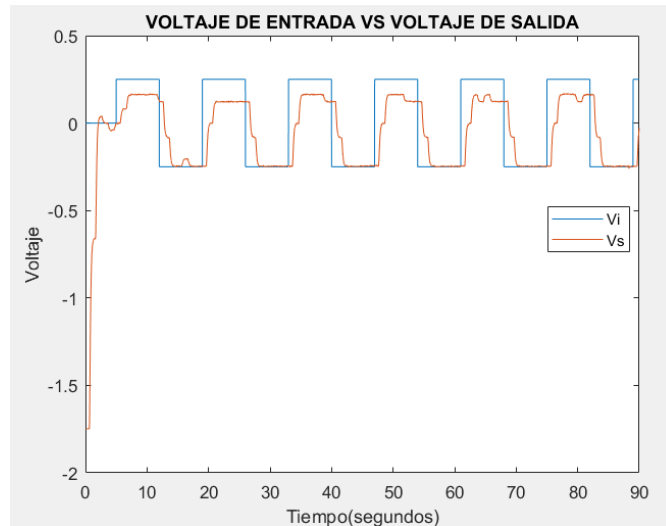


Figura 3.5 Respuesta del sistema, color azul la entrada del sistema y rojo la respuesta de salida.

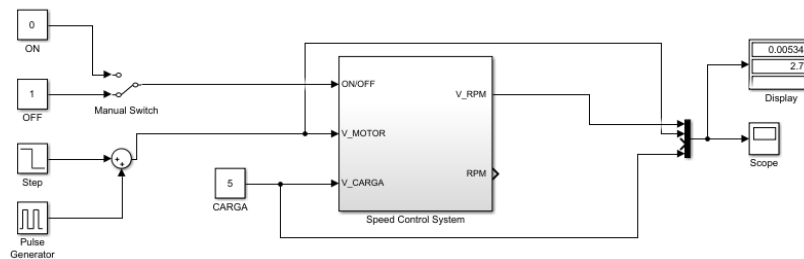


Figura 3.6 Diagrama de bloques en lazo abierto para obtener la respuesta del sistema para el experimento de identificación

El código que se muestra a continuación separa la gráfica de la Figura 3.5, es decir, me permite observar por separado la respuesta de la entrada y la salida.

Adicionalmente va a permitir que la respuesta de entrada y salida sean graficadas retirando la media (Figura 3.7 y Figura 3.8) y así ejecutar al comando “ident” para la respectiva identificación del sistema.

```
t=CC(:,1);
in=CC(:,3);
```

```

out=CC(:,2);
Ts=0.01
figure()
plot(t,in)
title('VOLTAJE DE ENTRADA')
xlabel('Tiempo(segundos)')
ylabel('Voltaje')
figure()
plot(t,out)
xlabel('Tiempo(segundos)')
ylabel('Voltaje')
title('VOLTAJE DE SALIDA')
outop=mean(out(3.01/Ts:3.66/Ts))
in2=in-3;
out2=out-outop;
figure()
plot(t,[in2 out2])
xlabel('Tiempo(segundos)')
ylabel('Voltaje')
title('VOLTAJE DE ENTRADA VS VOLTAJE DE SALIDA')
legend('Vi','Vs')
ident

```

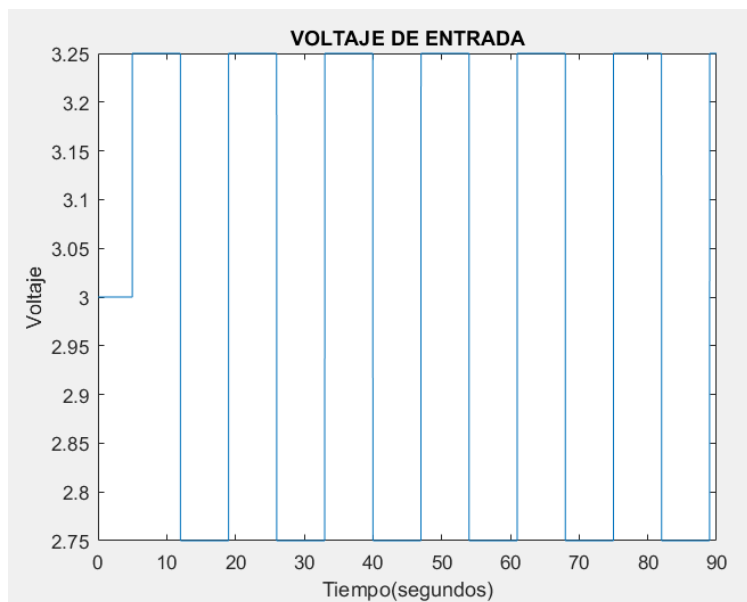



Figura 3.7 Gráfico en lazo abierto retirando la media

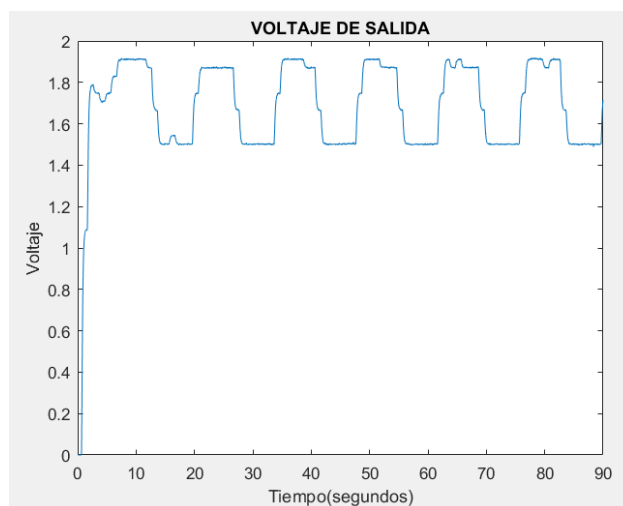


Figura 3.8 Gráfico en lazo abierto retirando la media

Ejecutado el comando "ident" se procede a realizar la importación de datos como se observa en la Figura 3.9, importando la gráfica de entrada, salida y el tiempo de muestreo.

The image shows a software dialog box titled "Import Data". It is divided into four main sections:

- Data Format for Signals:** A dropdown menu is set to "Time-Domain Signals".
- Workspace Variable:** The "Input:" field contains "in2" and the "Output:" field contains "out2".
- Data Information:** The "Data name:" field contains "mydata", "Starting time:" is "0", and "Sample time:" is "0.01". There is a "More" button below these fields.
- Control Buttons:** Four buttons are arranged in a 2x2 grid: "Import", "Reset", "Close", and "Help".

Figura 3.9 Importación de datos

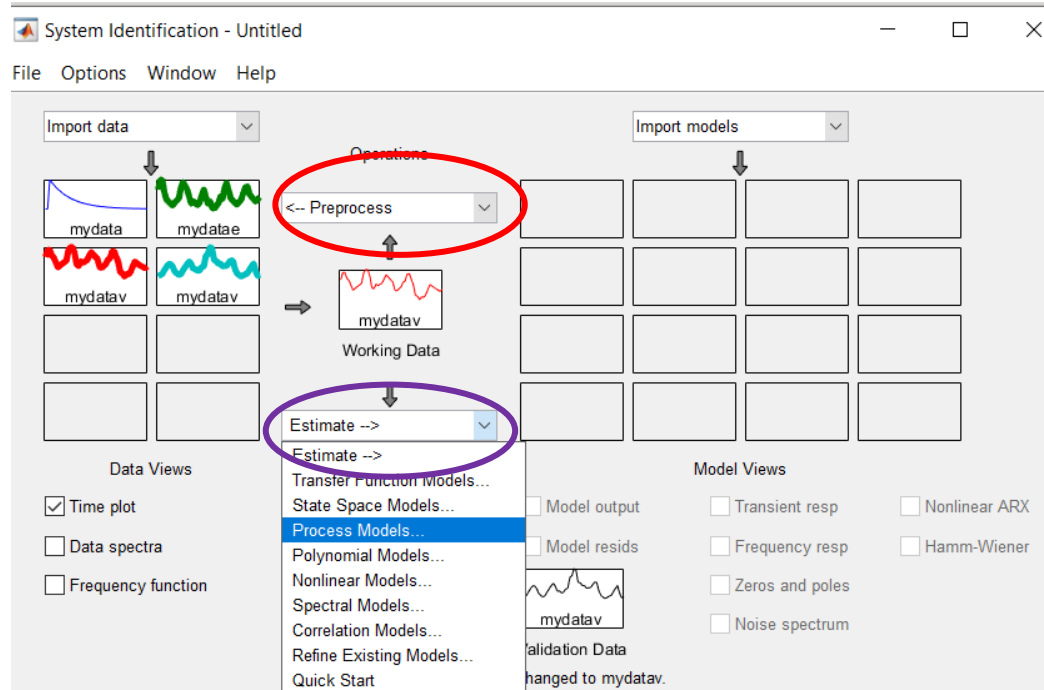


Figura 3.10 Procesamiento para la identificación de la planta. De color rojo, el preprocesamiento y de color morado la estimación

Importado los datos estos son pre procesados, para seleccionar un rango, Figura 3.10. La identificación de la función de transferencia de la planta se analizó la simulación de la respuesta del sistema, Figura 3.5, de la cual se seleccionó rangos en diferentes periodos para luego ser comparados y analizados. En la Figura 3.12 se observa los rangos de la respuesta del sistema (verde, rojo y celeste). Seleccionando dos rangos similares, los rangos de color rojo y celeste, se realizó la estimación del modelo de proceso (Figura 3.10), colocando una gráfica en “Working Data” y el segundo rango escogido en “Validation”. Con la gráfica agregada en “working data” se tiene los datos de donde se va a obtener la función de transferencia del sistema, y en “validation” los datos para validar el resultado. En la ventana “ProcessModel” (Figura 3.11) se configura los parámetros de la función de transferencia y se procede a estimar. De la estimación del modelo de proceso se obtienen diferentes modelos de función de transferencia, escogiendo la función de transferencia con mejor porcentaje de precisión, recordando para que se considere una

identificación válida, el porcentaje debe ser mayor o igual a 70%. En este caso, Figura 3.13, se escogió el modelo P2U:73.05, su nombre indica que es un modelo con dos polos conjugados.

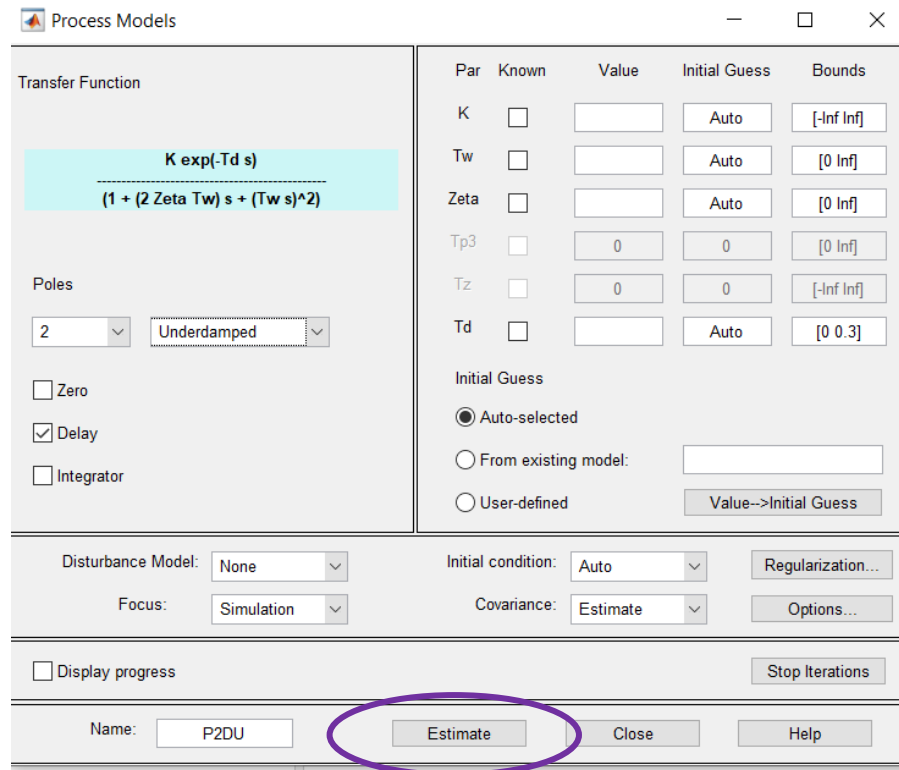


Figura 3.11 Modelo de proceso para estimar la función de transferencia

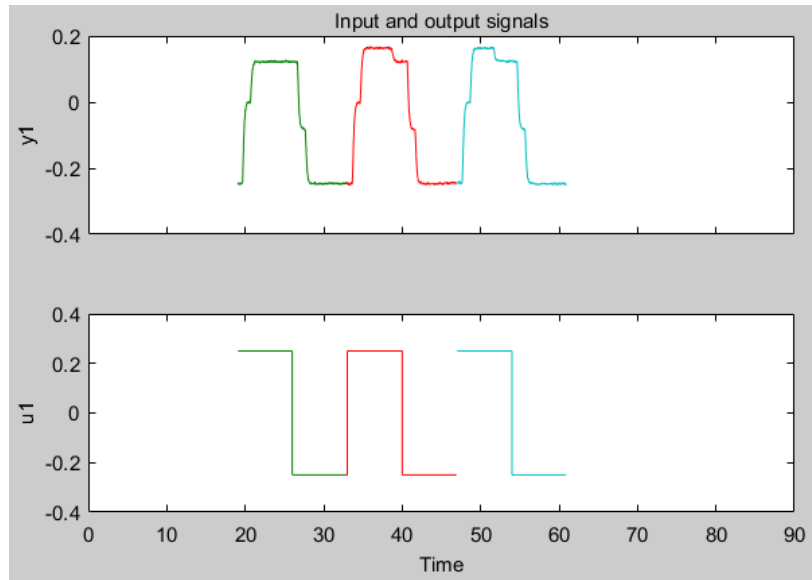


Figura 3.12 Rangos seleccionados

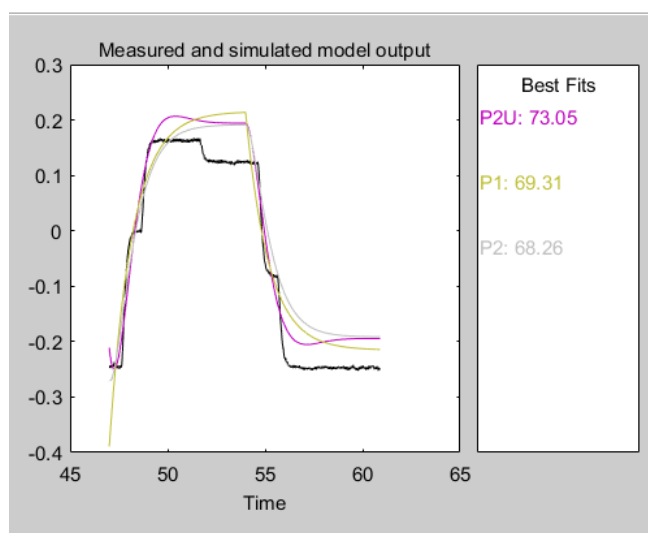


Figura 3.13 Función de transferencia obtenidas con datos reales

En la Ecuación 3.1, apreciamos la función de transferencia de la planta, representa la relación entre el cambio de velocidad del sistema y el cambio de voltaje del motor a partir del punto de operación escogido, 3V, correspondientes a 1.817V a la salida.

$$\frac{1.8162}{s^2 + 2.305s + 2.332}$$

Ecuación 3.1 Función de transferencia

3.1.2 Simulación de la planta de control de velocidad de un motor DC con el controlador.

Con la función de transferencia encontrada de la identificación del sistema, se pudo hallar el controlador de la planta, usando la herramienta Sisotool. El controlador debe cumplir diferentes requisitos para que funcione de forma óptima la planta, el overshoot, variable que me indica cuanto oscila, debe ser de 5%, el tiempo de estabilización aproximadamente 5, tiempo que se obtuvo con los datos experimentales del sistema en el epígrafe 3.1.1 y el error de estado estacionario debe ser cero.

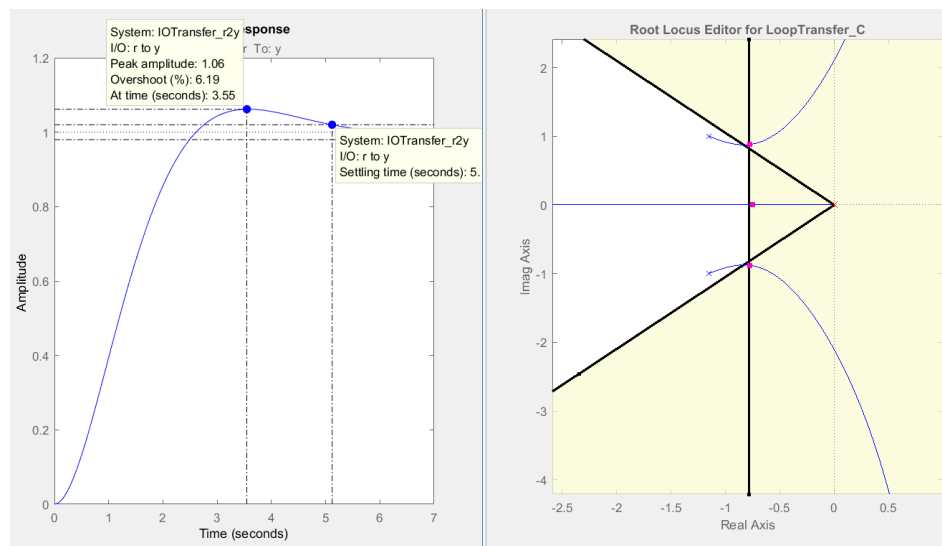


Figura 3.14 Respuesta a una entrada escalón unitario y lugar geométrico de las raíces

Con los parámetros indicados se obtuvo el controlador mostrado en la Ecuación 3.2, con el cual, en el software de programación gráfica, se crea el diagrama de bloques de lazo cerrado, Figura 3.15, para comprobar la funcionalidad del controlador y simular la planta de control de velocidad de un motor DC. Adicionalmente se diseñó un pre-filtro para eliminar el efecto del cero del controlador y del polo de lazo cerrado no deseado

$$\frac{0.1166(s + 4.866)}{s}$$

$$\frac{6.5141(s + 0.747)}{s + 4.866}$$

Ecuación 3.2 Controlador PI y FILTRO

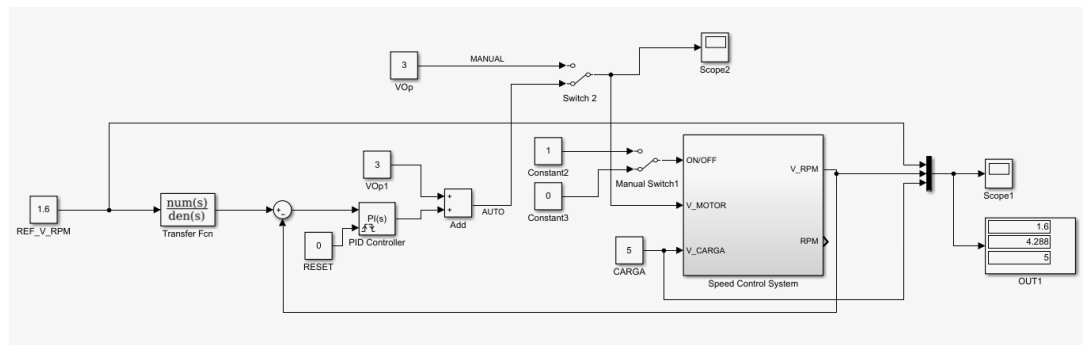


Figura 3.15 Diagrama de bloques de lazo cerrado con el controlador

Para configurar el bloque del controlador “PID CONTROLLER”, del diagrama de bloques en lazo cerrado necesitamos conocer las constantes K_p y K_i para el controlador PI de la planta, las cuales se indican a continuación como resultado de la ecuación del controlador, Ecuación 3.3.

$$K_p = 0.11666$$

$$K_i = \frac{0.5676}{s}$$

Ecuación 3.3 Constantes del controlador PI

Se realizaron pruebas para comprobar el correcto funcionamiento del controlador PI. Se obtuvo un overshoot de 4.66%, el cual fue obtenido observando el valor pico, final e inicial de la gráfica resultante; con estos valores se procede a utilizar la ecuación 3.4 con lo cual se obtiene el

respectivo valor del overshoot. En la figura 3.16, se observa el tiempo de estabilización de 5.030 segundos, siendo este un valor cercano al encontrado en la respuesta escalón, y a su vez se obtuvo un error de estado estacionario 0. Según lo analizado, se comprueba que el controlador se adapta y funciona de manera correcta en la simulación de la planta de control de velocidad de un motor DC.

$$\%Overshoot = \frac{Pico - Final}{Final - Inicial} \times 100$$

$$\%Overshoot = \frac{2.019 - 2.01}{2.01 - 1.817} \times 100 = 4.663\%$$

Ecuación 3.4 Overshoot de forma teórica

▼ Measurements

	Time	Value
1	45.100	1.817e+00
2	50.130	2.010e+00
ΔT	5.030 s	ΔY 1.930e-01
1 / ΔT		198.825 mHz
ΔY / ΔT		38.373 (/ks)

Figura 3.16 Tiempo de estabilización en la simulación de la planta real con el controlador PI

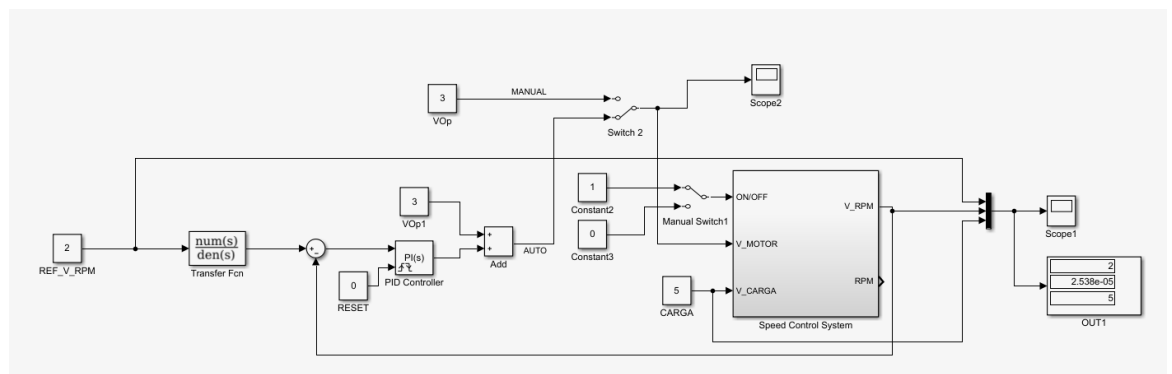


Figura 3.17 Diagrama de bloques en lazo cerrado funcionando en modo automático (controlador PI)

Nótese en la Figura 3.17; la salida se va a ajustar al valor de la referencia (voltaje de entrada), comprobando el comportamiento del controlador PI. El control está diseñado de forma que el sistema sea capaz de reaccionar de manera rápida a las perturbaciones, dado que, al aumentar la carga se requiere que la velocidad se mantenga, de forma que el controlador debe estabilizar al sistema a la referencia de velocidad dada, obsérvese en la Figura 3.18 y 3.19

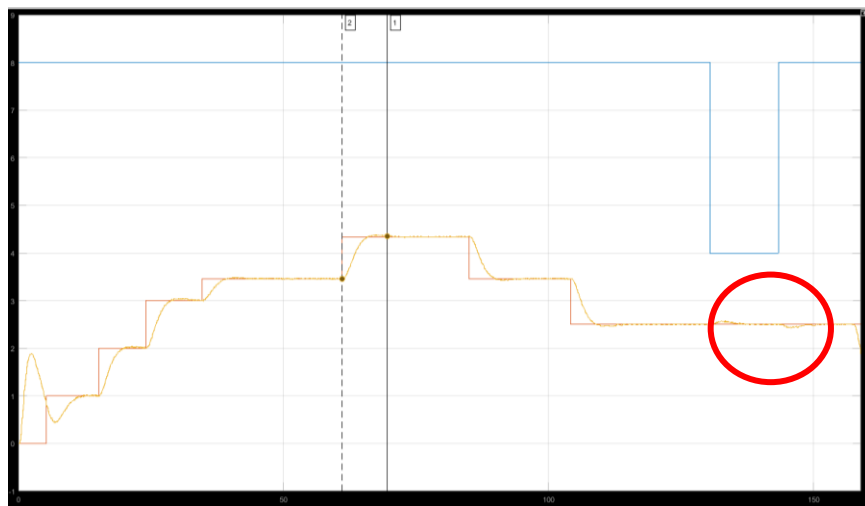


Figura 3.18 Simulación de la planta de control de velocidad de un motor DC con perturbaciones.

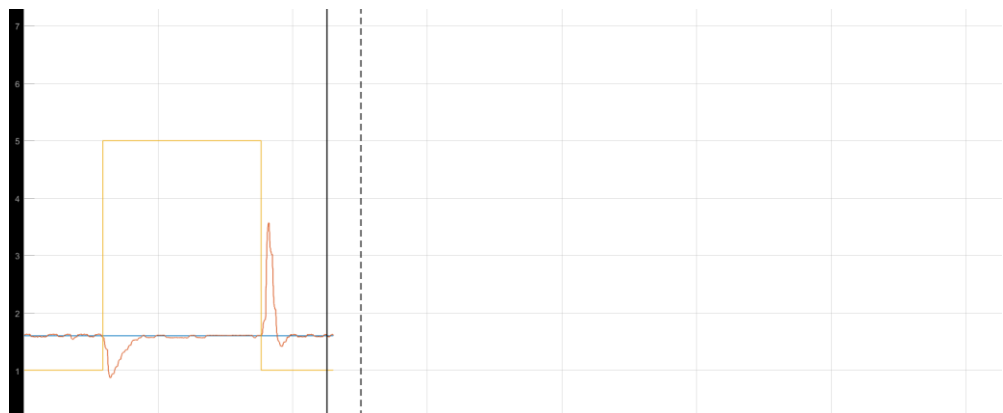


Figura 3.19 Perturbación en el sistema con carga en 1 y luego carga en 5

3.2 Planta de control de velocidad de un motor DC

En la figura 3.20 se puede observar el montaje de la tarjeta de adquisición de datos que sirve para la comunicación con la computadora, la tarjeta que se utilizará como tacómetro digital y las tarjetas electrónicas diseñadas para el control del sistema y la fuente de alimentación.

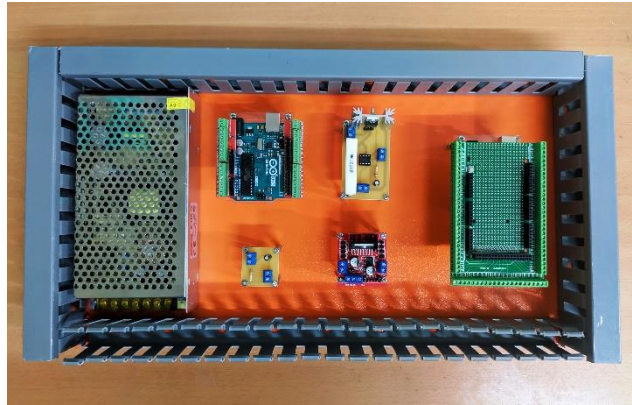


Figura 3.20 Montaje de las tarjetas en la caja

Conociendo la ubicación de los elementos que conformaran la parte de control de la planta de velocidad de un motor DC, se procedió a realizar las debidas perforaciones en la caja para los elementos y canaletas. Figura 3.21.

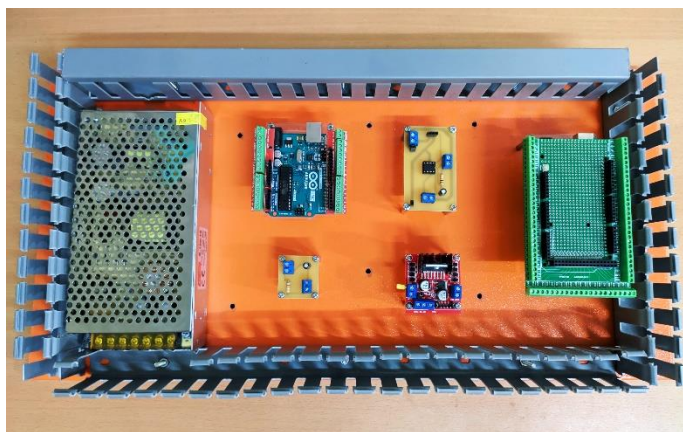


Figura 3.21 Caja con perforaciones

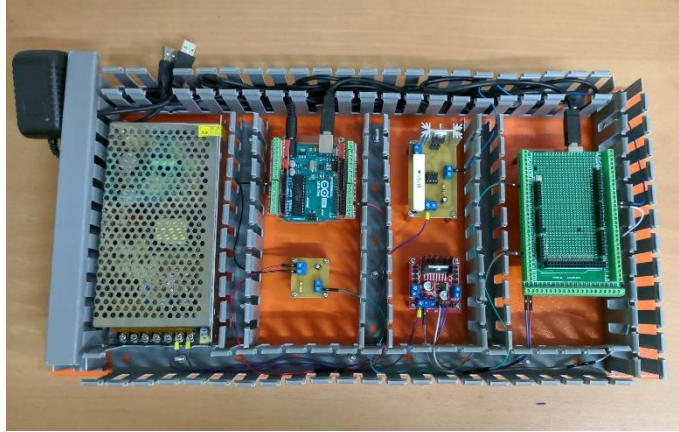


Figura 3.22 Elementos ubicados en la caja

En la Figura 3.22 se observa el debido montaje de los elementos con las canaletas. Se procedió a realizar el cableado de la planta de control de velocidad, Figura 3.23, siguiendo el diagrama esquemático mencionado en el epígrafe 2.5, con las respectivas entradas y salidas de las tarjetas de adquisición de datos, de la fuente de alimentación y de las tarjetas electrónicas.

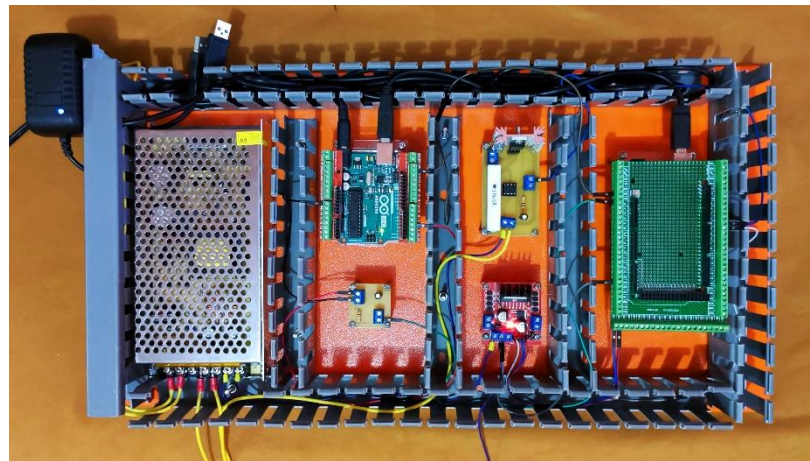


Figura 3.23 Elementos de la planta didáctica, cableados.



Figura 3.24 Planta de control de velocidad de un motor DC.

En la figura 3.24 se puede apreciar el montaje final de todo lo que conforma la planta didáctica.

3.3 Análisis de costos

El costo total de los materiales electrónicos se muestra en la tabla 3.2.

Tabla 3.2 Listado de materiales electrónicos

LISTADO DE A1:E19MATERIALES ELECTRÓNICOS				
CANT	NOMBRE	PRECIO UNID	PRECIO TOTAL	DESCRIPCIÓN
1	Sensor FC 03	\$ 8.50	\$ 8.50	Contador de pulsos
1	Resistencia 1K	\$ 0.25	\$ 0.25	Componente electrónico
1	Capacitor 10uF	\$ 0.25	\$ 0.25	Componente electrónico
2	Driver L298N	\$ 4.50	\$ 9.00	Doble Puente H
2	Cable USB Tipo A - Tipo A	\$ 2.20	\$ 4.40	Cable USB
2	Conector USB tipo A	\$ 0.78	\$ 1.57	Conector Cable USB
1	Plug DC macho	\$ 0.17	\$ 0.17	Conector para Fuente
2	Fuente conmutada 12V 10A	\$ 17.00	\$ 34.00	Fuente de alimentació
1	Juego de jumpers M-M	\$ 2.80	\$ 2.80	Conexiones
1	Switch 3 pines 6A 250v / 10A 125v.	\$ 0.56	\$ 0.56	Interruptor
1	Adaptador 12V 1A	\$ 3.92	\$ 3.92	Adaptador de alimentación.
1	Cable USB Tipo A - Tipo A	\$ 2.24	\$ 2.24	Cable USB
2	Motor DC 30V	\$ 5.38	\$ 10.76	Motor DC
1	Impresión 3D rueda Encoder	\$ 16.80	\$ 16.80	Impresión 3D
1	Conector USB Hembra tipo A	\$ 0.90	\$ 0.90	Conector USB
1	Switch 3 pines - 6A 250v / 10A 125v	\$ 1.10	\$ 1.10	Interruptor
8	Postes PCB	\$ 0.60	\$ 4.80	Bases para Placas
12	Postes para Arduino	\$ 0.25	\$ 3.00	Bases para Arduino
1	6 m Cable #22	\$ 0.50	\$ 3.00	Conexiones
2	PCB Electrónica	\$ 6.00	\$ 12.00	Placa PCB
1	4m Cable #20	\$ 0.40	\$ 1.60	Conexiones
1	Cobertura impresa 3D	\$ 4.00	\$ 4.00	Protector para sensor FC 03
1	Arduino UNO R3	\$ 17.40	\$ 17.40	Tarjeta de adquisición
1	Bloque de terminales para Arduino	\$ 9.19	\$ 9.19	Borneras para Arduino
1	Arduino Mega 2560	\$ 28.50	\$ 28.50	Tarjeta de adquisición
1	Bloque de terminales para Arduino	\$ 19.99	\$ 19.99	Borneras para Arduino
	TOTAL	\$ 154.18	\$ 200.70	

Tabla 3.3 Detalle de costos totales materiales de construcción.

LISTADO DE MATERIALES DE CONSTRUCCIÓN				
CANT	NOMBRE	PRECIO UNID	PRECIO TOTAL	DESCRIPCIÓN
3	Espárragos	\$ 4.76	\$ 14.28	Espárragos de acero inoxidable. 6" de 8 mm
2	Pernos	\$ 1.57	\$ 3.14	Pernos de 4" 1/2
1	Broca	\$ 1.00	\$ 1.00	Broca 1/8" cobalto metal
9	Tornillos	\$ 0.02	\$ 0.18	Tornillos 16mm
4	Pernos	\$ 1.35	\$ 5.40	Pernos 8x50mm inoxidable. 4" 1/2
6	Tuercas	\$ 0.09	\$ 0.54	Tuercas 8mm inoxidable
1	Machuelo	\$ 6.72	\$ 6.72	Machuelo 3mmx0.5
5	Soldadura	\$ 0.88	\$ 4.40	Soldadura 48" inoxidable
10	Tornillos	\$ 0.01	\$ 0.10	Tornillos #6x5/8" T/pato
4	Anillos	\$ 0.28	\$ 1.12	Anillos planos de 1/2"
2	Pernos	\$ 0.56	\$ 1.12	Pernos cabeza plana cónico de 1/2"
1	Varilla	\$ 1.79	\$ 1.79	Varilla. 1m – 1/2 "
2	Acople	\$ 8.96	\$ 17.92	Acople 8mm a 5mm
1	Perforaciones	\$ 7.00	\$ 7.00	Perforaciones
1	Canaletas	\$ 9.00	\$ 9.00	2m Canaletas de 5x2cm
1	Tornillos	\$ 0.60	\$ 0.60	Tornillos de 1"- 5mm
1	Base metálica	\$ 80.00	\$ 80.00	Base metálica
	TOTAL	\$ 124.59	\$ 154.31	

Tabla 3.4 Detalle de costos totales de Fabricación

COSTOS TOTALES DE FABRICACIÓN	
DESCRIPCIÓN	VALOR
MATERIALES ELECTRONICOS	\$ 200.70
MATERIALES DE CONSTRUCCIÓN	\$154.31
MANO DE OBRA	\$ 244.99
TOTAL	\$ 600

CAPÍTULO 4

4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Conclusiones:

- Para realizar la construcción de la planta de control de velocidad de un motor DC, se realizó un análisis respectivo sobre las diferentes tarjetas de desarrollo que serían útiles para la adquisición de datos y él envió de señales de control, por lo tanto, la tarjeta de desarrollo de Arduino cumplió con las características necesarias que se solicitaban al momento del desarrollo de la planta didáctica.
- Se implementó un sensor de muy bajo costo en conjunto con un disco de encoder con ranuras para adquirir los datos necesarios y obtener las revoluciones por minuto del motor. Para esto se encontró una relación entre el número de pulsos del sensor por cada ranura del disco y el tiempo que demoran estos pulsos cuando se completa una vuelta. De esta forma se pudo encontrar los RPM y hacer su conversión a voltaje para obtener así una retroalimentación y que la tarjeta de desarrollo de Arduino lo pueda interpretar.
- La perturbación de la planta se logró a partir de un circuito de carga electrónica que permitió demandar una corriente constante a la salida del generador, que este disminuya su voltaje y a su vez disminuya la velocidad de giro de todo el sistema realizando una fuerza contraria. La demanda de corriente es controlada vía software en conjunto con la tarjeta de Arduino.
- El controlador de la planta se hizo en base a la previa identificación de la misma a partir del Software de Matlab y Simulink para poder obtener una estabilidad en el sistema. El desarrollo de la planta y su finalidad se hacen a partir de la alta demanda de estudiantes y que estos puedan realizar y comprobar el funcionamiento de un controlador para este tipo de planta.

Recomendaciones:

- Se recomienda investigar acerca del uso de la comunicación wifi con el fin de poder realizar el controlador y observar los resultados desde cualquier lugar a través de un computador. Las librerías que se utilizan, actualmente, no se encuentran desarrolladas en su totalidad por lo cual presentan grandes limitantes para su respectiva aplicación.
- Se recomienda verificar e investigar sobre las señales de perturbación internas del sistema, debido a que existen perturbaciones que provocan que la señal adquirida por el Arduino muestre pequeñas variaciones en la gráfica donde se verifica el funcionamiento del controlador, por lo tanto, se genera un pequeño ruido en la adquisición de señales.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] S. J. Chapman, «Capítulo 7,» de *Maquinas eléctricas*, Mexico, Mc graw, 2012, p. 301.
- [2] E. Harper, «Capítulo 3,» de *Maquinas eléctricas*, Limusa, 2005, p. 119.
- [3] J. R. Vilorio, «Capítulo 2,» de *Motores de corriente continua. Motorización de máquinas y vehículos. Características, cálculos y aplicaciones.*, Paraninfo, 2014, p. 29.
- [4] B. H. Cinjordiz, «INFOOTEC.EC,» 2018. [En línea]. Available: <https://www.infootec.net/diferencia-entre-regla-de-la-mano-derecha-y-regla-de-la-mano-izquierda-en-electromagnetismo/>. [Último acceso: 28 10 2019].
- [5] M. R. Figueroa, «GENERADORESDECORRIENTECONTINUA,» 19 04 2015. [En línea]. Available: <https://generadoresdecorrientecontinua.wordpress.com/2015/04/19/generadores-de-corriente-continua/>. [Último acceso: 28 10 2019].
- [6] J. Sanchez, «Tesis: Diseño y construcción de un controlador analógico.,» Trabajo de Grado, Univ. de los andes, Mérida, 2009.
- [7] C. A. Baho. - C. Raya, «Elementos lineales de control,» de *Tecnología de sistemas de control*, Barcelona, UPC, 2004, p. 42.
- [8] C. Pardo, «Picuino,» 2013-2019. [En línea]. Available: <https://www.picuino.com/es/arduprog/control-pid.html>. [Último acceso: 23 10 2019].
- [9] H. Garcini, «Tesis Maestría de automatización y control industrial: Sistemas de control en tiempo continuo,» Trabajo de Grado, FIEC,ESPOL, Guayaquil, 2011.
- [10] S. B. Cerazo, «Prezi,» 26 06 2014. [En línea]. Available: <https://prezi.com/sciulnwyfcy/tecnicas-de-control-de-velocidad-para-motores-dc/>. [Último acceso: 28 10 2019].
- [11] F. Mecafenix, «IngenieriaMecafenix: La enciclopedia de la ingeniería.,» 3 5 2017. [En línea]. Available: <https://www.ingmecafenix.com/electronica/puente-h-control-motores/>. [Último acceso: 7 11 2019].
- [12] «Askix.com,» 2019. [En línea]. Available: https://www.askix.com/coche-de-rc-de-control-de-puntero-de-laser_5.html. [Último acceso: 7 11 2019].
- [13] F. Mecafenix, «IngenieriaMecafenix: La enciclopedia de la ingeniería.,» 28 4 2017. [En línea]. Available: <https://www.ingmecafenix.com/automatizacion/encoder/>. [Último acceso: 7 11 2019].
- [14] Naylamp, «NaylampMechatronics,» [En línea]. Available: <https://naylampmechatronics.com/arduino-tarjetas/9-arduino-mega->

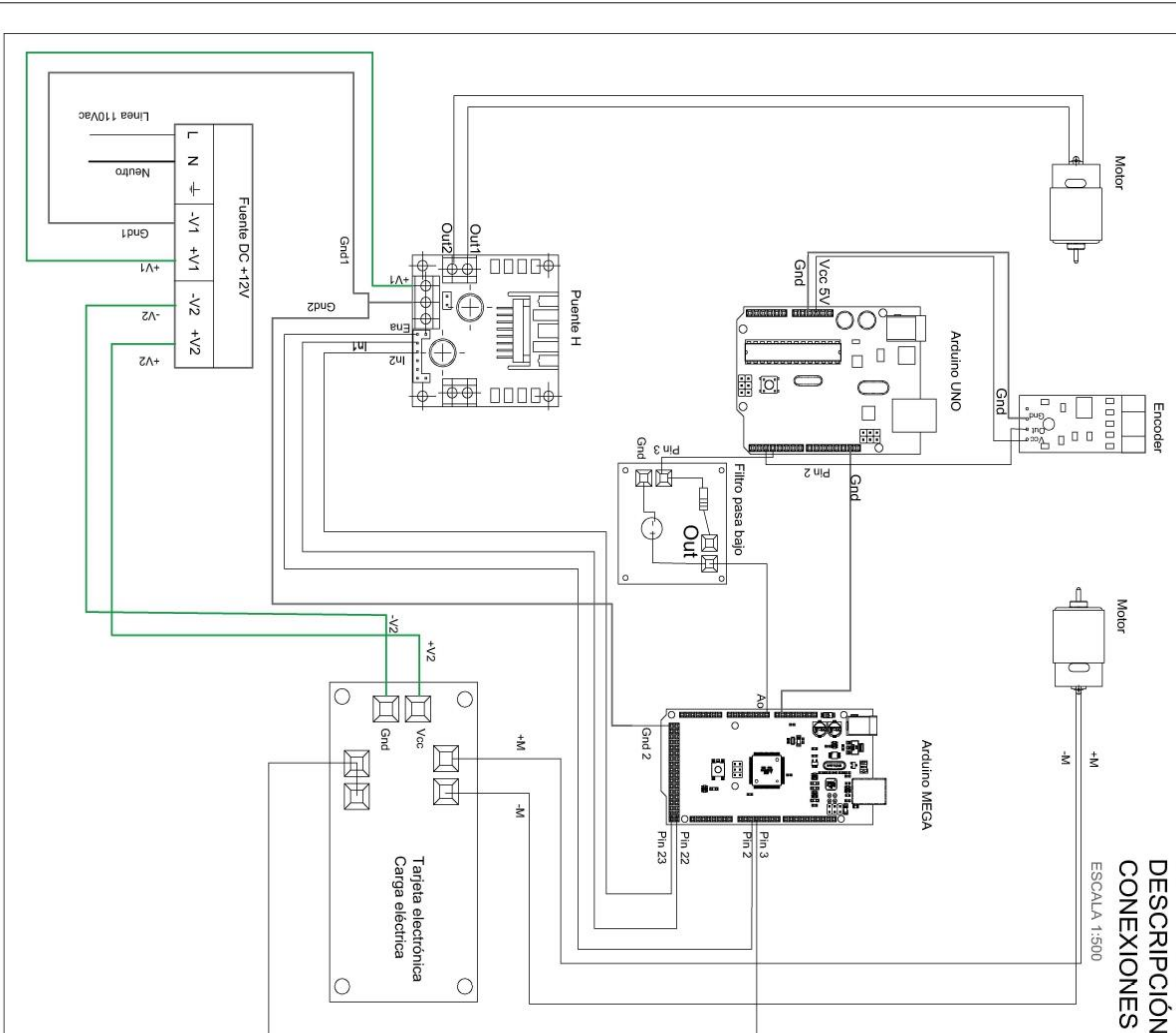
- 2560.html?search_query=arduino+mega+2560&results=264. [Último acceso: 7 11 2019].
- [15] M. J. J. E. Elizondo, «Universidad del Cauca,» noviembre 2002. [En línea]. Available: ftp://ftp.unicauca.edu.co/Facultades/FIET/DEIC/Materias/Identificacion/matlab_seminar/docs/Matlab6xConatec.pdf. [Último acceso: 7 11 2019].
- [16] «Mathworks,» [En línea]. Available: [https://la.mathworks.com/products/simulink.html?requestedDomain=.](https://la.mathworks.com/products/simulink.html?requestedDomain=) [Último acceso: 7 11 2019].
- [17] G. Duarte, «Definición ABC,» 04 2015. [En línea]. Available: <https://www.definicionabc.com/tecnologia/red-inalambrica.php>. [Último acceso: 25 10 2019].
- [18] A. M. -. S. Cuenca, «Principales estandares 802.11,» 2017. [En línea]. Available: <http://ieeestandards.galeon.com/aficiones1573579.html>. [Último acceso: 26 10 2019].
- [19] J.-F. Pillou, «CCM,» 13 02 2018. [En línea]. Available: <https://es.ccm.net/contents/789-introduccion-a-wifi-802-11-o-wifi>. [Último acceso: 26 10 2019].
- [20] JRPM, « Información técnica, asociada al canal de YouTube,» 16 Abril 2016. [En línea]. Available: <http://j-rpm.com/2016/04/construye-una-carga-electronica/>.
- [21] Carol, «carolchanning,» 2018. [En línea]. Available: <https://es.carolchanning.net/tehnologii/108062-nagruzka-elektronnaya-svoimi-rukami-shema-samodelnaya-elektronnaya-nagruzka-na-polevom-tranzistore.html>. [Último acceso: 20 Noviembre 2019].
- [22] «Aprender sobre la electrónica,» 29 Mayo 2013. [En línea]. Available: <http://www.learningaboutelectronics.com/Articulos/Filtro-paso-bajo.php>. [Último acceso: 20 Enero 2020].

5. ANEXOS

Anexo 1

PLANOS DE LA PLANTA DE CONTROL DE VELOCIDAD DE UN MOTOR DC.

- Planos eléctricos
- Planos mecánicos
 - Estructura del soporte
 - Planta didáctica
 - Detalles de la rueda del encoder y caja para el circuito generador de pulsos.
- Planos de diagramas electrónicos
 - Diagrama de tarjeta electrónica “Circuito de carga electrónica”
 - Diagrama de circuito filtro pasa bajo



DESCRIPCIÓN CONEXIONES

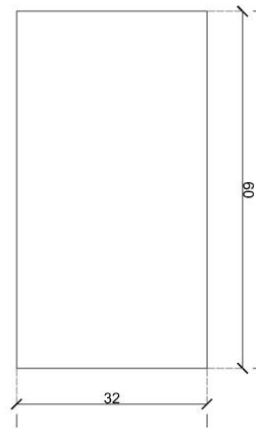
ESCALA 1:500

# PIN	Color de cable	Descripción
1	Azul	Pin Vcc conectado al Arduino UNO
2	Plomo	Pin Gnd conectado al Arduino UNO
3	Azul	Pin OUT conectado al pin 2 del Arduino UNO
Arduino UNO		
# PIN	Color de cable	Descripción
Power	Azul	Pin Vcc conectado al encoder
Ground	Plomo	Pin Gnd conectado al encoder
2	Azul	Pin 2 conectado al pin OUT del encoder
3	Azul	Pin 3 conectado al pin 3 del filtro pasa bajo
3	Plomo	Pin Gnd conectado al Arduino MEGA
Arduino MEGA		
# PIN	Color de cable	Descripción
Analog Ground	Plomo	Pin Gnd conectado al Arduino UNO
Ao	Azul	Pin Ao conectado al pin OUT filtro pasa bajo
2	Azul	Pin 2 interrupt conectado al pin ENA del módulo puente H
3	Azul	Pin 3 interrupt conectado al pin 3 conectado a tarjeta electrónica
22	Azul	Pin 22 conectado al pin IN1 del módulo puente H
23	Azul	Pin 23 conectado al pin IN2 del módulo puente H
23	Plomo	Pin GND conectado al pin Gnd2 del módulo puente H
Filtro pasa bajo		
# PIN	Color de cable	Descripción
OUT1	Azul	Salida conectada a pin Ao del arduino MEGA
3	Azul	Pin conectado al pin 3 del Arduino UNO
Puentes H		
# PIN	Color de cable	Descripción
OUT1	Bianco	Pin OUT1 conectado a +M del motor
OUT2	Bianco	Pin OUT2 conectado a -M del motor
Vin	Verde	Pin +V1 conectado a la salida +V1 del fuente DC 12V
GND	Plomo	Pin Gnd1 conectado a la salida -V1 del fuente DC 12V conectada a Arduino MEGA
EN1	Azul	Pin EN1 conectado a pin 2 de Arduino MEGA
IN1	Azul	Pin IN1 conectado a pin 22 de Arduino MEGA
IN2	Azul	Pin IN2 conectado a pin 23 de Arduino MEGA
Tarjeta electrónica		
# PIN	Color de cable	Descripción
OUT -M	Bianco	Salida -M conectado a -M del motor
Vcc	Bianco	Salida +M conectado a +M del motor
Gnd	Verde	Pin +V2 conectado a salida +V2 de fuente DC
	Verde	Pin -V2 conectado a salida -V2 de fuente DC
Pin 3	Azul	Pin 3 conectado a pin 3 del Arduino MEGA
FUENTE DC 12V		
# PIN	Color de cable	Descripción
L	Rojlo	Línea 110V ac
N	Neutro	Neutro
-V1	Plomo	Salida -V1 conectado a Gnd1 del módulo puente H
+V1	Verde	Salida +V1 conectado a +V1 del módulo puente H
-V2	Verde	Salida -V2 conectado a Gnd de tarjeta electrónica
+V2	Verde	Salida +V2 conectado a Vcc de tarjeta electrónica

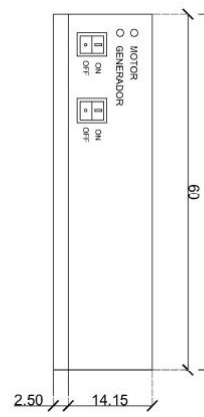
Escuela Superior Politécnica del Litoral

FECHA: ENERO 2020	PROYECTO: PLANTA DE CONTROL DE VELOCIDAD DE UN MOTOR DC
ESTUDIANTES: ITURBURU P. FUENTES A.	CONTIENE: PLANO ELÉCTRICO

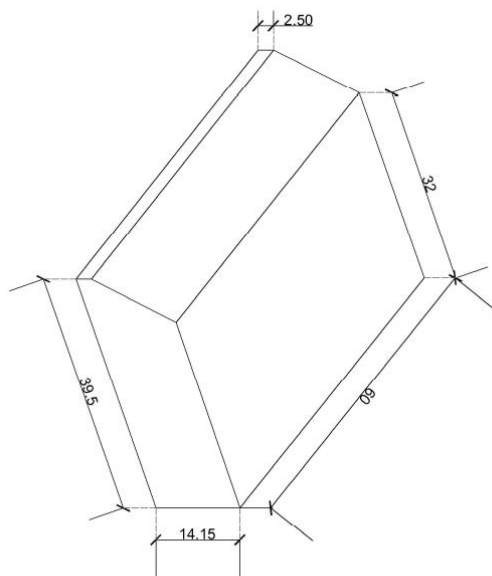
VISTA EN PLANTA
ESCALA 1:10



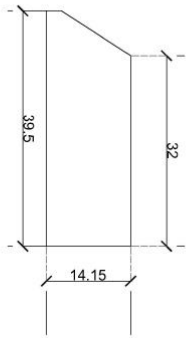
VISTA FRONTAL
ESCALA 1:10



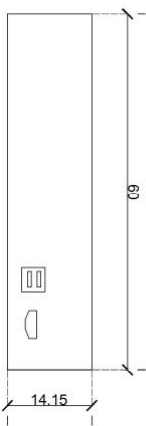
VISTA ISOMÉTRICA
ESCALA 1:10



VISTA LATERAL
ESCALA 1:10

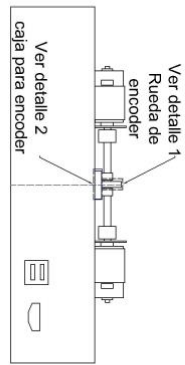


VISTA POSTERIOR
ESCALA 1:10

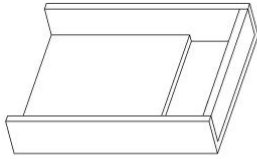


FECHA: ENERO 2020	PROYECTO: PLANTA DE CONTROL DE VELOCIDAD DE UN MOTOR DC
ESTUDIANTES: ITURBURU P. FUENTES A.	CONTIENE: PLANO ESTRUCTURAL DEL SOPORTE

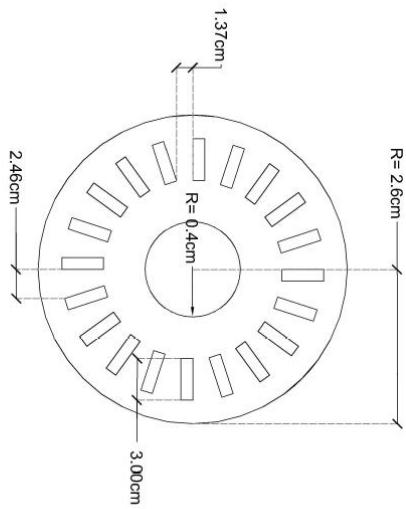
MOTOR
ESCALA 1:10



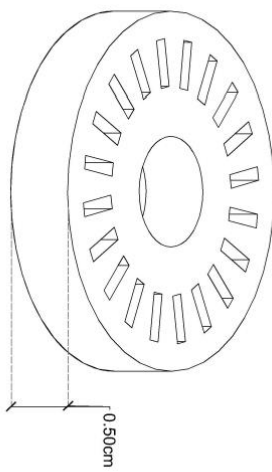
PERSPECTIVA CAJA
ESCALA 1:10



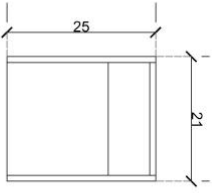
DETALLE 1
RUEDA DE ENCODER
ESCALA 1:5



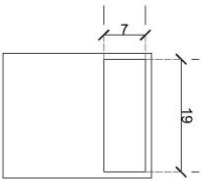
ISOMETRÍA
RUEDA DE ENCODER
ESCALA 1:5



DETALLE 2
CAJA
ESCALA 1:5



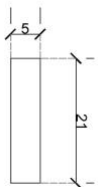
DETALLE 2
CAJA: VISTA 2
ESCALA 1:5



DETALLE 2
CAJA: VISTA 3
ESCALA 1:5

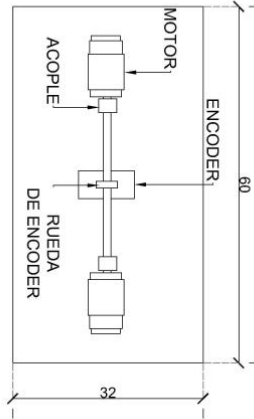


DETALLE 2
CAJA: VISTA 4
ESCALA 1:5

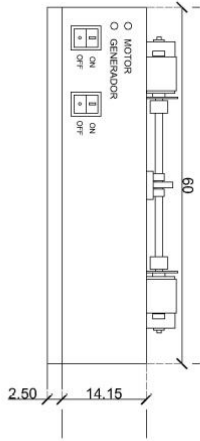


FECHA: ENERO 2020	PROYECTO: PLANTA DE CONTROL DE VELOCIDAD DE UN MOTOR DC
ESTUDIANTES: ITURBURU P. FUENTES A.	CONTIENE: PLANO DE DETALLE: RUEDA ENCODER- CAJA

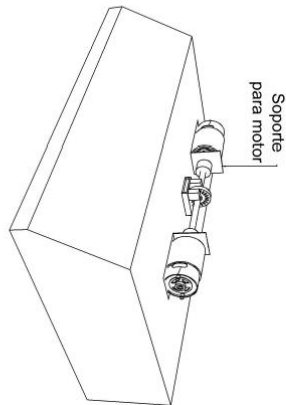
VISTA EN PLANTA
ESCALA 1:10



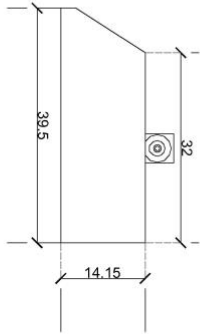
VISTA FRONTAL
ESCALA 1:10



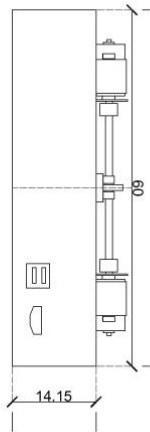
VISTA ISOMÉTRICA
ESCALA 1:10



VISTA LATERAL
ESCALA 1:10

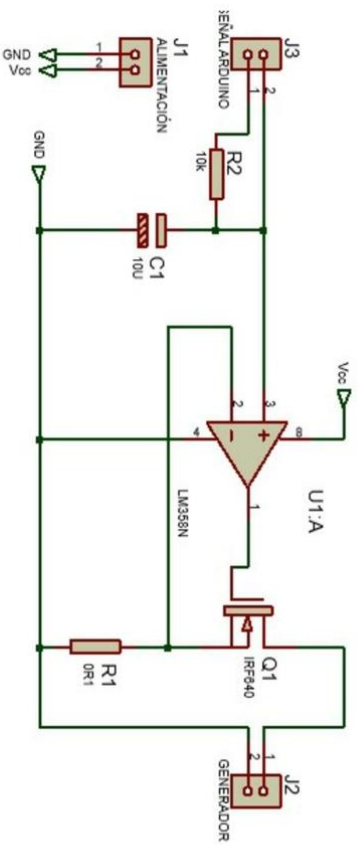


VISTA POSTERIOR
ESCALA 1:10

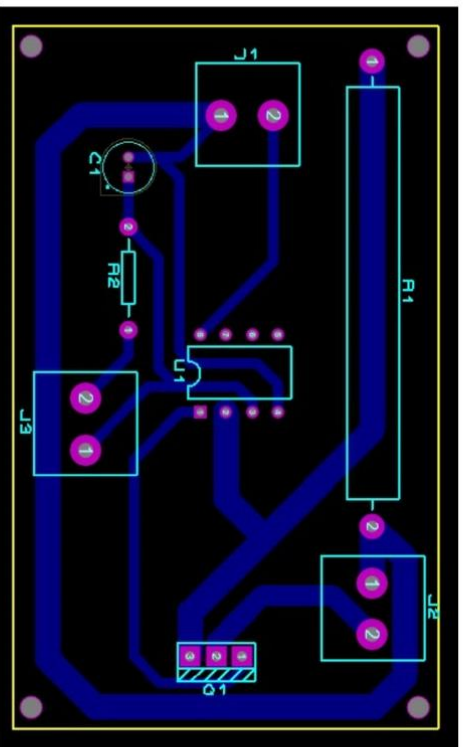


FECHA: ENERO 2020	PROYECTO: PLANTA DE CONTROL DE VELOCIDAD DE UN MOTOR DC
ESTUDIANTES: ITURBURU P. FUENTES A.	CONTIENE: PLANO DE PLANTA DIDÁCTICA

CIRCUITO DE CARGA ELECTRÓNICA PROTEUS

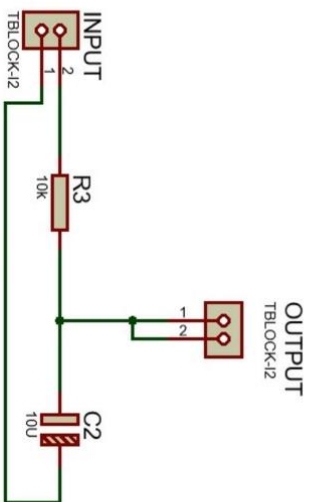


DISEÑO EN ARES

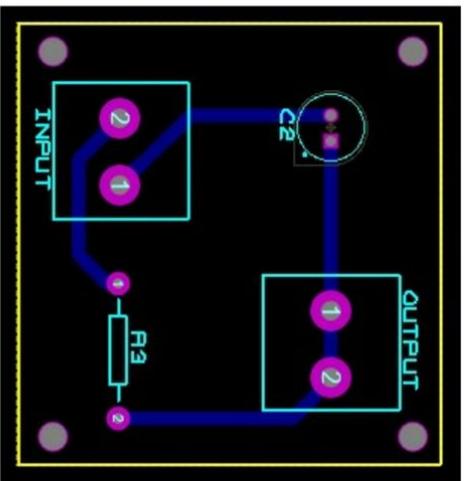


FECHA: ENERO 2020	PROYECTO: DISEÑO DE CIRCUITO DE CARGA ELECTRÓNICA
ESTUDIANTES: ITURBURU P. FUENTES A.	CONTIENE: PLANO DE DIAGRAMA ELECTRÓNICO

CIRCUITO DE CARGA FILTRO PASA BAJOS
 PROTEUS



DISEÑO EN ARES



FECHA:	PROYECTO:
ENERO 2020	CIRCUITO DE FILTRO PASA BAJOS
ESTUDIANTES:	CONTIENE:
ITURBURU P. FUENTES A.	PLANO DE DIAGRAMA ELECTRONICO

Anexo 4

PRÁCTICA: CONTROL DE VELOCIDAD DE UN MOTOR DC

Diseñar un controlador PID o cualquiera de sus combinaciones para la planta de control de velocidad de un motor DC, la función de transferencia es:

$$G(s) = \frac{V_{sensor}(s)}{V_{motor}(s)} = \frac{1.8162}{s^2 + 2.305s + 2.332}$$

Ecuación 5.1 Función de transferencia

El controlador diseñado debe cumplir las siguientes especificaciones:

- Error de estado estacionario igual a cero ante una entrada escalón.
- Tiempo de estabilización alrededor de 5 segundos ante una entrada escalón.
- Sobre nivel porcentual menor que 5% ante una entrada escalón.



Figura 5.1 Fotografía de la planta didáctica de velocidad de un motor DC.

Procedimiento:

1. Abrir Matlab, en el editor ingresar la función de transferencia y guardar está en una variable, en este caso se usó la letra G.

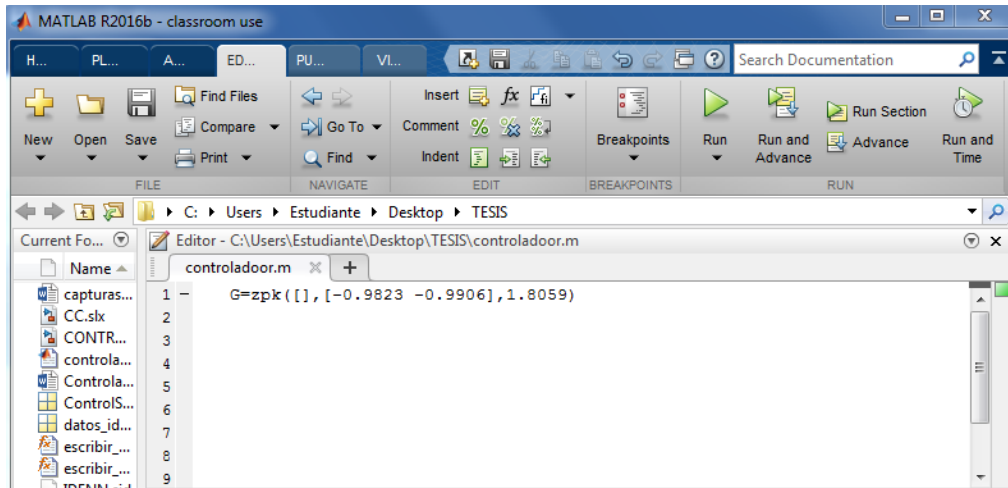


Figura 5.2 Software Matlab - editor

2. Ingresar el comando “sisotool(G)” y ejecutar el programa. Una vez que se ejecuta se abrirá la ventana “Control SystemDesigner” para proceder a diseñar el controlador.

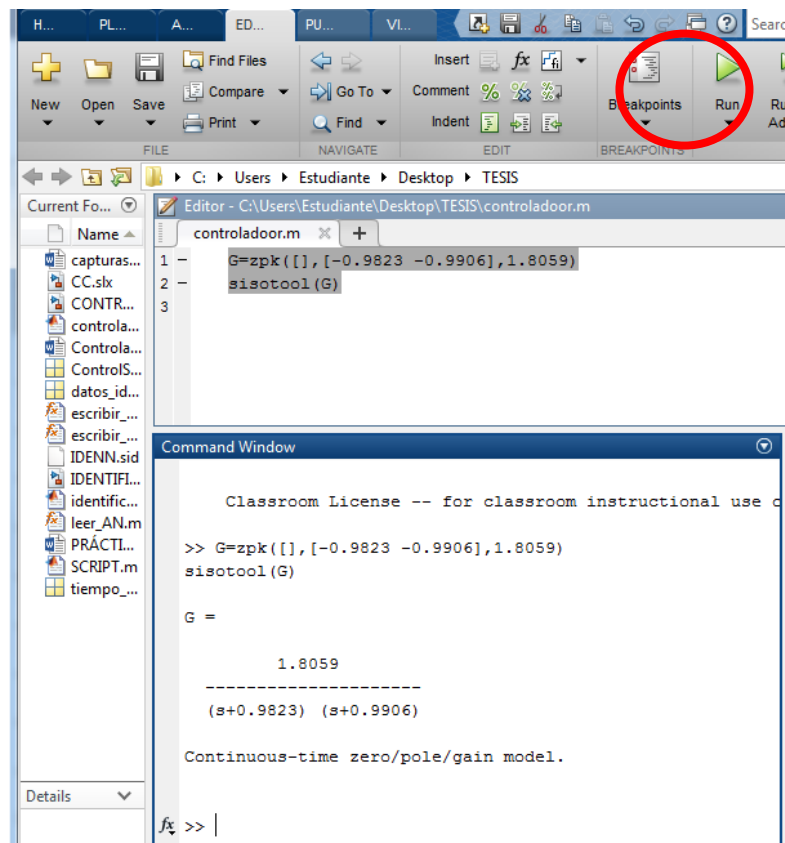


Figura 5.3 Ejecutar el programa

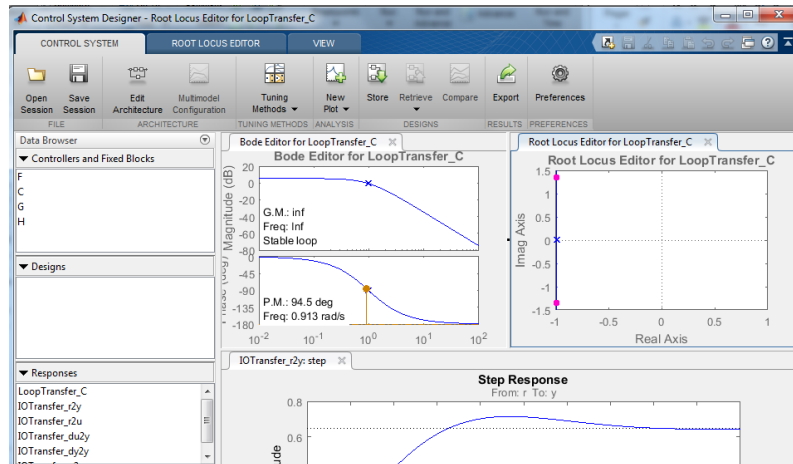


Figura 5.4 Ventana de Sisotool

- Nos ubicamos en el gráfico de respuesta escalón, damos clic derecho y seleccionamos la características que deseamos observar, Figura

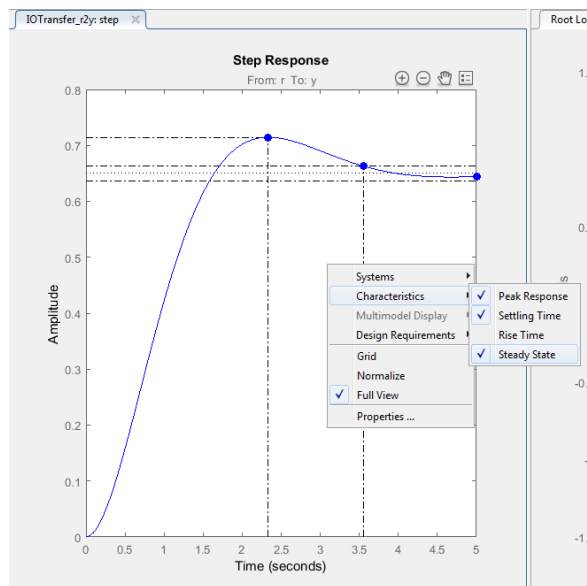


Figura 5.5 Respuesta escalón

- En la gráfica "Root Locus Editor" dar clic derecho en la opción "DesignRequeriment" para añadir las especificaciones del controlador.

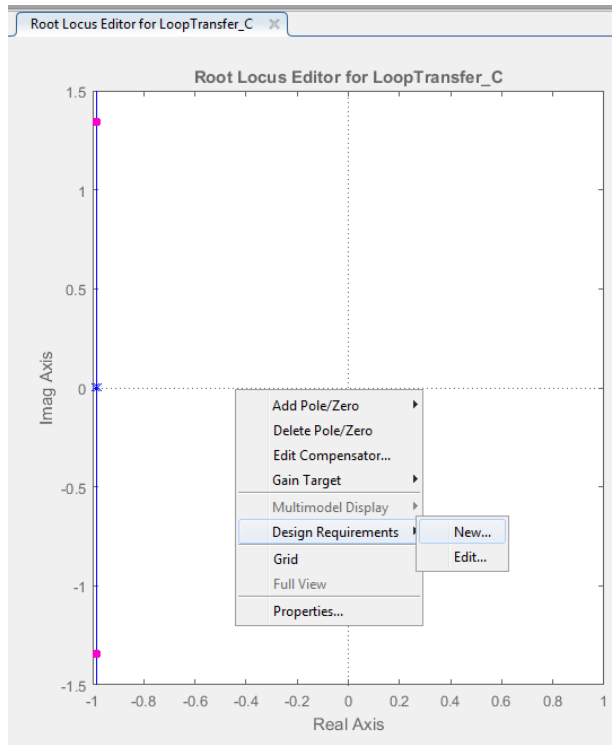


Figura 5.6 Root Locus Editor

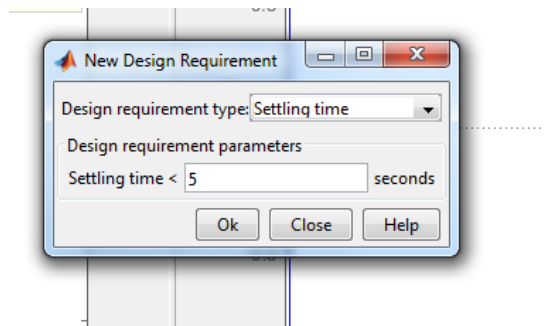


Figura 5.7 Requerimiento de tiempo de estabilización

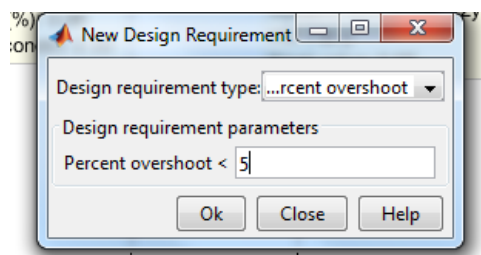


Figura 5.8 Requerimiento de overshoot

5. Se procede a diseñar el controlador para alcanzar las especificaciones requeridas.

- Añadimos un integrador.

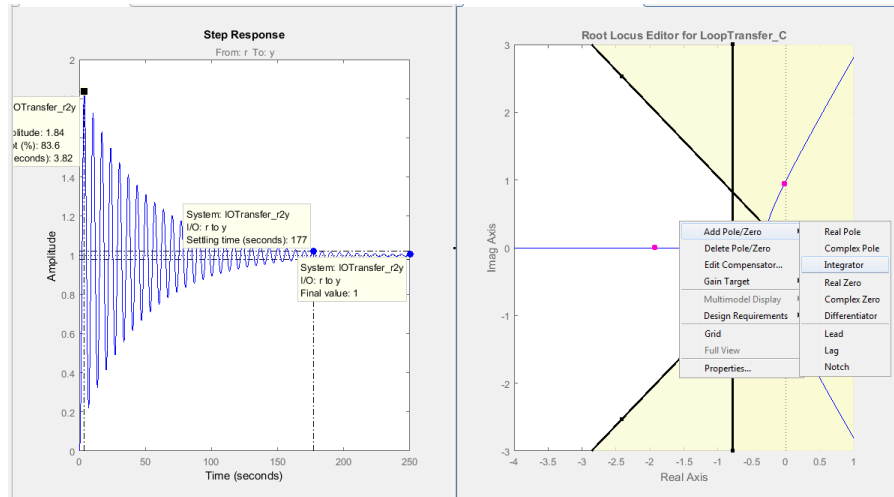


Figura 5.9 Añadir integrador

- Se añade un cero.

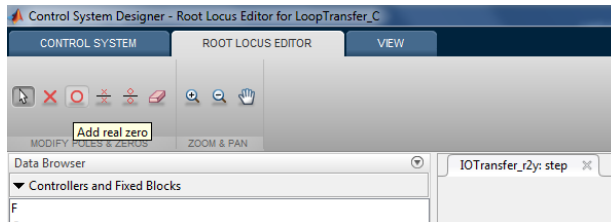


Figura 5.10 Añadir un cero

- Se le va a añadir un filtro para estabilizar al sistema y se va moviendo el lugar geométrico de las raíces con el cero, hasta obtener la respuesta escalón.

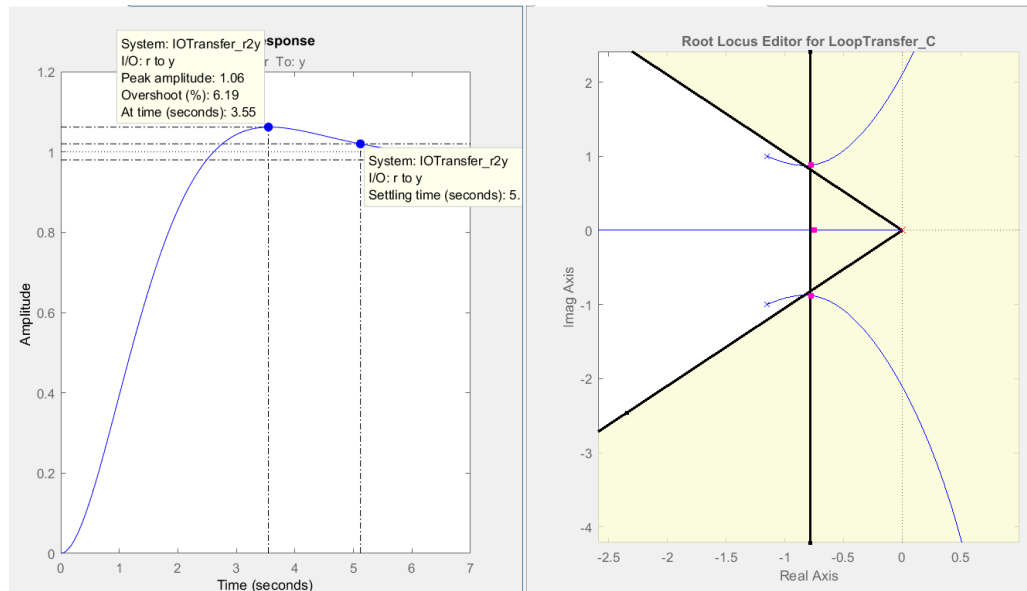


Figura 5.11 Diseño del controlador

- El controlador obtenido es un controlador PI (Figura 5.24), con las siguientes constantes:

$$K_p = 0.11666$$

$$K_i = \frac{0.5676}{s}$$

Ecuación 5.2 Constantes del controlador

```

Name: F
Sample Time: 0
Value:
6.5141 (s+0.747)
-----
(s+4.866)

Name: C
Sample Time: 0
Value:
0.11666 (s+4.866)
-----
s

```

Figura 5.12 Controlador y Filtro

6. Diseñado el controlador se procede a comprobar con la planta de velocidad real, que este controlador cumple los requerimientos.
7. En simulink, abrir el diagrama de bloque de lazo cerrado de la planta de velocidad.

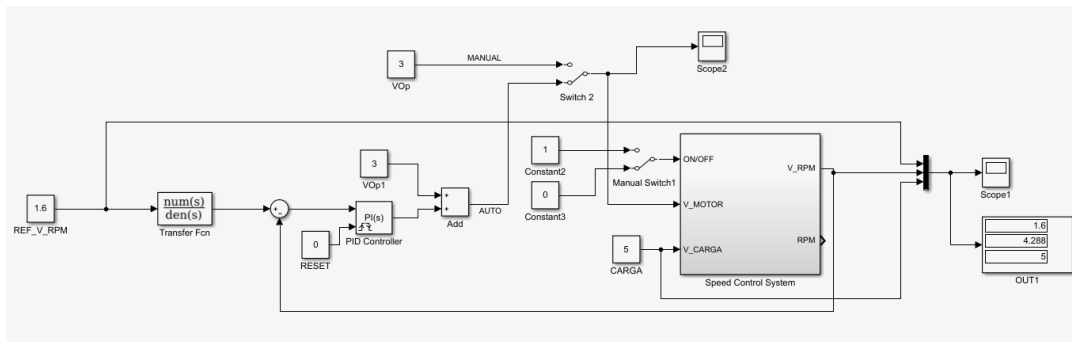


Figura 5.13 Diagrama de bloque en lazo cerrado

8. En el bloque PID CONTROLLER, se debe añadir las constantes del controlador diseñado.

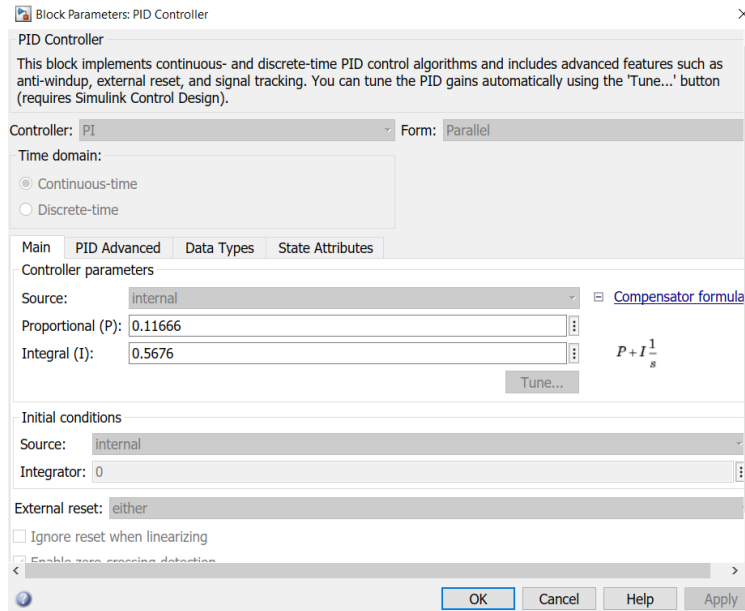


Figura 5.14 Bloque controlador PID

- En el bloque “constant” se va ingresando el valor de voltaje de referencia y en “carga” la perturbación.

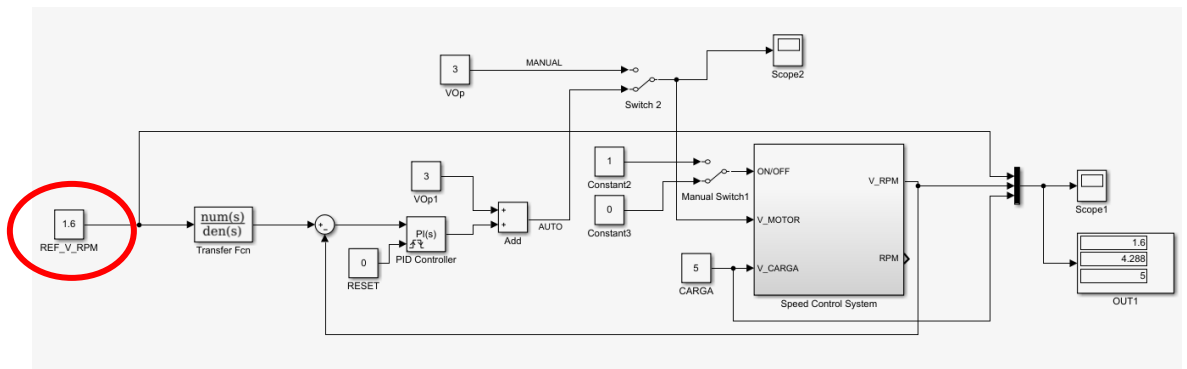


Figura 5.15 Diagrama de bloque en lazo cerrado

- Para la prueba en el bloque “constant” ingresaremos:
 - Valor inicial 1.817
 - Valor final 2.01
9. Para verificar que el overshoot sea menor al 5% se debe tomar el valor pico y el valor final de la gráfica obtenida, dividida para el valor final menos inicial que fueron ingresados en el bloque “constant”, ecuación 5.3.

Siguiendo la ecuación:

$$\%Overshoot = \frac{Pico - Final}{Final - Inicial} \times 100$$

$$\%Overshoot = \frac{2.019 - 2.01}{2.01 - 1.817} \times 100 = 4.66\%$$

Ecuación 5.3 Ecuación para obtener el sobrenivel porcentual

Para obtener el tiempo de estabilización se debe obtener una banda del 2% de la diferencia del valor final menos inicial: $2.01 - 1.817 = 0.193$, es decir el 2% de 0.193 es 0.00386 y este valor sumarle y restarle al valor final, 2.01.

$$2.01 - 0.00386 = 2.006$$

$$2.01 + 0.00386 = 2.0138$$

Teniendo estos dos valores se busca el ultimo cruce de estos con la gráfica, obteniendo así el Tiempo de estabilización, observando la Figura 5.29 el tiempo de estabilización es 5.03 segundos.

▼ Measurements

	Time	Value
1	45.100	1.817e+00
2	50.130	2.010e+00
ΔT	5.030 s	ΔY 1.930e-01
	1 / ΔT	198.825 mHz
	ΔY / ΔT	38.373 (/ks)

Figura 5.16 Tiempo de estabilización

Según lo analizado, se comprueba que el controlador se adapta y funciona de manera correcta en la simulación de la planta de control de velocidad de un motor DC.